



Entente interdépartementale pour la protection contre les inondations de l'Oise, de l'Aisne, de l'Aire et de leurs affluents

Projet d'aménagement d'aires d'écrêtement des crues sur les sites de Saint Michel et de Watigny (02)

Etude de danger de l'aire de
surstockage de Saint Michel

Rapport provisoire

STUCKY

ZAC Valdegour
180, rue Guy Arnaud
30900 Nîmes
Tél. : 04 66 04 05 70
Fax : 04 66 04 05 69
E-mail : stucky@stucky.fr

Avril 2009

Partenaires financiers :



Sommaire

<u>1. Préambule</u>	<u>1</u>
1.1. Contexte des réflexions	1
1.2. Méthodologie.....	2
1.3. Zone d'étude.....	2
1.4. Contenu du présent rapport	2
<u>2. Résumé non technique de l'étude de danger</u>	<u>3</u>
<u>3. Renseignements administratifs</u>	<u>5</u>
<u>4. Objet de l'étude</u>	<u>6</u>
<u>5. Analyse fonctionnelle de l'ouvrage et de son environnement</u>	<u>7</u>
5.1. Description de l'ouvrage	7
5.1.1. Caractéristiques générales de la digue.....	7
5.1.2. Corps de digue	8
5.1.3. Pertuis de fond	9
5.1.4. L'évacuateur de crue	9
5.2. Description de l'environnement de l'ouvrage.....	10
5.2.1. Description topographique.....	10
5.2.2. Les accès à l'ouvrage.....	11
5.2.3. Les enjeux.....	11
<u>6. Présentation de la politique de prévention des accidents majeurs et du système de gestion de la sécurité (SGS)</u>	<u>13</u>
6.1. Acteurs du plan de gestion et principales missions.....	13
6.2. Organisation générale de la gestion de l'ouvrage	14
6.3. Surveillance du site.....	15
6.3.1. Surveillance mensuelle	15
6.3.2. Surveillance renforcée	15
6.4. Information des populations	16
6.4.1. Alerte des populations	17
6.4.2. Mesures à prendre par la population.....	17
6.5. Alerte	18
6.5.1. Définition.....	18

6.5.2. Déclenchement de l'alerte	18
6.6. Évacuation	18
6.6.1. Organisation de l'évacuation.....	19
<u>7. Identification et caractérisation des potentiels de dangers</u>	<u>21</u>
7.1. Vandalisme	22
7.2. Erreur humaine	23
7.3. Dysfonctionnement des organes électromécaniques	23
7.3.1. Blocage des vannes.....	23
7.3.2. Détérioration du tablier des vannes	24
7.4. Dysfonctionnement des organes de commande.....	24
7.4.1. Défaillance de l'automate de commande.....	24
7.4.2. Défaillance des systèmes de mesure.....	24
7.4.3. Défaillance de l'alimentation électrique.....	25
7.5. Obstruction du pertuis	25
7.6. Détérioration du corps de digue	25
<u>8. Caractérisation des aléas naturels</u>	<u>28</u>
8.1. Crue supérieure à la crue de projet (vannes fonctionnelles)	28
8.1.1. Hydrologie du site.....	28
8.1.2. Caractérisation de l'aléa crue	30
8.2. Séisme	31
8.2.1. Sismologie du site.....	31
8.2.2. Caractérisation de l'aléa séisme	32
<u>9. Etude accidentologique et retour d'expérience</u>	<u>33</u>
<u>10. Identification et caractérisation des risques</u>	<u>34</u>
10.1. Méthodologie.....	34
10.1.1. Démarche globale	34
10.1.2. Principes généraux de la méthode APR.....	34
10.1.3. Moyens mis en œuvre	34
10.2. Détermination des scénarios de défaillance	35
10.3. Sélection des scénarios d'accidents majeurs	40
10.4. Etude de propagation d'une onde de submersion.....	42
10.4.1. Calcul de l'hydrogramme de rupture au barrage de Saint Michel	42
10.4.2. Propagation de l'onde de rupture.....	47
10.4.3. Conclusions.....	52

