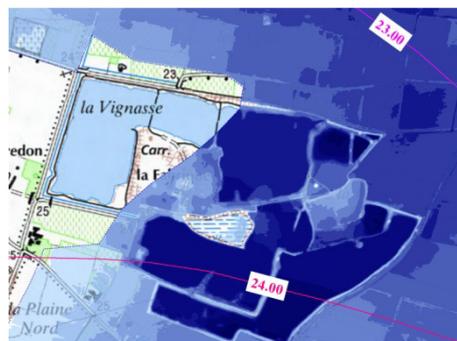


Diagnostic hydraulique, plaine de Raissac d'Aude

12 septembre 2018
Rapport final



Sommaire

Avant-propos	3
1. Recueil et critique des données disponibles	5
1.1. Les objectifs	5
1.2. Les moyens et les méthodes	6
1.2.1. L'hydrologie	6
1.2.2. Hydraulique	9
2. Nouveaux calculs	17
2.1. Intégration des levés bathymétriques.....	17
2.2. Profondeur et marnage	17
2.3. Calcul de vitesse	19
2.3.1. Méthode	19
2.3.2. Mise en œuvre.....	20
2.3.3. Critique de la méthode et conclusion	23
3. La question des embâcles.....	27
3.1. Le risque d'embâcle.....	27
3.1.1. Retour d'expérience sur la crue de 1999	27
3.1.2. Analyse des risques	27
3.2. Prise en compte des embâcles	30
4. Avis du bureau d'étude sur le risque lié aux merlons des bassins	31
5. Conclusion	33
ANNEXE : données fournies.....	35

Avant-propos

Akuo Energy projette d'installer une centrale photovoltaïque flottante sur d'anciennes gravières de la plaine alluviale de l'Aude et de l'Orbieu à Raissac d'Aude.

Le principe de l'aménagement est de disposer des panneaux photovoltaïques sur des radeaux flottants. Ces radeaux sont ancrés en fond de bassin.

La problématique de la présente étude est la définition du risque que font peser les crues de l'Aude et de l'Orbieu sur le dispositif, avec les questions suivantes :

- A quelle cote d'eau les bassins peuvent-ils monter en crue ? et quelle est la vitesse d'écoulement prévisible ?
- En fonction de la cote et de la vitesse, comment les ancrages en fond de bassin doivent-ils être dimensionnés ?
- Quel est le risque que des débris flottants puissent être captés par les radeaux et augmenter leur prise à l'écoulement ?
- Quelle incidence de ce risque sur le dimensionnement des ancrages ?

La présente étude vise à définir les données d'entrée du problème : hauteur et vitesse d'écoulement, risque lié à la présence d'embâcles.

Dans un premier temps, nous analysons les données hydrologiques et hydrauliques disponibles sur le secteur. Dans un deuxième temps, nous proposons un nouveau calcul des hauteurs et vitesses d'écoulement au droit des gravières, sur la base des cartes d'inondations et iso hauteurs fournies par l'étude PPRI.

Nous analysons ensuite les risques supplémentaires induits par :

- Les bois morts et autres flottants pouvant former embâcles
- Les merlons de terre autour des bassins

1. Recueil et critique des données disponibles

Le secteur d'étude est la plaine de l'Aude à son confluent avec l'Orbieu, sur les communes de Raissac d'Aude, Villedaigne et Canet.

Le secteur a été fortement touché par les crues de novembre 1999 : Raissac d'Aude a été isolé pendant trois jours et a déploré la mort d'une de ses habitantes.

Deux études de ces phénomènes d'inondation ont été réalisées et font référence depuis :

- Le PPRi¹ de l'Orbieu, réalisé en 2004 par le bureau d'études SOGREAH (Aujourd'hui Artélia) pour le compte de la DDE² de l'Aude
- La Cartographie des surfaces inondables et des risques du Territoire à Risque Important d'inondation (TRI) de Narbonne, réalisée en 2013 par les DREAL³ Rhône-Alpes, Languedoc-Roussillon et la DDTM² de l'Aude.

Ces deux études ont des objectifs, des moyens, et des techniques différentes :

1.1. Les objectifs

- Le PPRi est un outil d'urbanisme, instrument de la politique de l'Etat en matière de prévention et de contrôle des risques naturels : par la réglementation, appuyée par des études hydrologiques et hydrauliques, les services de l'Etat imposent les règles d'urbanisme en terrain soumis à risque d'inondation. Les communes où un PPRi a été approuvé se voient prescrites :
 - L'interdiction de construire dans les zones où l'aléa est le plus fort
 - Des règles de réduction de la vulnérabilité (cotes des planchers au-dessus de la cote des plus hautes eaux connues, interdiction des murets pour laisser circuler l'eau, mise en sécurité des équipements électriques ou sensibles etc.) dans les zones où l'aléa est moindre
- ⇒ **Le PPRi de l'Orbieu, approuvé en 2004, prend en compte 35 communes riveraines de cette rivière et de ses affluents, dont Raissac et Canet, mais pas Villedaigne**
- ⇒ **Villedaigne, initialement intégré au PPRi de l'Orbieu fait l'objet d'un PPRi propre, approuvé en 2014. Sur Villedaigne, la cartographie des aléas a été modifiée (cf. Figure 4 p. 13)**
- ⇒ **La cartographie de l'aléa inondation constitue la première étape du PPRi**
- Le TRI est un outil de gestion des politiques publiques face au risque d'inondation. découle de la Directive Inondation 2007/60/CE. Il vise à fixer un cadre d'évaluation et de gestion des risques d'inondation, en priorisant l'intervention de l'Etat pour les territoires les plus exposés. Il engage les

¹ Plan de Prévention des Risques-Inondation

² Direction Départementale de l'Équipement – service aujourd'hui intégré à la DDTM (Dir. Dép. des Territoires et de la Mer)

³ Direction Régionale de l'environnement de l'aménagement et du logement

acteurs locaux dans leur élaboration s'appuyant notamment sur un partage des responsabilités, le maintien d'une solidarité amont-aval face aux risques, la recherche d'une synergie avec les autres politiques publiques.

- ⇒ Le TRI de Narbonne est un des 31 TRI arrêtés en 2012 sur le territoire Rhône-Méditerranée. Il comprend 18 communes soumises aux aléas d'inondation et de submersion marine, dont Raissac (mais pas Villedaigne ni Canet)
- ⇒ La cartographie des surfaces inondables constitue la première étape de la démarche

1.2. Les moyens et les méthodes

Pour définir l'aléa inondation sur un territoire, il faut passer par deux étapes :

- **L'étude hydrologique** définit la probabilité d'occurrence d'un débit en un point donné d'un **bassin versant**.

Toute étude hydrologique repose sur des mesures hydrométriques (pluie, débits des cours d'eau) et des méthodes d'extrapolation.

- **L'étude hydraulique** définit, à l'échelle d'un secteur inondable, la répartition des écoulements (hauteur, vitesse, débordement...) en fonction du débit

Toute étude hydraulique repose sur des mesures topographiques et l'exploitation d'un modèle hydraulique.

1.2.1. L'hydrologie

a. Les débits de crue de 1999

Les deux études de référence se basent sur les données de mesure des débits des stations de Moussoulens sur l'Aude (aval du confluent) et de Luc sur l'Orbieu⁴.

La référence pour ces deux stations est la crue de 1999 :

- La station de l'Orbieu s'est arrêté de fonctionner le 13 novembre à 0:30, alors que le débit affiché était de 1050 m³/s. Le débit maximum a été estimé à 1350 m³/s selon l'étude Claudet⁵, entre 1100 et 1600 m³/s selon le rapport de l'inspection générale de l'environnement⁶
- Celle de l'Aude a affiché un maximum de 3120 m³/s le 13 novembre à 9:00

Cette crue a été estimée⁵ comme ayant une période de retour de 80 à 150 ans sur l'Orbieu à Luc, et de 50 à 100 ans sur l'Aude à l'aval du confluent (Sallèles). A noter que sur l'Aude, la période de retour de cette crue à

⁴ Nous n'avons pas eu accès au rapport de l'étude PPRi, seulement à sa cartographie. Les informations sur cette étude nous sont fournies par l'étude TRI

⁵ Roland Claudet, *Les crues des 12,13 et 14 novembre 1999 dans les départements de l'Aude, de l'Hérault, des Pyrénées-Orientales et du Tarn. Analyse hydrologique de l'événement* ; Géocarrefour Année 2000 75-3 pp. 205-208

⁶ Claude Lefrou, Xavier Martin, et al. *Les crues des 12, 13 et 14 novembre 1999 dans les départements de l'Aude, de l'Hérault, des Pyrénées-Orientales et du Tarn*, rapport public Conseil Général des ponts et Chaussées / Inspection Générale de l'Environnement, 16 octobre 2000

Carcassonne n'était que de 7 ans. Les problèmes sur cette rivière commençaient à l'aval de son confluent avec l'Argent Double.

Des études ultérieures (SOGREAH-PRAUD, 2001 et BRLi, 2002) ont conduit à réévaluer, à la hausse, les débits de pointe de cette crue historique :

- 2500 m³/s sur l'Orbieu à Luc s/ Orbieu
- 4000 m³/s sur l'Aude à l'aval du confluent

NB : nous ne connaissons pas les hypothèses ayant conduit à l'estimation de ces débits, supérieurs à ceux avancés « à chaud » (notes p. 5 et 6 p. 6).

b. Les débits de crue de référence PPRi

Selon les textes, la crue de référence à prendre en compte pour la définition de l'aléa dans le cadre d'un PPRi est *la plus forte crue connue, ou à défaut la centennale, si celle-ci lui est supérieure*. Le débit retenu pour l'étude PPRi est celui de la crue de 1999 :

- 2550 m³/s sur l'Orbieu (en prenant en compte les apports du bassin versant entre la station de Luc s/ Orbieu et l'Aude)
- 4000 m³/s sur l'Aude à l'aval du confluent

c. Les débits pris en compte dans l'étude TRI

Le TRI quant à lui considère trois scénarios :

- Un événement « fréquent », d'une période de retour comprise entre 10 et 30 ans
- Un événement « moyen », correspondant à une période de retour comprise entre 100 et 300 ans – en l'occurrence, c'est l'événement de référence du PPRi qui est choisi
- Un événement « extrême », d'une période de retour millénaire – en l'occurrence, le TRI multiplie par un coefficient de 1,75 les débits de crue du PPRi

d. Note sur le risque vis-à-vis de l'exploitation de la centrale

La centrale, une fois installée, sera soumise à un risque hydrologique. La période cohérente pour analyser ce risque est la période d'exploitation dans son ensemble.