11. Etude de réduction des risques **53**

Liste des tableaux

Tableau 5-1 : Caractéristiques générales de la digue de Saint Michel	7
Tableau 5-2 : Courbe hauteur – volume – surface de la cuvette de Saint Michel	8
Tableau 8-1 : Site de Saint Michel – Débits de pointe de crue (QIXA) de différentes fréquences	28
Tableau 10-1 : Analyse des scénarios de défaillance.....	36
Tableau 10-2 : Critères de gravité en fonction des catégories.....	39
Tableau 10-3 : Echelle d’appréciation de la gravité des conséquences humaines d’un accident à l’extérieur du site.....	40
Tableau 10-4 : Matrice de probabilité/ gravité/ criticité des risques sur le site de Saint Michel.....	41
Tableau 10-5 : Caractéristiques des matériaux de la digue pour le calcul de l’érosion interne par renard.....	43
Tableau 10-6 : Largeurs de brèche, temps de rupture et débits de pointe de l’onde de rupture par les formules de Froehlich et Fread.....	46
Tableau 10-7 : Comparaison des débits de pointe de rupture du barrage de Saint Michel calculés par les différentes méthodes.....	46
Tableau 10-8 : Temps d’arrivée de l’onde après la rupture du barrage de Saint- Michel	50
Tableau 11-1 : Mesures actuelles intégrées au projet de digue de Saint Michel pour réduire le risque lié à une rupture de digue	53

Liste des figures

Figure 8-1 : Hydrogrammes de crue au barrage de Saint Michel	29
Figure 10-1 : Hydrogramme de rupture au barrage de Saint Michel calculé par RUPRO	44
Figure 10-2 : Zonage de la rugosité utilisée pour la modélisation de l'onde de rupture au barrage	48

1. Préambule

1.1. Contexte des réflexions

Le projet d'aménagement d'aires de ralentissement des fortes crues sur les sites de Saint-Michel et de Watigny s'inscrit dans un large programme de protection contre les inondations à l'échelle des bassins de l'Oise, de l'Aisne et de leurs affluents, mis en place sous l'égide de l'Entente Oise-Aisne au lendemain des crues dévastatrices de 1993 et 1995.

L'identification des sites et leur intégration au programme global des aménagements qui présentent un potentiel significatif pour l'écrêtement des crues sur le bassin de l'Oise découle essentiellement de deux études préalables :

- Une première étude générale sur l'ensemble du bassin de l'Oise (ISL 2001) a abouti notamment à la sélection de trois sites pilotes pour l'implantation d'aires de ralentissement des crues dont un est en cours de réalisation à Longueil-Sainte-Marie et un deuxième sur le point d'être réalisé à Proisy ;
- De manière plus approfondie régionalement, l'Entente Oise-Aisne a engagé une étude ciblée sur le bassin de l'Oise à l'amont d'Etréaupont. *L'Etude de faisabilité d'aménagements hydrauliques dans les hautes vallées de l'Oise et de ses principaux affluents pour réduire le risque inondation* (STUCKY 2005) a permis de recenser les actions possibles pour la réduction des inondations à la fois au niveau local et au niveau du bassin versant. Les propositions d'aménagements globaux, dont l'Entente Oise-Aisne assure la maîtrise d'ouvrage, se sont orientées essentiellement vers des aires de ralentissement des crues en lit majeur qui sont bien adaptées à la géographie locale.

A l'issue de ces études, deux sites d'écrêtement des crues ont été retenus et une programmation pluriannuelle est établie permettant de traiter l'axe Gland-Oise avec notamment la réalisation des aires de Watigny et Saint-Michel, qui font l'objet du présent marché de maîtrise d'œuvre. Au-delà du seul intérêt local, l'ensemble de ces aménagements contribuera à réguler les crues sur le haut bassin de l'Oise.

1.2. Méthodologie

La mission de maîtrise d'œuvre des aménagements de Saint-Michel et Watigny s'articule en deux grandes étapes :

- La phase de conception des deux ouvrages comprenant les missions normalisées :
 - Avant Projet (AVP)
 - Projet (PRO)

- La phase de « réalisation des travaux » comprenant les missions :
 - Assistance aux Contrats de Travaux (A.C.T.) ;
 - Visa (VISA)
 - Direction de l'Exécution des Travaux (D.E.T.)
 - Assistance aux Opérations de Réceptions (A.O.R.)

1.3. Zone d'étude

Les sites de Watigny et Saint-Michel se situent à quelques kilomètres en amont de la commune de Saint-Michel dans le département de l'Aisne. Ces aires de stockage sont respectivement implantées sur le Gland affluent de l'Oise amont et le Petit Gland tributaire du précédent, dont les bassins versants sont de faible extension (< 100 km²).

1.4. Contenu du présent rapport

Ces barrages « secs » la majeure partie du temps ne se remplissent que lors de situations de fortes crues. Bien que leur volume de stockage soit relativement modeste, leur hauteur de digue comprise entre 7 m et 9 m et l'implantation des ouvrages à quelques kilomètres en amont des communes de Saint Michel et de Hirson justifient que ces ouvrages soient considérés comme intéressant la sécurité publique.

A ce titre et en préalable à l'établissement de documents de type PPI (Plan particulier d'intervention), le présent rapport consiste à caractériser et analyser les risques associés à l'ouvrage de Saint Michel.

2. Résumé non technique de l'étude de danger

Le site de Saint se situe à moins d'un kilomètre en amont du centre ville de Saint-Michel dans le département de l'Aisne.

Le projet d'aire de sur-stockage de Saint Michel contrôle un bassin versant de 72,8 km² et consiste en l'aménagement d'une digue en remblai collinaire au Petit Gland permettant de stocker un volume utile de l'ordre de 1 900 000 m³ pour une colonne d'eau de 8,2 m par rapport au terrain naturel.

L'étude de dangers expose les dangers que peut présenter l'aire de surstockage de Saint Michel, en présentant une description des accidents susceptibles d'intervenir que leur cause soit d'origine interne ou externe, et en décrivant la nature et l'extension des conséquences.

Pour le site de Saint Michel, les potentiels de danger considérés résultent de la libération de tout ou partie de l'eau de la retenue suite à une rupture partielle ou totale de la digue dont la cause peut être d'origine interne (mauvais état de la digue, dysfonctionnement de l'ouvrage) ou externe (aléas naturels, erreur humaine, vandalisme).

L'analyse détaillée du risque de rupture montre que celui-ci est très peu probable : les scénarios d'accidents majeurs les plus probables présentent des probabilités estimées inférieures à 5.10^{-6} . L'étude de propagation de l'onde de rupture du barrage de Saint Michel a été réalisée sur l'ensemble de la vallée du Gland et de l'Oise jusqu'à Neuve-Maison, en considérant un scénario de rupture par renard de la digue concomitant avec une crue décennale du Petit Gland (un des scénarios d'accidents majeurs le plus probable), qui conduit à un débit de pointe de 630 m³/s en aval immédiat de la retenue.

La propagation de l'hydrogramme de rupture dans la vallée met en évidence les phénomènes suivants :

- le phénomène est relativement rapide, la majorité du volume de la retenue s'écoule en moins de quatre heures au travers de la brèche, l'onde de rupture met moins d'une heure pour arriver à Saint Michel et trois heures pour arriver à Hirson ;
- l'onde de rupture est peu amortie jusqu'en aval de Saint Michel ;
- les contrôles hydrauliques successifs du remblai routier de la RD1050 et de la voie SNCF conduisent à des hauteurs d'eau élevées en amont ;
- la zone à risque en cas de rupture de digue du barrage de Saint Michel s'étend jusqu'en aval d'Hirson. Dans cette zone, le fond de la vallée est affecté par les inondations, avec des hauteurs de submersion maximales pouvant dépasser plusieurs mètres. Les enjeux les plus exposés sont :

- sur Saint Michel : le centre ville, l'abbaye et la rue en rive droite, l'usine de Sougland,
 - sur Hirson : la RD1050 submergée par 1 m de hauteur d'eau, le quartier des Taillis, le centre ville.
- en aval : les débordements sont généralisés mais le débit de pointe lié à la rupture est suffisamment écrêté pour s'apparenter à un phénomène de crue relativement fréquent type crue de 2003 (période de retour 15 ans).