Les probabilités que des inondations se produisent au cours de la **période d'exploitation** de la centrale photovoltaïque sont déterminées en Figure 1 ci-après :

Sur une période d'exploitation de 30 à 50 ans,

- l'événement fréquent a une probabilité quasi certaine de se produire (65 à 100%)
- l'événement moyen a une probabilité de se produire de 10 à 40% (donc de ne pas des produire, de 60 à 90%)
- l'événement rare a une probabilité de se produire inférieure à 5% (soit une chance sur 20)

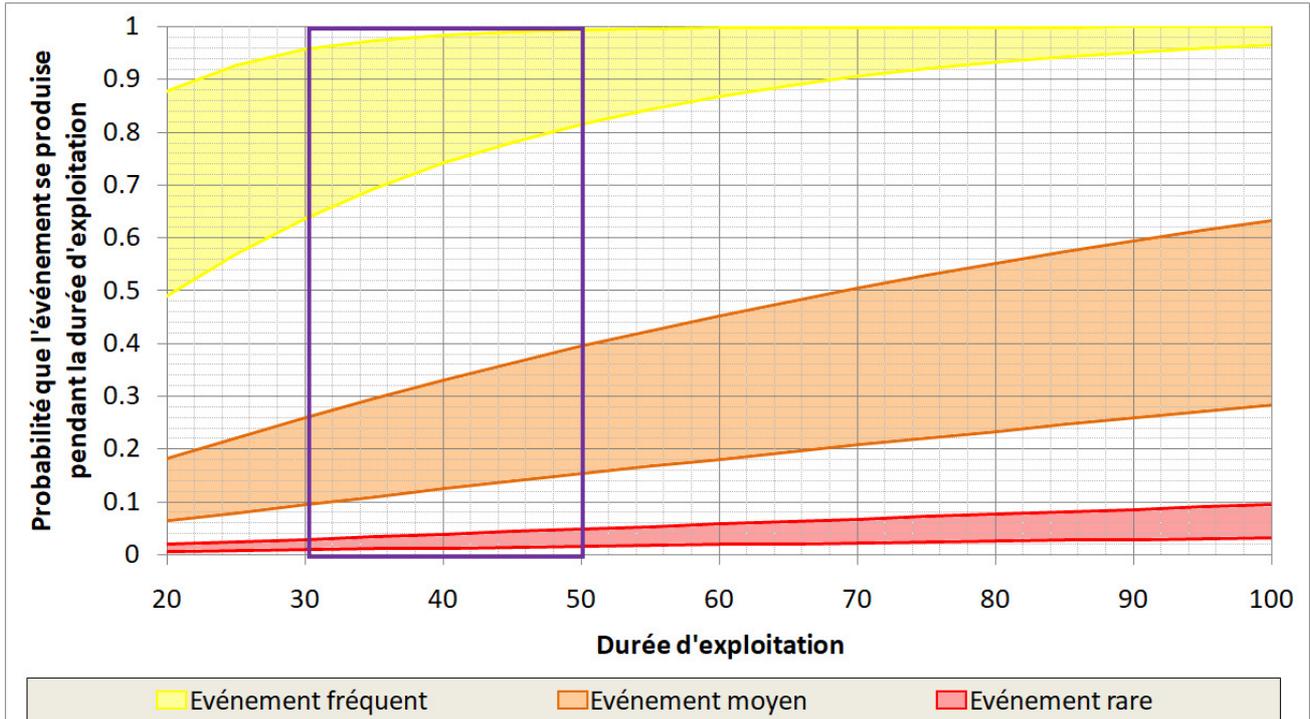


Figure 1 - probabilité de réalisation des événements définis au TRI, selon une durée considérée

e. Les débits à prendre en compte

- Les bassins sont situés au point de rencontre des zones d'inondation de l'Aude et de l'Orbieu. Au vu de la topographie, les bassins les plus au sud sont exposés aux crues de l'Orbieu. Les bassins les plus au nord sont dans la zone commune d'inondation de l'Aude et de l'Orbieu. A noter qu'il y a une différence altitudinale de 2,3 m entre le sud (donc côté Orbieu) et le nord (donc côté Aude) des bassins : le flux débordant le l'Orbieu **traverse** les bassins alors que celui de l'Aude les **remplit par l'aval**.
- Règlementairement, les débits à prendre en compte sont ceux du PPRi (cf. §b)
- Avec moins d'une chance sur 5 de se produire sur 50 années d'exploitation, le débit « exceptionnel » défini dans l'étude TRI n'a pas de raison d'être pris en compte dans le dimensionnement des installations (cf. §d)

On prendra donc en référence de débit les débits du PPRi, soit

- Dans la zone d'étude (lit majeur de l'Orbieu) : 2550 m³/s
- A l'aval (Aude et Orbieu réunis) : 4000 m³/s

f. Remarque sur l'étude Ciel & Terre⁷

L'étude Ciel et terre se base sur la cartographie et la méthode de l'étude TRI. Elle aboutit à des vitesses et hauteurs d'eau très importantes du fait de deux erreurs. En effet, cette étude :

⁷ Synthèse des données concernant les conditions hydrauliques du site et de sa région, Ciel & Terre, mai 2015

1. Applique les débits de l'événement « extrême », soit 1.75 fois la crue du PPRI
2. Somme le débit de l'Aude donné par l'étude TRI à l'aval du confluent, à celui de l'Orbieu. L'Orbieu est donc pris en compte 2 fois !

En somme, le débit supposé par Ciel & Terre pour l'Aude et l'Orbieu réunis est de $(4000+2550)*1.75 = 11463$, au lieu de $4000 \text{ m}^3/\text{s}$. C'est près de trois fois trop !

1.2.2. Hydraulique

a. La topographie

Nous ne disposons pas de l'étude hydraulique ayant conduit à la définition des aléas du PPRI. Nous ne savons donc pas sur quelle base celui-ci a été construit. Au vu de l'époque de réalisation, il s'agit probablement d'une combinaison de levés terrestres (profils en travers des cours d'eau, levés d'ouvrages) et de photogrammétrie aérienne, permettant d'avoir un aperçu de la topographie en plaine d'inondation.

Pour le TRI, la DREAL s'est dotée d'un outil très puissant : le LIDAR. Cette combinaison de technologie LASER (rayon lumineux concentré) et RADAR (analyse du signal réfléchi) permet de littéralement « scanner », à partir d'un hélicoptère ou d'un avion, la zone survolée, et d'obtenir un très grand nombre de points avec une précision altimétrique de l'ordre du décimètre.

En l'occurrence, le LIDAR de la plaine de l'Aude au confluent de l'Orbieu a une densité de 4 points par mètre carré.

Ces points sont ensuite traités numériquement et manuellement (retrait des points hors sol – feuillage des arbres, bâtiments ; des tabliers de ponts, des barrières, pylônes etc.) pour en sortir un modèle numérique de terrain (MNT), sous la forme d'une grille de cellules carrées dont l'altitude de chaque cellule est connue. Même les zones boisées sont très largement couvertes.

Le MNT de la plaine de l'Aude au confluent de l'Orbieu a des mailles de 1 mètre de coté, soit 10000 points par hectare.

Le principal défaut de la technologie LIDAR est de ne pas pénétrer sous l'eau, qui absorbe les rayons. Ainsi, les levés topographiques LIDAR ne permettent pas de faire l'économie, dans les études hydrauliques, de levés bathymétriques dans le lit des cours d'eau.

Nous disposons également, sur le domaine des étangs, de levés topographiques et bathymétriques réalisés en 2010 par la société CDTPOPO. Ces levés nous permettent de disposer de la bathymétrie des étangs.

A titre d'exemple, la Figure 2 ci-après montre en exemple le résultat en représentation 2D ombrée de deux MNT au pas de 1 mètre. Le premier est obtenu à partir d'un Lidar (le Fier près d'Annecy, 74). Malgré les boisements denses, on y distingue le tracé du cours d'eau, ses anciens chenaux secondaires, les chemins et talus... Le deuxième est établi à partir d'une photogrammétrie aérienne. Si l'on distingue bien le lit de l'Ardèche, à l'extrémité droite, de larges secteurs en lit majeur ont dû être extrapolés (les triangles plats le long de la rivière) car ils se trouvaient sous les arbres. Le lit d'un petit affluent est visible mais très mal défini.

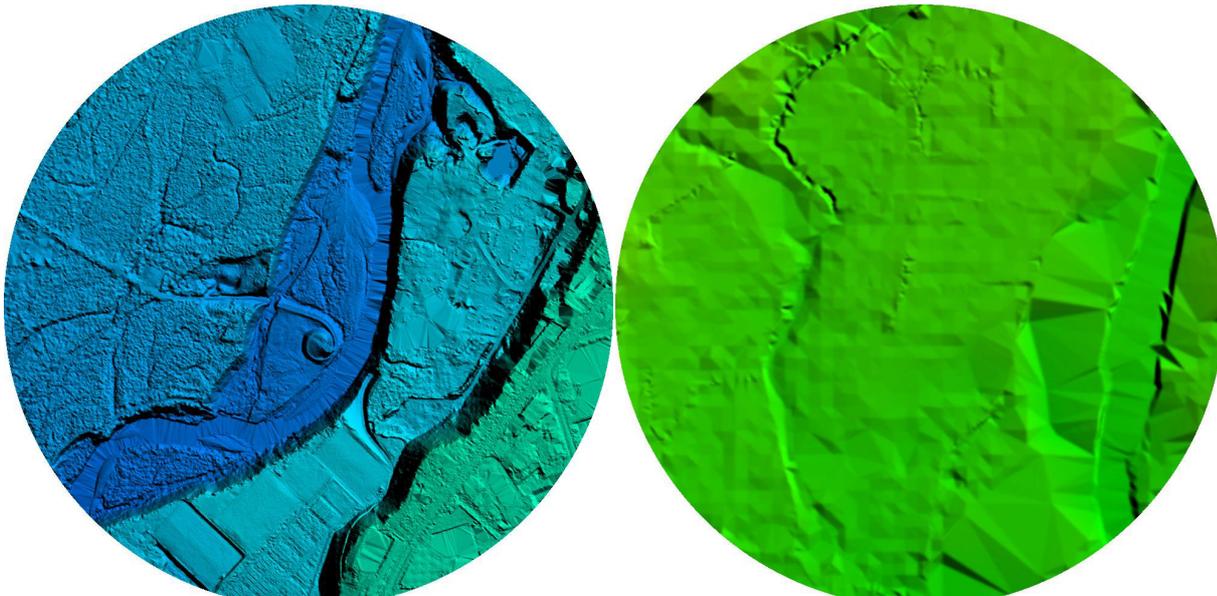


Figure 2 - résultats de levé topographique aéroportés en bordure de cours d'eau : même échelle (1/6250). A gauche, LIDAR sur le Fier (Annecy, 74). A droite, Photogrammétrie aérienne sur l'Ardèche (Vogüé, 07)

En résumé :

- Le PPRi a été construit probablement sur des levés peu exhaustifs
- Il existe aujourd'hui un outil de très grande précision sur le secteur, cet outil peut être appliqué au lit majeur en particulier
- Sur les étangs, nous disposons, en plus, de la bathymétrie

b. La modélisation

Il existe différentes méthodes et outils de modélisation hydraulique.

La plus classique (modélisation filaire) consiste à considérer que les écoulements sont parallèles au sein d'une même tranche de rivière (profil en travers). Les écoulements se font en une seule dimension, d'amont en aval. On calcule alors de proche en proche la ligne d'eau sur chaque profil en travers, en fonction du débit et de la rugosité du fond et des berges.

Cette méthode n'est plus valide lorsque l'écoulement est débordant : il se forme alors des écoulements en lit majeur déconnectés de ceux du lit mineur. Il n'y a plus **un** écoulement, pouvant être calculé comme un seul bloc, mais **des** écoulements liés entre eux (débordement, retour des eaux). On peut considérer que ces écoulements en lit majeur comme

- des chenaux parallèles à l'écoulement principal en lit mineur (modèle à chenaux parallèles) : le modèle prend en compte ces chenaux et leurs liaisons avec le lit mineur
- une série de « casiers » se remplissant et se vidant les uns dans les autres (modèle à casiers) : le modèle prend en compte les volumes de stockage, et les liaisons des casiers entre eux et avec le lit mineur.

Nous avons vu là trois méthodes (Filaire, à chenaux parallèles, à casiers) de modélisation hydraulique à **une dimension**.

Le PPRI a selon toute vraisemblance (année de réalisation, configuration de la plaine) été réalisé avec un **modèle à casiers**. Il est aussi possible qu'un **modèle filaire** ait été utilisé. Le secteur d'étude (les gravières) se trouve dans ce modèle, dans la zone d'expansion de crue de l'Orbieu, en amont de sa rencontre avec celle de l'Aude.

Le TRI a été réalisé avec un **modèle filaire** : les profils dans le secteur vont du lit majeur gauche de l'Aude au lit majeur droit de l'Orbieu, sans distinction.

a. Les données exploitables

Nous ne disposons pas du modèle réalisé par Sogreah pour le PPRI. En revanche, Sogreah a livré des cartes d'aléas et des cotes d'inondation.

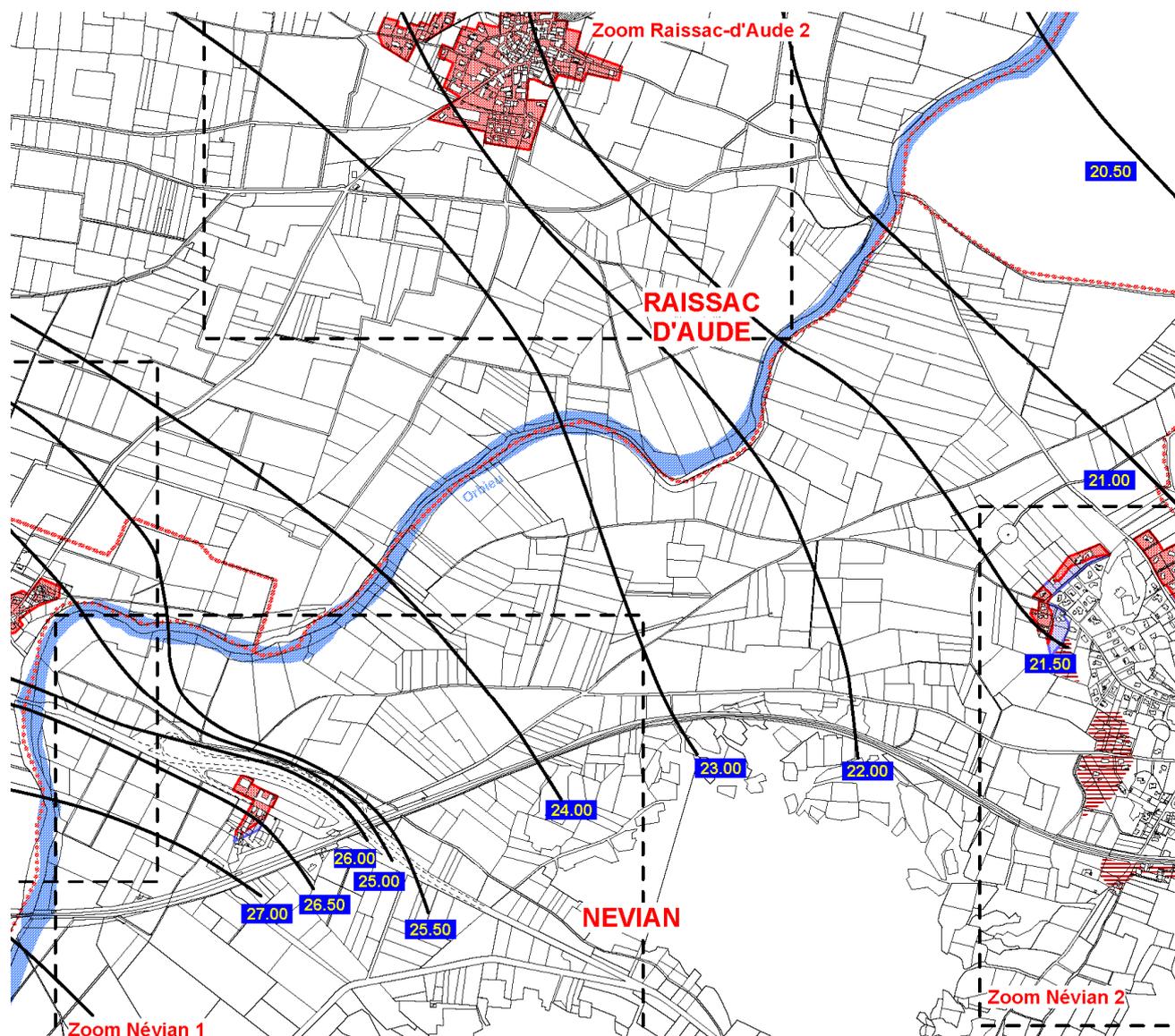


Figure 3 - exemple de carte d'inondation fournie dans le PPRi de 2004

Malheureusement, le secteur a fait l'objet d'une révision en 2010. Le même bureau d'études a livré en 2010 sur le secteur de Villedaigne des cartes d'inondation différentes de l'origine (Figure 4 ci-après).

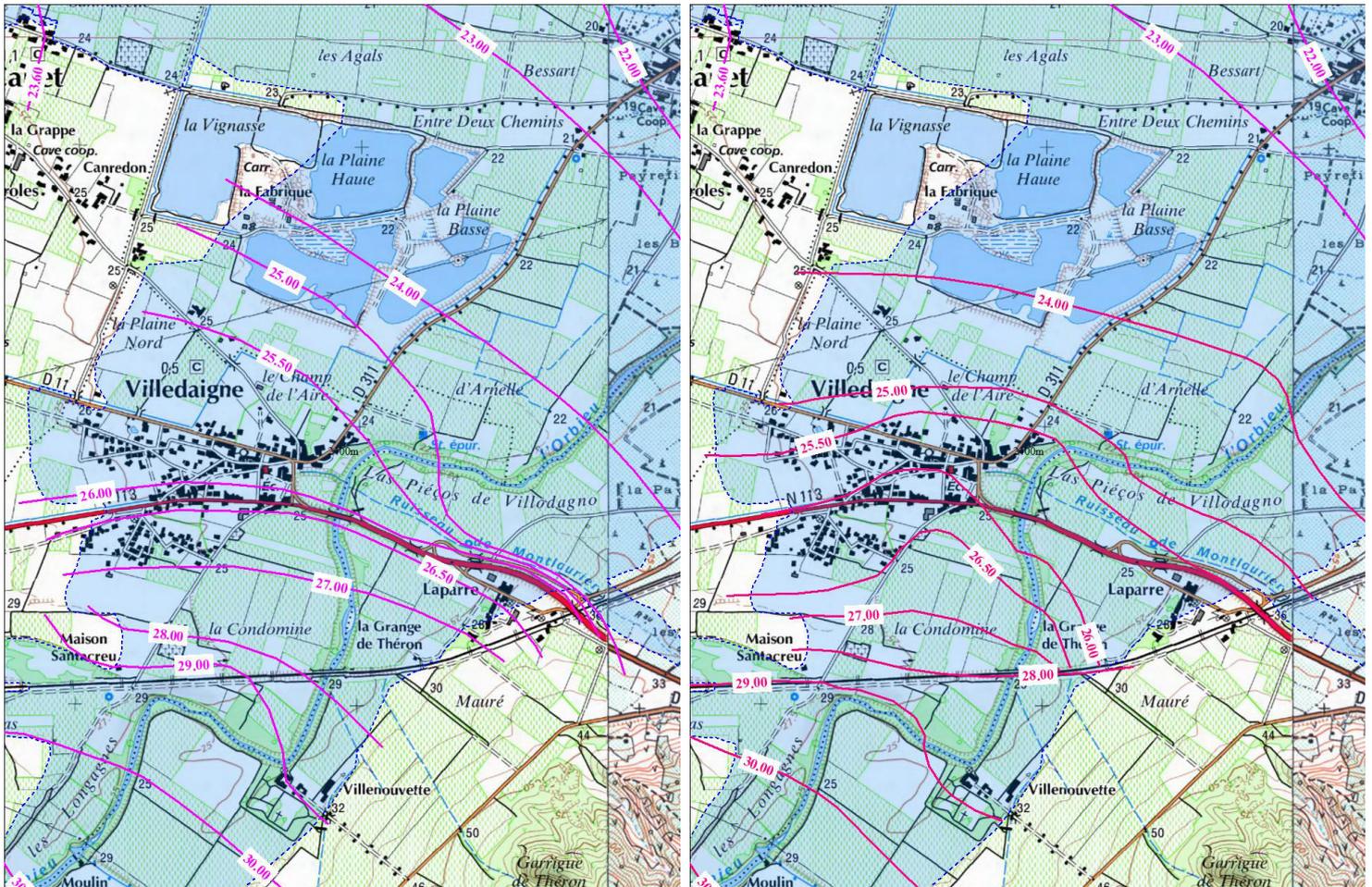


Figure 4 - carte d'inondation et d'iso-hauteurs de 2004 (PPRI de l'Orbieu) et 2010 (révision- PPRI de Villedaigne), échelle 1/25000^{ème}

Aujourd'hui, suite à la révision du PPRI de Villedaigne, la carte qui s'impose est celle de 2010 (à droite sur la Figure 4).

Grâce à ces cartes, nous connaissons, théoriquement, en chaque point la cote de l'eau. Nous connaissons aussi, théoriquement, la direction prise par l'eau : selon la ligne de plus grande pente, perpendiculairement aux lignes d'iso-cote. Cela confirme notre analyse topographique (cf. §1.2.1.e) selon laquelle les gravières sont dans une zone traversée par les flux débordants de l'Orbieu, pas de l'Aude. Le débit à prendre en compte globalement est bien celui de l'Orbieu.

En revanche, nous ne connaissons pas le débit passant dans chaque section des courbes d'iso-hauteur. Nous ne connaissons que le débit passant sur l'ensemble. Sans ce débit, nous ne pouvons pas connaître la vitesse de l'écoulement, et donc pas répondre aux questions posées.

b. Point de vue critique

La **modélisation filaire** sur le secteur (étude TRI) ne peut être considérée autrement que comme une première approche simplifiée à l'extrême des zones inondables. Il n'y a aucune logique se rapprochant de la

réalité de la répartition spatiale des écoulements dans ce type d'approche : de l'Aude à l'Orbieu, sur une plaine de 4 km de large, l'hypothèse d'une répartition uniforme de hauteurs d'eau sur un profil en travers conduit à de fortes erreurs. Comme il est indiqué dans le rapport de présentation, « *la modélisation en modèle 1D permanent au niveau de la jonction Aude-Orbieu ne reprend pas la complexité des écoulements des deux cours d'eau mais permet d'estimer les emprises de zones inondables* ». On peut ajouter que cette estimation est grossière, destinée à être représentée à grande échelle (type : le 25000^{ème} au mieux) et ne peut en aucun cas être zoomée à petite échelle (type : la rue, le lotissement...).

La modélisation « à casiers » est pertinente sur une plaine à très faible pente comme celle de l'Aude (0.1 à 0.2 %). Cependant, ce type de modèle est très long à construire : tracé et définition des paramètres hydrauliques de chaque casier, de chaque liaison entre casiers et entre casiers et lit mineur. Une plaine fragmentée comme celle de l'Aude, avec ses routes et chemins sur talus, oblige à faire un très grand nombre de casiers, ou à simplifier.