Bien que les conséquences d'une rupture de digue soient très importantes sur les communes de Saint Michel et Hirson, la rareté du phénomène rend le risque de rupture maîtrisable sous condition de respecter strictement le protocole d'entretien de l'ouvrage (fréquence et degré de surveillance du dispositif d'auscultation, d'entretien et d'exploitation courante) et de former les organismes compétents des mesures à suivre en cas d'urgence.

3. Renseignements administratifs

Le propriétaire de l'ouvrage de Saint Michel est :

L'Entente interdépartementale pour la protection contre les inondations de l'Oise, de l'Aisne, de l'Aire et de leurs affluents

**11, Cours Guynemer
60200 COMPIEGNE**

Tel : 03 44 38 83 83/ Fax : 03 44 38 83 80

Courriel : entente-oise-aisne@wanadoo.fr

Le Maître d'œuvre des études de conception est :

STUCKY Ingénieurs-conseils SA

**180, rue Guy Arnaud
30900 Nîmes**

Tél. : 04 66 04 05 70 / Fax : 04 66 04 05 69

E-mail : stucky@stucky.fr

4. Objet de l'étude

La présente étude de danger concerne un ouvrage neuf en projet sur la commune de Saint Michel (02).

Le dossier a été établi en référence à l'arrêté du 12 juin 2008 définissant le plan de l'étude de dangers des barrages et des digues et en précisant le contenu (voir résumé non technique au § 2) :

- **Description de l'ouvrage et de son environnement :** localisation et environnement naturel, les équipements, les activités
- **Présentation de la politique de prévention des accidents majeurs et du système de gestion de la sécurité (SGS) :** compétences des différents organismes intervenant dans la gestion de l'ouvrage, définition des principales procédures de surveillance du site en gestion courante comme en situation d'urgence
- **Identification et caractérisation des potentiels de dangers du site :** dangers liés à la présence de certains composants de l'ouvrage et à leurs fonctionnements
- **Caractérisation des aléas naturels :** scénarios d'aléas naturels aggravant le danger au droit du site
- **Etude accidentologique et retour d'expérience :** historique des accidents en cas d'ouvrage existant ou connaissance des accidents sur des ouvrages similaires dans le secteur en cas d'ouvrage neuf
- **Identification et caractérisation des risques :** Identification et analyse des scénarios d'accidents majeurs fonction de la gravité (nombre de personnes potentiellement impactées) et de la probabilité
- **Compléments et propositions d'amélioration :** Barrières de prévention et de protection, techniques ou organisationnelles prévues et à prévoir sur le site

Les éléments présents dans ce rapport peuvent servir de base pour l'élaboration du plan particulier d'intervention (PPI) et devront être réactualisés en conséquence après élaboration du PPI.

5. Analyse fonctionnelle de l'ouvrage et de son environnement

5.1. Description de l'ouvrage

Le barrage de Saint Michel est constitué :

- d'une digue en matériaux meubles compactés.
- d'un évacuateur de crue central constitué par un déversoir à seuil libre implanté sur le corps de digue dans la partie centrale de la vallée, en rive gauche du lit mineur du Petit Gland.
- d'un pertuis de fond contrôlé en amont par 2 vannes plates (2*3) qui traverse la base de la digue à surface libre au moyen de grands murs de soutènement latéraux et la partie centrale de la digue au moyen d'un dalot de 10 m de longueur.

5.1.1. Caractéristiques générales de la digue

La digue présente une hauteur de 9 m au-dessus du fond du lit mineur au droit de l'axe et une longueur en crête de 248 m.