Une bonne définition des casiers et de leurs liaisons permet de voir la succession du remplissage des casiers au cours de la crue, la succession des événements, les casiers se remplissant de proche en proche depuis les débordements en lit mineur.

Dans le secteur des gravières d'extraction, la zone inondable fournie au PPRI n'est pas cohérente : on trouve en effet une limite de zone inondable traversant une gravière (Figure 5 ci-après)

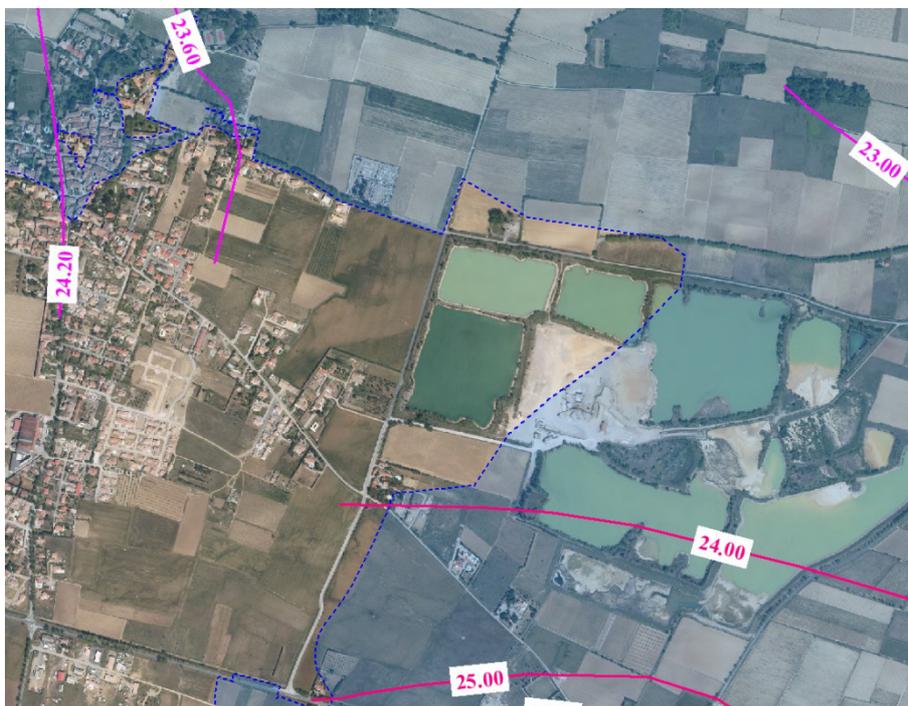


Figure 5 - la zone inondable (aléa dit "indifférencié") du PPRI de 2004, dans le secteur des gravières

Enfin, nous avons utilisé les dernières données topographiques (MNT à 1 m de côté et bathymétrie des bassins) pour retrouver les hauteurs d'inondation (Figure 6).

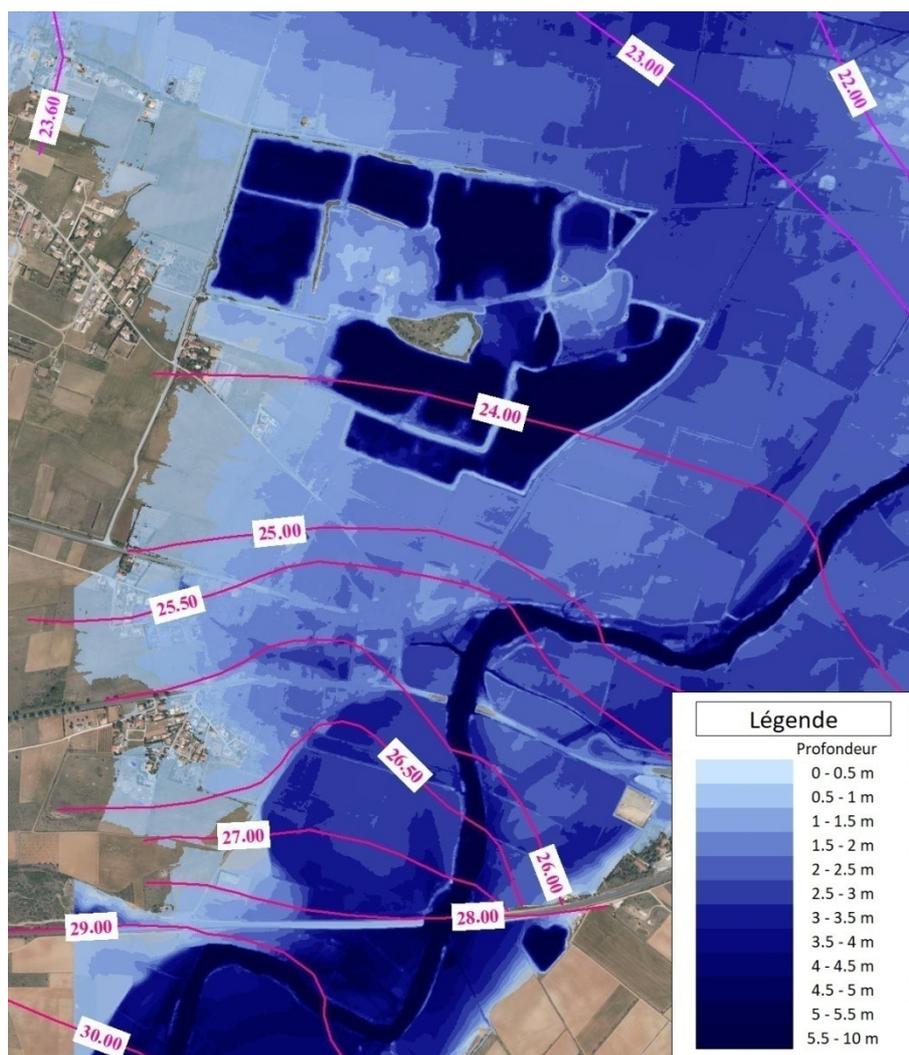


Figure 6 - application de la carte des cotes d'inondation sur le MNT⁸ - détail au niveau des gravières - échelle 1/20000^{ème}. Les hauteurs d'eau sont déduites des lignes d'iso-hauteurs.

— : Lignes d'iso-hauteur d'après cartes du PPRi
 - - - : Limite de la zone d'inondation d'après les cartes PPRi

Le résultat n'est pas très cohérent dans le secteur des gravières, une étendue de l'inondation déduite des lignes d'iso-hauteurs va au-delà des limites de la zone d'inondation (bassins situés à l'ouest).

En somme la modélisation et la cartographie ne sont pas parfaites. Dans ces conditions la répartition des écoulements ne peut être estimée qu'avec une importante marge d'erreur.

⁸ Ce MNT comprend la prise en compte de la bathymétrie des gravières, cf. §2.1.

2. Nouveaux calculs

2.1. Intégration des levés bathymétriques

Les levés bathymétriques de 2010 sur les gravières ont été intégrés au MNT du TRI de la plaine de l'Aude. 12 bassins sont pris en compte. Leur profondeur par rapport au MNT du TRI est de 0 à 3.5 mètres.



Figure 7 - bathymétrie des gravières : représentation du MNT du TRI (gauche) ; avec intégration des levés bathymétriques (droite) et indication des profondeurs moyennes des gravières

Ce MNT global, avec intégration des profondeurs, est utilisé par la suite.

2.2. Profondeur et marnage

Nous disposons des MNT suivants :

1. MNT du TRI (acquis auprès de l'IGN) : la cote dans les bassins y est celle du fil d'eau en période sèche
2. MNT global, prenant en compte la bathymétrie des bassins (cf. paragraphe 2.1)
3. MNT de plus hautes eaux, obtenu à partir des lignes de plus hautes eaux, issues de l'étude SOGREA et fournies par la DDTM de l'Aude.

Nous pouvons à partir de cela calculer :

- La profondeur des bassins en période sèche (valeur indicative, cette profondeur étant par nature fluctuante)
- La profondeur des bassins en crue centennale
- Le marnage entre période sèche et crue centennale

Ces données ont été livrées sous forme de fichiers informatiques.

Ci-après en exemple des résultats sur les profondeurs en basses eaux et plus hautes eaux.

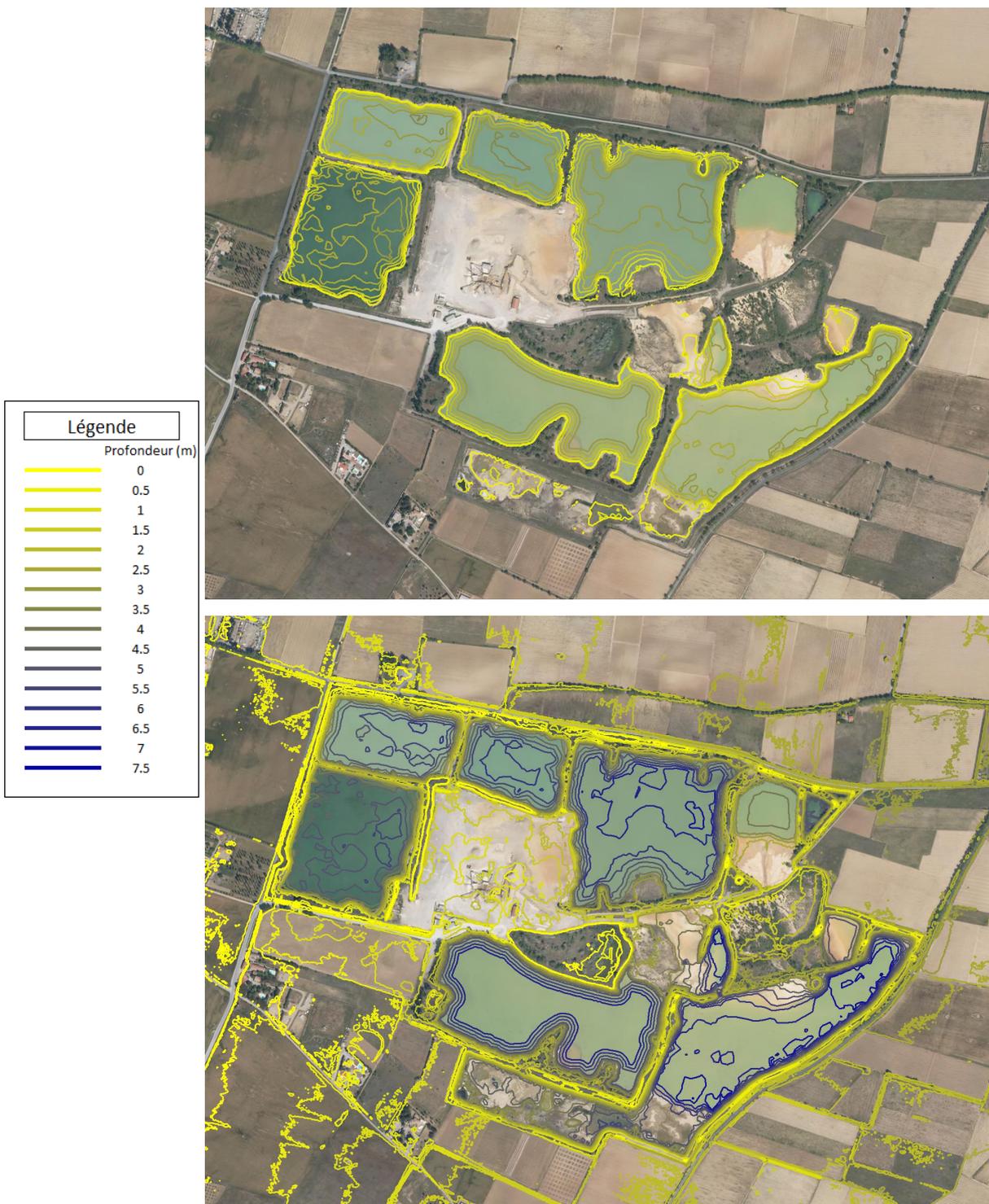


Figure 8 - profondeurs en basses eaux (en haut), et en plus hautes eaux (en bas) - échelle 1/12500^{ème}

Les profondeurs moyennes des bassins sont de l'ordre de 2.5 m en basses eaux. Elles atteignent 6.5 m en hautes eaux. Le marnage est de l'ordre de 4 mètres.