La surface de la cuvette à la cote des plus hautes eaux exceptionnelles (PHE) correspondant au niveau de remplissage atteint par la crue cinqmillénale (194,35NGF), en cas d'obstruction totale du pertuis de fond, est voisine de 96 ha et conduit à un volume stocké de 3 350 000 m³.

Tableau 5-1 : Caractéristiques générales de la digue de Saint Michel

cote de la crête de la digue	195,00 NGF + muret de 0,80 m pour assurer une revanche antibatillage
cote des plus hautes eaux exceptionnelles	194,35 NGF
largeur en crête de la digue	3,5 m à la cote 195,00 NGF
Largeur en pied de la digue	54 m
revanche au-dessus des plus hautes eaux exceptionnelles	1,0 m
fruit du talus amont	2,5/1
fruit du talus aval	2,5/1

Tableau 5-2 : Courbe hauteur – volume – surface de la cuvette de Saint Michel

Altitude NGF	Aire (m ²)	Volume (m ³)
186	0	0
186.5	26 601	8 873
187	64 943	33 100
187.5	91 042	71 783
188	124 698	125 853
188.5	156 358	195 737
189	202 403	284 916
189.5	271 227	402 082
190	328 761	553 897
190.5	380 388	730 809
191	446 352	936 324
191.5	516 607	1 177 352
192	614 777	1 458 096
192.5	701 833	1 787 452
193	792 188	2 161 025
193.5	860 083	2 574 583
194	924 197	3 020 577
194.5	975 393	3 496 289
195	1 017 095	3 994 401

5.1.2. Corps de digue

La digue sera constituée par un remblai homogène réalisé en matériaux limono-argileux soigneusement compactés.

Les protections extérieures du corps de la digue comprendront :

- sur le parement amont :
 - au dessus de 188.00 NGF, un enherbement mis en place sur une couche de terre végétale de 0,20 m d'épaisseur,
 - en partie basse, sous la cote 188.00 NGF qui correspond à la zone la plus souvent sollicitée par les variations du plan d'eau dans la cuvette, un rip-rap en enrochement de 0.50 m d'épaisseur posé sur un géotextile.
- sur le parement aval, un enherbement mis en place sur une couche de terre végétale de 0,20 m d'épaisseur,
- sur le couronnement, une couche de tout venant compacté de 0,20 m d'épaisseur posée sur un géotextile mise en place sur une largeur de 3 m ; latéralement, les accotements seront enherbés (0,20 m de terre végétale enherbée).
- compte tenu du fonctionnement très épisodique de l'aménagement et de la position haute de la digue par rapport au terrain naturel, le risque de dégâts causés par les animaux fouisseurs paraît limite, sachant que ces animaux, inféodés à l'eau, ont des terriers dont les ouvertures sont

généralement en bordure immédiate des eaux. Toutefois nous avons prévu sur les deux parements d'intégrer, sous la couche de terre végétale, un grillage autifouisseur.

5.1.3. Pertuis de fond

Afin de garantir la franchissabilité de ce dalot par la faune piscicole, l'ONEMA a souhaité que sa longueur soit la plus courte possible afin de garantir un éclairage naturel.

L'ouvrage central comprend donc :

- un ouvrage d'entonnement de 16,60 m de longueur de section en U intégré dans la recharge amont de la digue, de hauteur variable (2,50 m en amont à 9,10 m en aval) ; compte tenu de la hauteur des murs latéraux, des butons transversaux ont été prévus afin de limiter leur épaisseur,
- un dalot de section importante (2,75 x 6,00 m), mais de longueur limitée (10 m), vanné en amont par deux vannes wagon de 2 x 3 m ; il supporte, au droit de son entonnement amont, un puits vertical de 1,00 x 6,50 m destiné à servir de reniflard lorsque les vannes fonctionneront. Son arase supérieure, calée à la cote du couronnement de la digue est fermée par un caillebotis métallique ; elle supporte les dispositifs de contrôle et de commande des vannes,
- un ouvrage de restitution aval, intégré dans la recharge aval de la digue, de 14 m de longueur, 6,5 m de largeur et de hauteur variable qui comprend :
 - une partie amont de section rectangulaire dont la hauteur passe de 2,75 m à 5,95 m sur une longueur de 4,75 m,
 - une partie aval de section en U dont la hauteur passe de 7,44 m à 2,50 m sur une longueur de 12,64 m.

Comme pour l'ouvrage d'entonnement amont des butons transversaux ont été prévus afin de limiter l'épaisseur des murs.

Afin de faciliter le franchissement de ce dalot par la faune piscicole, son radier sera revêtu par un perré en petits enrochements intégrant une cunette centrale de 3,9 m de largeur ce qui permet de concentrer les écoulements en période d'étiage (débit d'attrait) et de garantir une épaisseur minimale pour la lame d'eau.

5.1.4. L'évacuateur de crue

Implanté sur la digue dans l'axe de la vallée, il s'agit d'un seuil libre déversant destiné à assurer le transit d'un débit de 90 m³/s correspondant au débit de la crue exceptionnelle d'hiver (crue cinquième) survenant avec la vanne du pertuis de fond bloquée en position fermée.

Les caractéristiques du déversoir de sécurité sont les suivantes :

- implantation : sur le corps du remblai,

- calage du seuil déversant : 193.00 NGF ;
- longueur déversante : 26 m ;
- cote des plus hautes eaux exceptionnelles : 194.35 NGF ;
- épaisseur de la lame déversante : 1,35 m.

Cet ouvrage comprend :

- un entonnement amont horizontal, calé à 192.50 NGF, protégé par une couche d'enrochement de 0,50 m d'épaisseur mise en place sur un géotextile.
- le seuil proprement dit, qui est constitué par un muret déversant de 0,50 m d'épaisseur et de 1,00 m de hauteur fondé sur une semelle en béton de 1 x 1 m coulée à pleine fouille dans une tranchée réalisée dans le corps de digue.
- en aval de ce seuil, un coursier de 40 m de largeur, décaissé dans le parement aval de la digue, protégé par une couche d'enrochements maçonnés de 1 m d'épaisseur posés sur une couche de transition et un géotextile,
- un bassin de dissipation implanté en pied aval de la digue protégé par une couche d'enrochements maçonnés de 1.50 m d'épaisseur posé sur une couche de pose et de calage en tout venant de 0,20 m d'épaisseur, reposant elle-même sur un feutre géotextile de transition.
 - Ses caractéristiques géométriques sont les suivantes :
 - largeur : 26 m,
 - longueur : 10 m,
 - calage du radier : 184.75 NGF,
 - profondeur sous le terrain naturel : 1.25 m environ,
- En aval de ce bassin, aucun aménagement particulier n'est prévu puisque lorsque l'évacuateur fonctionnera l'ensemble du fond de vallée en aval de la digue sera inondé.

5.2. Description de l'environnement de l'ouvrage

5.2.1. Description topographique

Au droit du site

Au droit du site à aménager, le bassin versant du Petit Gland s'étend sur 72,8 km².

Le site collecte les eaux de collines de faibles hauteur.

A Montorieux, l'altitude du cours d'eau est de 194 m. Puis, elle décline progressivement pour atteindre 187 m à l'entrée de Saint-Michel. Le cours d'eau est bordé sur sa rive gauche par une butte qui culmine à 227 m. Sur ce versant de la vallée du Petit Gland, les valeurs de pente sont variables, comprises entre 2 % et 6 % environ.

En rive droite du Petit Gland, le relief culmine à 229 m au niveau du Bois de St Michel. Dans ce secteur, les pentes sont plus constantes, comprises entre 3,5 % et 4,5 % environ. La route RD316 longe la cuvette sur ce versant entre les cotes 201 NGF en amont et 192 NGF en aval.