2.3. Calcul de vitesse

2.3.1. Méthode

Le nouveau calcul de vitesse est basé sur l'exploitation des résultats des études PPRi.

Le calcul se base sur les données disponibles du PPRi et consiste à partager l'écoulement en « tranches ». Une de ces tranches concerne la partie de l'écoulement traversant les gravières de Raissac.

- Les cotes d'eau nous sont données par le PPRi - reprise des données d'iso-hauteurs.
- La profondeur de l'écoulement nous est donnée par application de ces cotes d'eau sur le MNT du TRI au pas de 1 mètre.
- Le débit de chaque « tranche » est estimé en fonction de la pente de la ligne d'eau et de la rugosité estimée du terrain, selon une formule de Manning-Strickler :

$$Q = K_s.S.Rh^{2/3}.i^{1/2}$$

La somme des débits de toutes les « tranches » doit donc être égale au débit de référence du PPRi sur l'Orbieu, soit 2550 m³/s.

On obtient une approximation du débit passant dans chaque tranche. On a alors la profondeur, la vitesse : tous les paramètres de l'écoulement sont disponibles à l'échelle globale de l'ensemble des bassins.

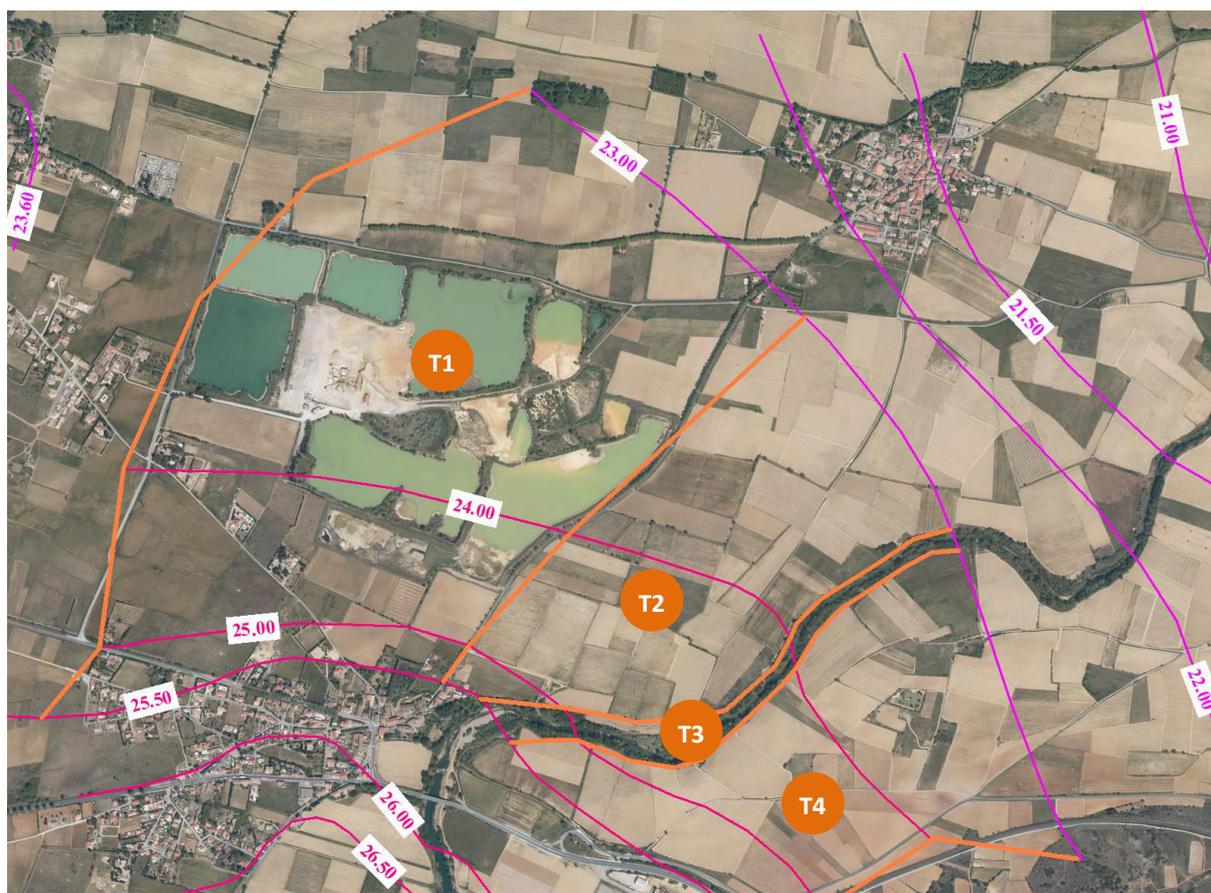


Figure 9 - Schéma de calcul. – échelle 1/20 000^{ème}
— : Lignes d'iso-hauteur d'après cartes du PPRi
— : Lignes de séparation des « tranches »

2.3.2. Mise en œuvre

Nous avons effectué le calcul sur :

- 3 lignes d'iso-cote d'inondation : les lignes 23 m, 24 m, et 25 mètres NGF⁹ (cf. Figure 9),
- 4 « tranches » horizontales :
 1. Lit majeur gauche, partie à l'ouest de la RD 311 Raissac-Villedaigne
 2. Lit majeur gauche, partie à l'est de la RD 311
 3. Lit mineur
 4. Lit majeur droite

❖ Calcul à l'iso-cote 25 m

Le calcul commence à l'amont, au niveau de l'iso-cote 25 m.

⁹ Nivellement Général de la France, référence altitudinale

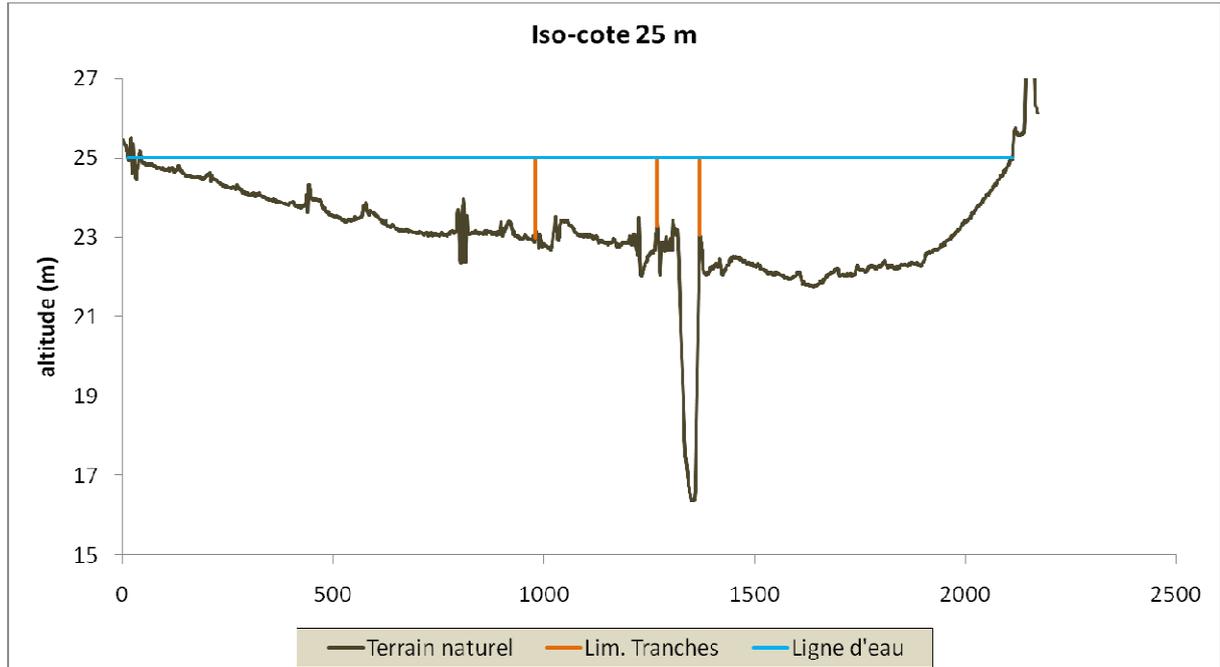


Figure 10 - représentation du profil en travers suivant l'iso-cote 25 m

La répartition des débits est obtenue en considérant, pour chaque tranche :

- La pente de la ligne d'eau
- La surface et le périmètre hydraulique, recalculés sur la base du modèle numérique de terrain avec 1 point par mètre.

Le paramètre de calage est le coefficient de rugosité de Manning-Strickler K_s . Nous avons considéré qu'il était deux fois plus fort (c'est-à-dire laissait passer proportionnellement deux fois plus de débit) en lit mineur qu'en lit majeur. Nous avons également considéré, par mesure de précaution, qu'il était deux fois plus fort en lit majeur rive gauche qu'en lit majeur rive droite. Cela revient à maximiser le débit passant par le lit majeur rive gauche.

La répartition des débits ainsi obtenue est présentée en Figure 11.

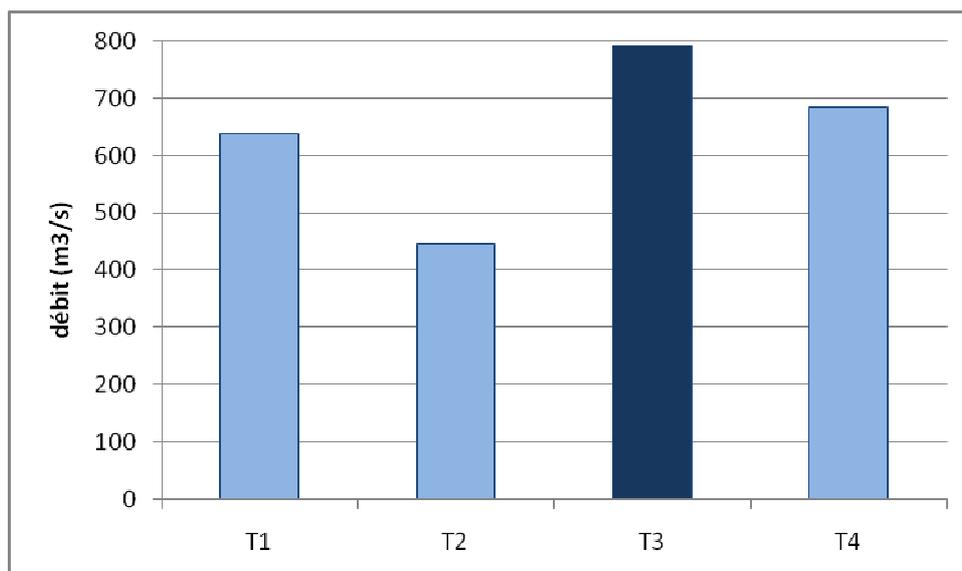


Figure 11 - répartition des débits à l'iso-cote 25 m

Tranche	T1	T2	T3	T4	Total
Calage K_s^{10}	8	8	15	4	
Débit (m^3/s)	637	445	791	684	2557
Surface (m^2)	1189	602	441	1801	4033
Vitesse (m/s)	0.54	0.74	1.79	0.38	0.63

Le schéma obtenu sur la Figure 11 paraît cohérent. Il majore les débits renvoyés vers le lit majeur rive gauche, par rapport au lit majeur rive droite, qui est plus bas topographiquement (cf. Figure 10).