En aval du site

La vallée en aval du site se décompose en deux tronçons morphologiquement bien distincts :

- *La traversée dans Saint Michel*: la vallée du Gland s'élargit modérément. Il y a peu d'espace d'expansion des eaux et le laminage de l'onde restera progressif et influencé par les obstacles dans la vallée, notamment le seuil de Sougland et le remblai routier transversal à la vallée formé par la route Départementale RD1050.
- *En aval de Saint Michel* : la vallée s'élargit progressivement ce qui autorise un laminage de l'onde dans les zones agricoles et de prairies sur un tronçon de 2 km puis dans une zone urbaine dense constituée par la ville d'Hirson. A Hirson, la vallée du Gland rejoint celle de l'Oise. En aval d'Hirson, la vallée de l'Oise, large (500 m en moyenne) et peu pentue (0,1 %), traverse des zones agricoles ponctuée de zones d'habitats dispersés constitués par de nombreux petits villages et hameaux .

5.2.2. Les accès à l'ouvrage

Au stade Avant-Projet, les accès à l'ouvrage sont garantis :

- dans le lit majeur de part et d'autre de la digue en rive droite. Un ouvrage de franchissement type gué ou dalot permettra d'accéder à la rive gauche.
- en crête de digue en rive droite : ce qui permettra d'accéder à la station de contrôle des vannes en toute sécurité même en cas de fonctionnement de l'évacuateur de sécurité.

5.2.3. Les enjeux

Au droit du site

Les enjeux présents sur le site sont peu nombreux :

- Le hameau de Montorieux situé en queue de retenue. Les habitations les plus basses sont calées à une cote au moins supérieure à 195,5 NGF. On estime à 20 personnes le nombre d'habitant dans ces maisons.

- La voie communale de Saint-Michel, reliant Blissy à Saint Michel, passe à distance du Petit Gland, sur sa rive gauche. Cette route donne accès à Montorieux par un chemin rural goudronné qui franchit, par un pont, le Petit Gland, à l'ouest du village.
- La R.D.316, qui joint Montorieux à St-Michel, longe la cuvette en rive droite.

Zone protégée par la digue

Au sens de l'article R. 214-113 du code de l'environnement, la zone protégée par la digue est définie comme la zone soustraite à l'inondation causée par la crue de projet de protection de l'ouvrage.

Pour le barrage de Saint Michel cette zone s'étend en aval de l'ouvrage jusqu'à Neuve Maison. On estime à 14 000 le nombre d'habitant moyen dans cette zone.