❖ *Calcul à l'iso-cote 24 m*

On suppose que chaque « tranche », suivant la ligne de plus grande pente, conserve globalement le même débit que sur l'iso-cote 25 m. Le lit mineur (tranche T3) perd encore du débit dans le méandre entre les iso-hauteurs 25 et 24, au profit de la tranche T2.

¹⁰ Calage du coefficient de Manning-Strickler permettant d'obtenir un débit total de 2550 m^3/s à 1% près

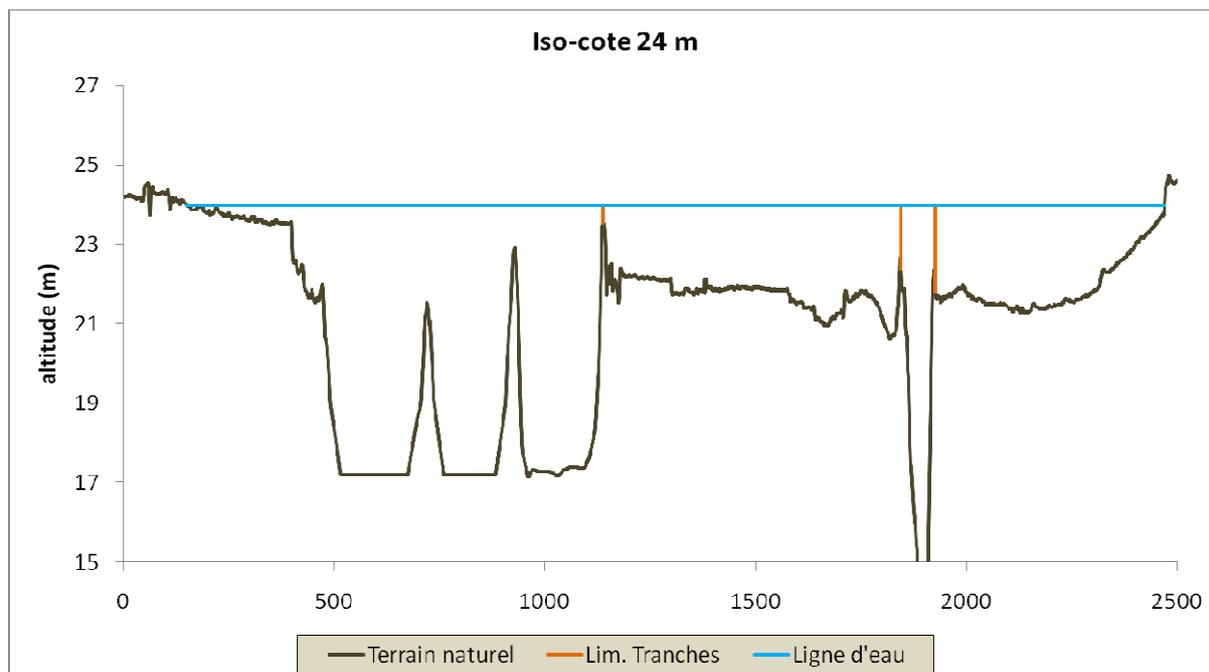


Figure 12 - représentation du profil en travers suivant l'iso-cote 24 m

Tranche	T1	T2	T3	T4	Total
Débit (m ³ /s)	638	526	713	677	2554
Surface (m ²)	4233	1590	507	1116	7446
Vitesse (m/s)	0.15	0.33	1.41	0.61	0.34

En revanche, sur ce profil passant par les bassins, la profondeur est beaucoup plus importante dans la tranche 1. La surface mouillée passe de (environ) 1200 m² à (environ) 4200 m². Le débit restant le même, la vitesse est réduite du même rapport.

La vitesse moyenne calculée sur la tranche 1 du profil 24 (correspondant aux bassins) est de 0.15 m/s.

2.3.3. Critique de la méthode et conclusion

- La méthode a consisté à interpréter les résultats d'une étude hydraulique dont les approximations sont nombreuses, au moyen d'un concept de modélisation de type « filaire », avec une analyse de la topographie du terrain. Rappelons que nous avons considéré l'Orbieu et sa plaine comme un ensemble, sans prendre en compte les digues et les échanges d'une « tranche » à l'autre. La juste répartition des débits dans ce type de configuration ne pouvait être précisément appréhendée que par une modélisation à deux dimensions. Cependant nous avons une répartition cohérente du débit centennal de l'Orbieu entre les 4 « tranches ».
- Nous n'avons pas non plus considéré la présence de merlons en amont des bassins, et entre les bassins. Dans la réalité, ces merlons orientent une partie du débit de la tranche 1 vers la tranche 2.

En considérant ces merlons comme transparents, nous avons donc surestimé le débit transitant par les bassins, donc la vitesse dans cet espace.

- La méthode nous donne une valeur indicative de la vitesse dans les bassins. Elle ne peut nous donner la vitesse *en chaque point de ces bassins*. Dans cette espace fermé à l'aval (par les talus et au-delà par les merlons), la vitesse d'écoulement est globalement *inversement proportionnelle à la profondeur*¹¹. En d'autres termes on peut s'attendre à une vitesse *inférieure à 0.15 m/s* dans les bassins, supérieure sur les abords. Le paragraphe qui suit indique le calcul réalisé pour estimer la valeur à prendre par majoration.

- L'iso-cote 24 m passe par des bassins profonds. Cela a donc tendance à augmenter la profondeur moyenne, donc à diminuer la vitesse moyenne. Pour tester la sensibilité de ce biais, nous avons fait deux calculs différents :
 - Première méthode : nous avons dessiné l'iso-cote 23.75 m, passant en grande partie entre les bassins (Figure 13). Le profil de cette iso-cote est présenté en Figure 14. Pour le calcul, nous n'avons pas pris en compte le lac le plus à l'ouest. Comme prévu, la vitesse moyenne obtenue sur ce profil pour la tranche 1 est légèrement supérieur : 0,2 m/s.
 - Deuxième méthode : nous n'avons pas pris en compte la bathymétrie des bassins dans le calcul des surfaces mouillées. En d'autres termes, nous avons calculé les surfaces mouillées sans prendre en compte les fonds de bassins à leur cote habituelle. Ce calcul a été répété pour les iso-cotes 24 m et 23.75 m. Le résultat est présenté en figures 14 et 15. Il montre que l'essentiel de la surface mouillée, quelque soit le profil considéré, repose dans le marnage entre temps sec et crue centennale, ce marnage étant de l'ordre de 4 mètres. Les vitesses obtenues par ce calcul sont de 0.24 m/s pour l'iso-cote 24 m comme pour l'iso-cote 23.75 m.

¹¹ De la même manière que dans une rivière, l'eau court dans les radiers et se tranquillise dans les mouilles.

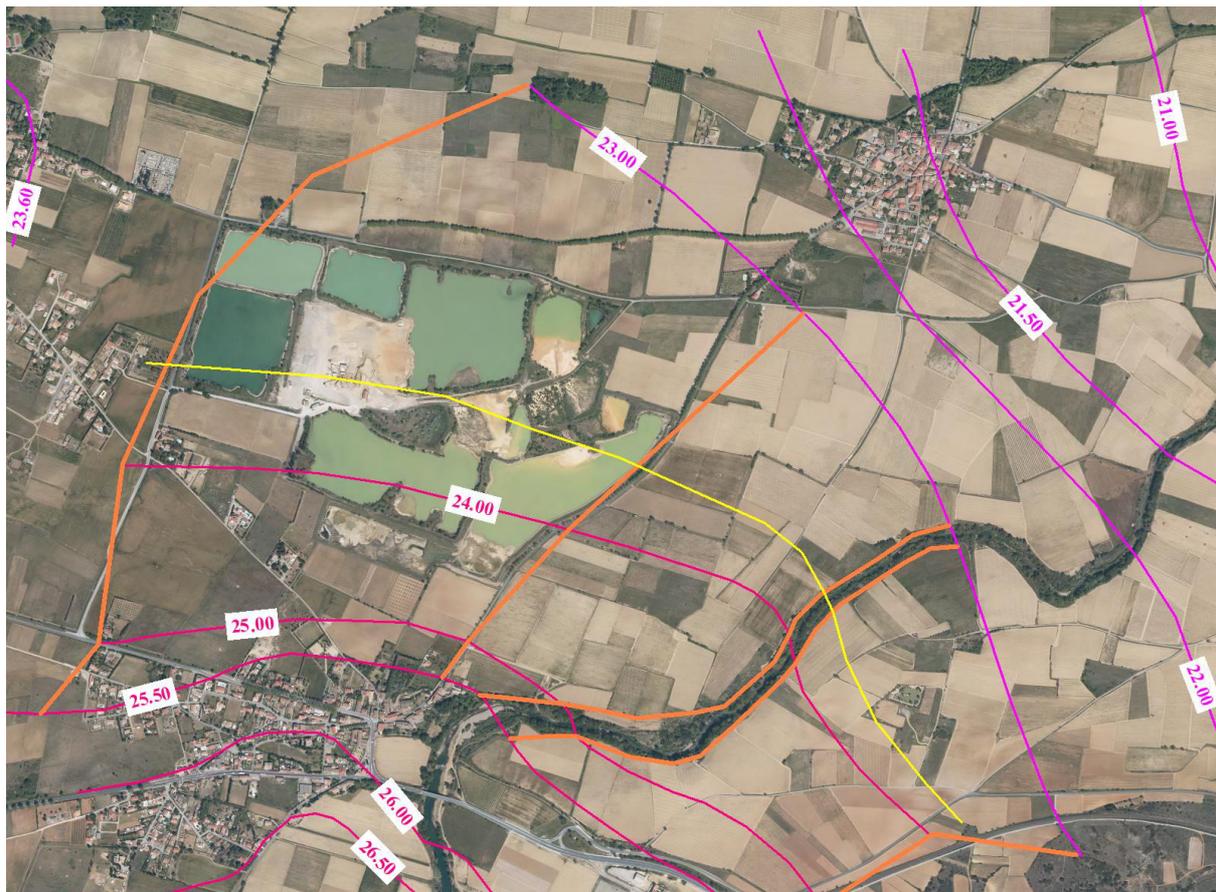


Figure 13 - Position de l'iso-cote 23.75 (en jaune) - échelle 1/20 000^{ème}

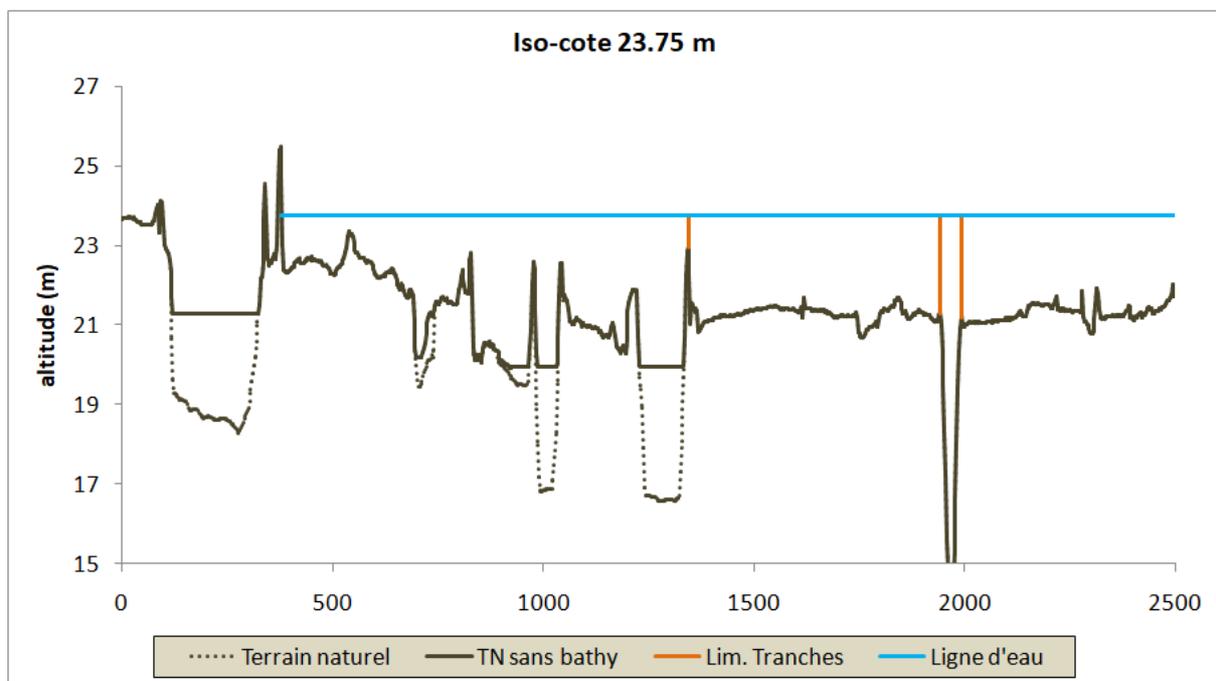


Figure 14 - représentation du profil en travers suivant l'iso-cote 23.75 m, avec et sans bathymétrie

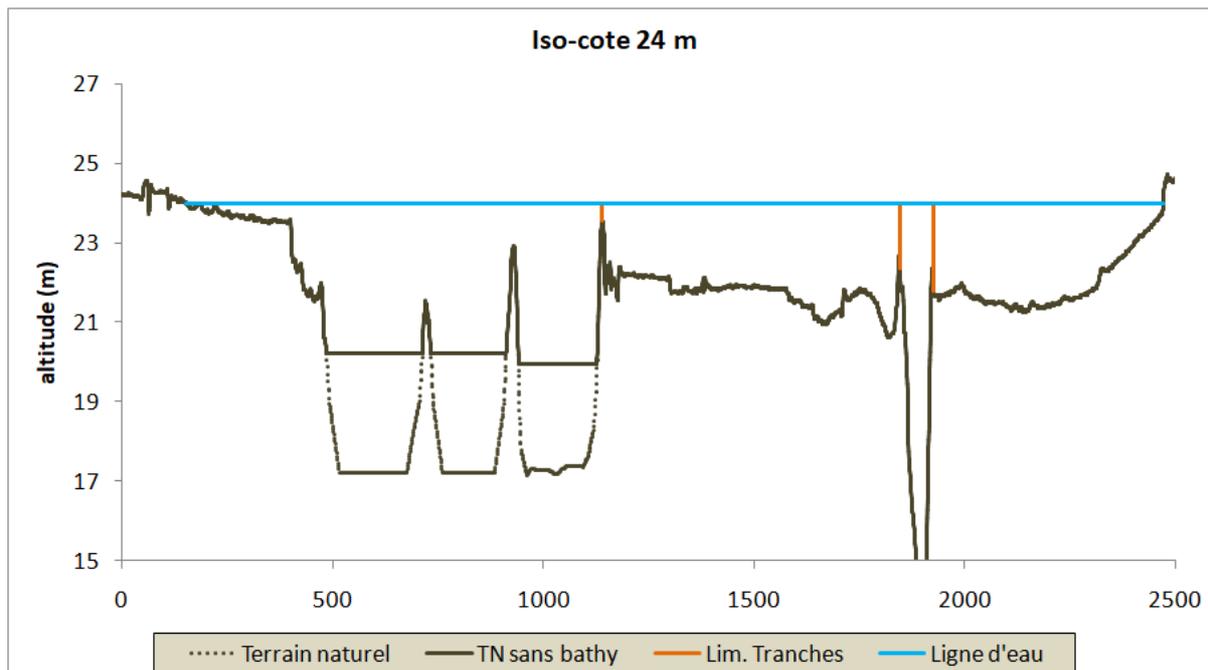


Figure 15 - représentation du profil en travers suivant l'iso-cote 24.00 m, avec et sans bathymétrie

En conclusion, même en cas de crue centennale, la vitesse de l'écoulement est toujours faible dans les bassins, même si les hypothèses prises majorent cette vitesse :

- Les merlons à l'amont des bassins sont considérés comme transparents aux débordements de l'Orbieu,
- La capacité d'écoulement de la rive droite de l'Orbieu a été artificiellement réduite pour augmenter parallèlement celle de la rive gauche,

Le calcul de vitesse a été réalisé sur deux profils, l'un passant par le fond des bassins, l'autre passant entre les bassins, et en considérant, ou en ne considérant pas, les données de bathymétrie

Dans tous les cas la vitesse est voisine de 0.2 m/s.

Les calculs sans les données bathymétriques donnent des les valeurs les plus fortes : 0.24 m/s. Elles sont données ici à titre indicatif, mais il n'y a pas de raison de les retenir.

Pour la vitesse d'écoulement dans les bassins, on retiendra la valeur maximale, obtenue sur le profil de faible profondeur (iso-cote 23.75 m), en prenant en compte la bathymétrie soit une valeur de 0.2 m/s.

3. La question des embâcles

Deux questions se posent :

- Quelle est la probabilité qu'en cas de crues majeure (centennale) de l'Orbieu des débris flottants viennent s'accumuler dans les bassins au point de perturber les installations ?
- En cas d'embâcle, comment prendre en compte les accumulations de bois mort contre les radeaux pour dimensionner les systèmes d'ancrage ?

3.1. Le risque d'embâcle

3.1.1. Retour d'expérience sur la crue de 1999

M. Bousquet, maire de Raissac d'Aude, a répondu à nos questions concernant les événements de novembre 1999, plus forte crue connue à ce jour :

- La crue sur Raissac est la plus forte connue à ce jour. L'eau est montée à 1,5 m dans le village, soit 50 cm au-dessus de la 2^{ème} plus forte crue connue, celle de 1940
- lors de la crue, la voie ferrée a rompu à Villedaigne, ce qui a causé le plus de dégâts (montée rapide des eaux, alors que d'habitude la montée est lente)
- depuis le village de Raissac, il y a eu trois « vagues »:
 1. montée de l'Orbieu
 2. rupture du talus de la voie ferrée (montée rapide)
 3. montée de l'Aude
- deux décès sur la commune, dont un automobiliste emporté vraisemblablement à Villedaigne, retrouvé dans les vignes sur la commune de Raissac, 500 mètres plus loin
- les gravières existaient déjà lors de cette crue. Le merlon le long de la route Villedaigne-Raissac a rompu, remplissant les bassins les plus à l'est. Les bassins les plus à l'ouest, côté Canet, n'ont pas été remplis.
- Les vitesses et les gros embâcles passaient le long de l'Orbieu, pas dans la plaine
- Dans le village, on a vu passer des flottants plus légers, tels que des containers de poubelles

3.1.2. Analyse des risques

Nous avons choisi une approche de type « arbre de risques » consistant à décomposer chaque événement de l'enchaînement de circonstances conduisant à la constitution d'un embâcle au niveau des radeaux flottants, puis à sa rupture.

Pour qu'il y ait embâcle sur les installations, il faut que ces embâcles soient « produits » par l'écoulement à l'amont de ces installations, et qu'ils soient transportés jusqu'aux bassins.

Le schéma ci-après (Figure 16) présente, selon une approche « à dire d'expert » des événements et de leur probabilité : s'il est évident qu'une crue majeure fournira à l'Orbieu une grande quantité de bois mort et donc potentiellement un risque supplémentaire au niveau des ponts enjambant la rivière, la probabilité que des débris flottants atteignent les bassins de la centrale photovoltaïque est faible :

En affectant comme il est d'usage¹² une probabilité de 80% aux événements « très probables », de 40% aux événements « probables », de 20% aux événements « moyennement probables », de 10% aux événements « peu probables » et de 1% aux événements « très peu probables », on obtient selon cet arbre d'événements une probabilité que des embâcles flottants atteigne les bassins de 4%, soit une probabilité faible. L'enchaînement, lors d'une crue majeure de l'Orbieu conduisant à une accumulation d'embâcles sur les bassins, est au final un événement **peu probable**.

¹² Voir par exemple : Peyras L., Royet P., Salmi A., Salembier M., Boissier D. 2006. *Etude de la sûreté de fonctionnement d'un aménagement hydraulique de génie civil : application à des ouvrages de protection contre les inondations de la ville de Nîmes*. In Revue Européenne de Génie Civil, Vol. 10, juin 2006

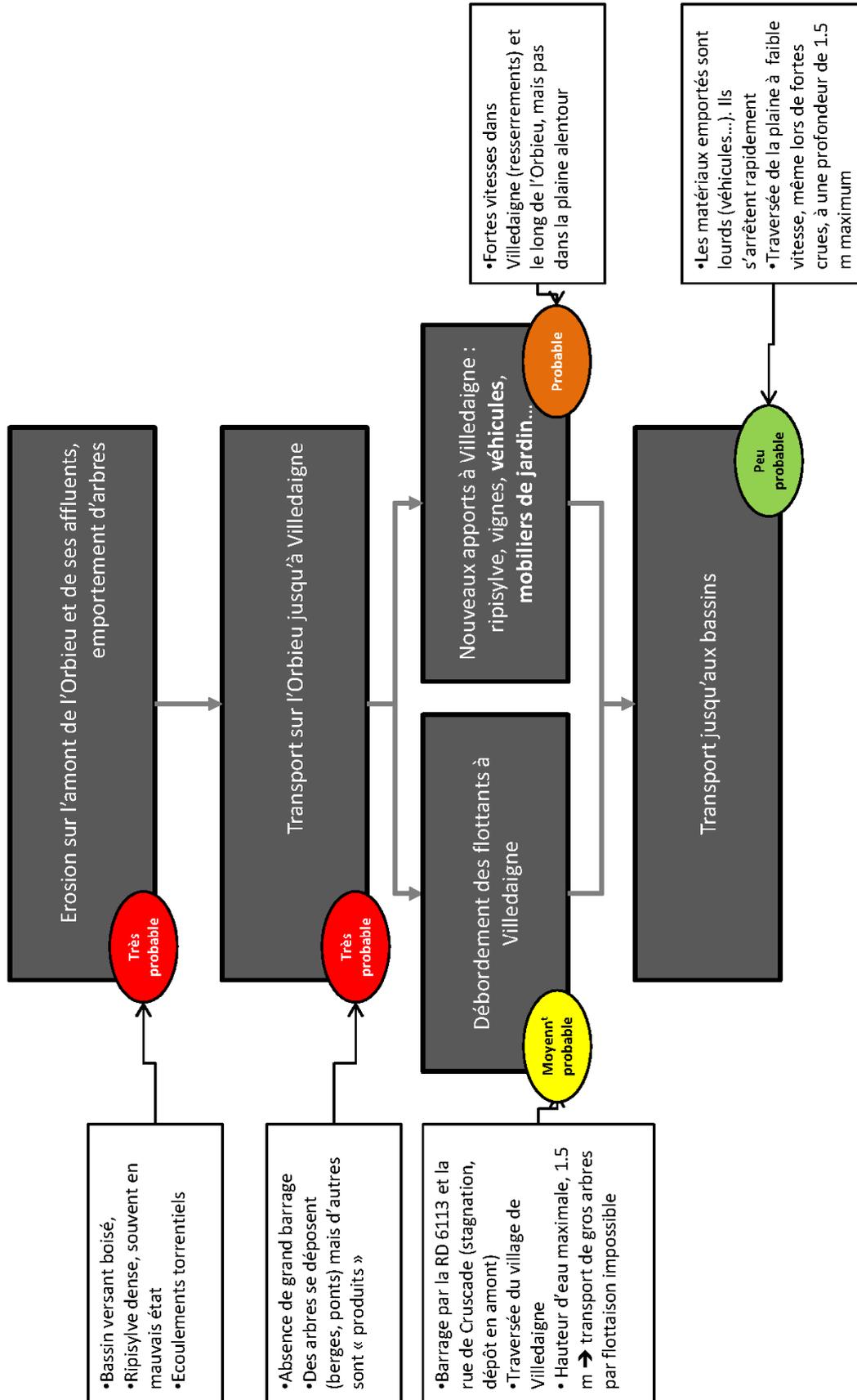


Figure 16 - Schéma des événements

3.2. Prise en compte des embâcles

On ne peut prévoir ni le nombre ni la taille des objets flottants susceptibles de percuter les panneaux. L'analyse du risque a montré que l'arrivée de flottants en grand nombre dans les bassins était un événement peu probable, même en cas de crue centennale.

De fait, il ne paraît pas utile de surdimensionner exagérément les ancrages : on prendra simplement un coefficient de sécurité supplémentaire d'un facteur de 2 sur les efforts dus aux courants par rapport à la situation sans flottants. Cette sécurité correspond à un doublement de la prise à l'eau des structures flottantes.

4. Avis du bureau d'étude sur le risque lié aux merlons des bassins

La présence de digues doit toujours être analysée au regard du supplément de risques que ces digues représentent. La rupture de la voie ferrée à Villedaigne en est un exemple. On peut trouver d'autres exemples plus récents, où des zones inondables ont été plus durement touchées du fait de la rupture de digues qu'elles ne l'auraient été si celles-ci n'avaient pas existé : la Faute sur mer (Vendée, en 2010) ou Aramon (Gard, en 2002). En cause : la vitesse de montée des eaux, l'effet de vague.

A Raissac, **indépendamment de la présence ou non d'une centrale photovoltaïque**, les merlons autour des bassins créent ce supplément de risque : on peut imaginer un scénario où un bassin se remplirait par l'amont (par submersion ou par rupture du merlon), ce qui amènerait son niveau d'eau bien au-dessus du niveau de la digue aval, et donc un risque plus important pour les terrains et les populations à l'aval.

La Figure 17 ci-après montre ce que pourrait être la ligne d'eau dans un tel cas (profil réalisé sur la base du MNT, ligne d'eau tracée sans aucun calcul). Dans le cas présenté en Figure 17, le merlon aval est sur le point de rompre, déversant en peu de temps 260 000 m³ d'eau supplémentaires sur la plaine de Raissac.

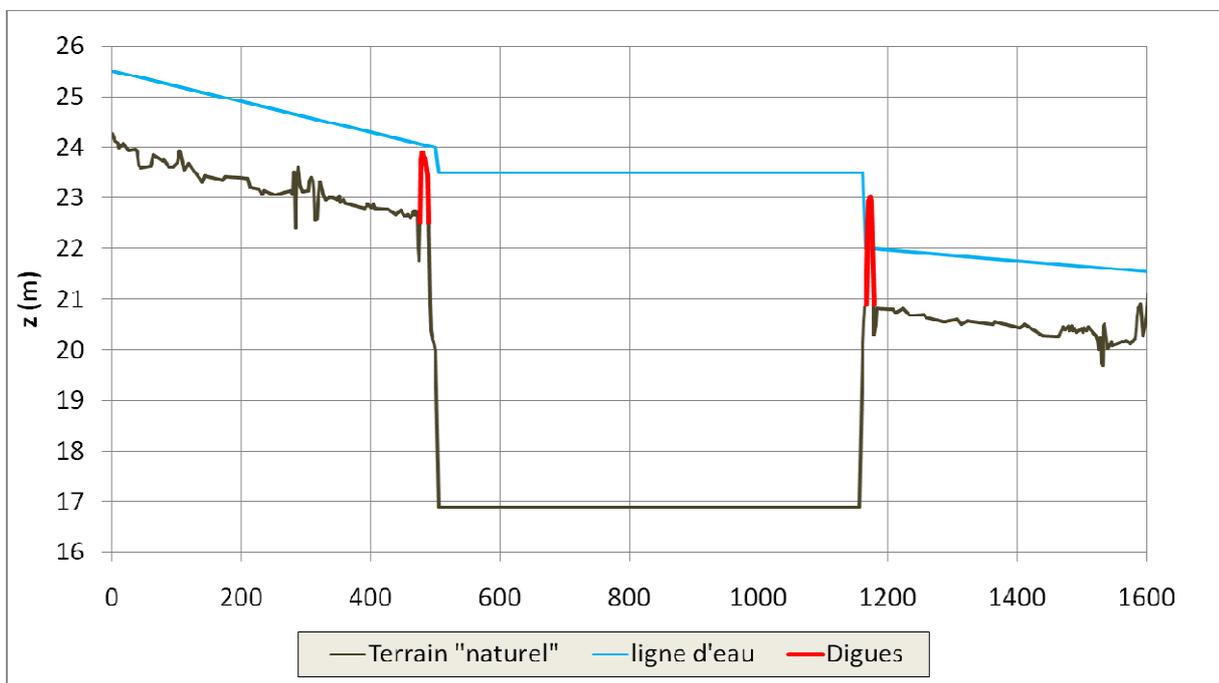
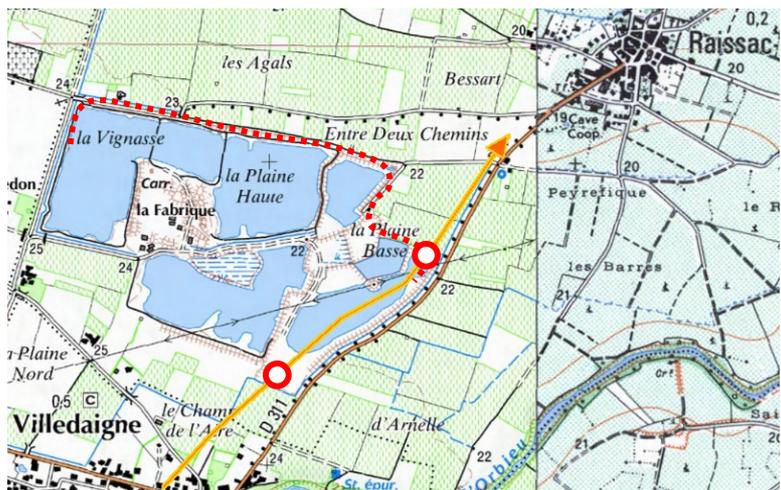


Figure 17 - profil le long d'une ligne Villedaigne - Raissac (en orange sur la carte au 1/25000^{ème}), passant par le bassin le plus à l'est (les cercles rouges sur la vue en plan correspondent aux points rouges sur le profil en long)

Pour éliminer ce risque, des brèches pourraient être réalisées dans tous les merlons aval des bassins (façades nord et est, en pointillés sur la Figure 17).

5. Conclusion

L'analyse hydraulique (chapitre 2) a montré que la vitesse maximale d'écoulement dans les bassins était de l'ordre de 0.2 m/s.

L'analyse du risque d'embâcle (chapitre 3) a montré que ce risque était limité, et qu'il n'y avait pas lieu de surdimensionner exagérément les ancrages pour ce risque, un coefficient de sécurité de 2 étant considéré comme suffisant.

La vitesse d'écoulement à prendre en compte dans les bassins pour le dimensionnement des ancrages est donc de $0.2 \times 2 = 0.4$ m/s.

Les valeurs « types » à prendre en compte pour la longueur des ancrages sont :

- Profondeur : 2.5 m
- Marnage Basses Eaux / Plus Hautes Eaux : 4 m

Ces valeurs sont à vérifier pour le dimensionnement définitif des ancrages, sur les cartographies fournies des cotes de fond, de basses eaux et de plus hautes eaux.

ANNEXE : données fournies

Les données cartographiques sont fournies sur un rectangle de 1600 x 1200 m englobant des bassins.

- **Couches MNT (au format .ASC, mailles de 1 m x 1 m)**
 - MNT altitude
 - GRD_RGE, le MNT de base du TRI (les altitudes dans les gravières sont celles du fil d'eau le jour du levé)
 - GRD_RGE+BATHY, le MNT intégrant la bathymétrie (les altitudes dans les gravières sont celles du fond)
 - GRD_PHE, les cotes de Plus Hautes Eaux selon les isocotes de SOGREAH (transmises par la DDTM11)
 - MNT Profondeur
 - GRD_PROFONDEUR_INI, la profondeur en basses eaux (<0)
 - GRD_PROFONDEUR_PHE, la profondeur en Plus Hautes Eaux (<0)
 - GRD_MARNAGE, le marnage entre basses eaux et PHE (>0)
- **Couches vectorielles (format .shp, type ArcGIS ou QGIS)**
 - Courbes de niveau (écart, 50 cm) :
 - Courbes de niveau altitude
 - CN_TN, le terrain naturel (dans les gravières, le fond)
 - CN_PHE, les plus hautes eaux
 - Courbes de niveau profondeur
 - CN_Profondeur_INI, la profondeur en basses eaux (<0)
 - CN_Profondeur_PHE, la profondeur en PHE (<0)
 - CN_Marnage, le marnage entre BE et PHE (>0)
 - BASSINS : le tracé des bassins avec les caractéristiques de cotes et de profondeur moyenne, minimum, maximum



www.dynamiquehydro.fr

Lyon
(siège social)
16 rue Masaryk
69009 Lyon
04.78.83.68.89

Annecy
614 impasse du Conis
74410 Saint-Jorioz
09.83.00.66.03