6. Présentation de la politique de prévention des accidents majeurs et du système de gestion de la sécurité (SGS)

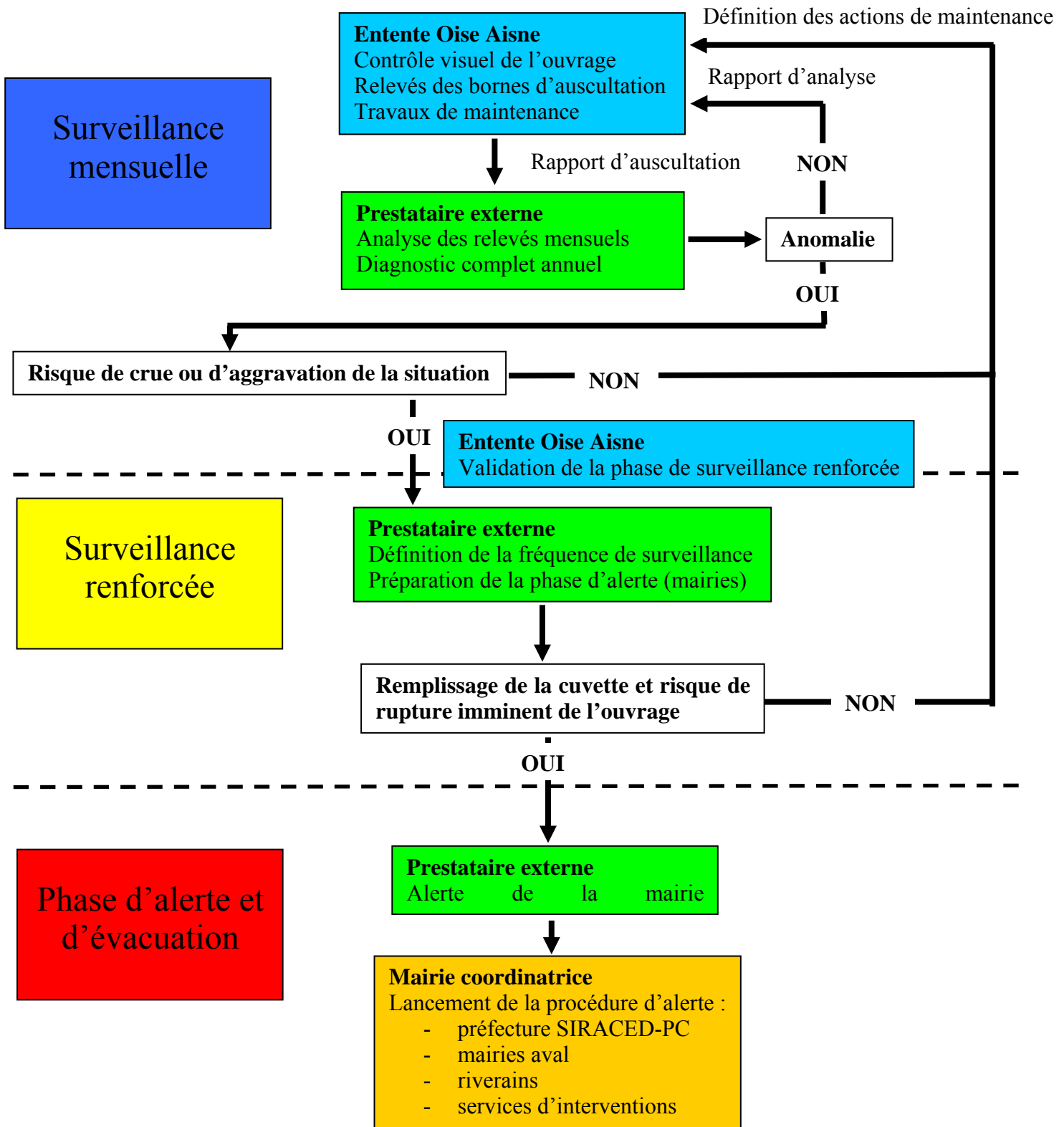
Au titre de l'article R 214-215 du code de l'environnement, le responsable de l'ouvrage de Saint Michel est l'Entente Oise Aisne.

On présente dans ce chapitre une proposition d'organisation de la politique de prévention des accidents majeurs et du système de gestion de la sécurité définissant les acteurs et les moyens d'information, de surveillance, d'alerte et d'évacuation des populations, qui seraient mis en oeuvre en cas d'inondation de la vallée du Petit Gland et du Gland suite à la rupture du barrage implanté sur la commune de Saint Michel.

6.1. Acteurs du plan de gestion et principales missions

Acteurs	Missions
L'Entente Oise Aisne	<p>Effectuer la surveillance mensuelle (contrôle visuel de l'ouvrage, relevé des bornes d'auscultation).</p> <p>Transmission des données au prestataire externe.</p> <p>Réalisation des opérations de maintenance.</p> <p>Validation des conclusions et des propositions du prestataire externe.</p> <p>Mise à jour du registre de surveillance.</p> <p>Réaliser un plan intercommunal de sauvegarde.</p>
Prestataire externe de l'Entente	<p>Analyse des relevés mensuels.</p> <p>Définition des actions de maintenance.</p> <p>Diagnostic complet de l'ouvrage biannuel ou après chaque événement pluvieux important.</p> <p>Propositions de passage en surveillance renforcée ou phase d'alerte et évacuation.</p> <p>Définition des plannings de surveillance renforcée.</p> <p>Astreinte de surveillance en cas de rupture imminente.</p> <p>Mise à jour du registre de surveillance.</p>
Mairies	<p>Actualiser de façon récurrente la liste de la population concernée par le périmètre de sécurité.</p> <p>Souscrire à un système de communication commun pour la gestion de l'information aux riverains.</p> <p>Mettre à jour ou rédiger un plan communal de sauvegarde.</p>
Mairie coordinatrice	<p>Missions de chaque mairie.</p> <p>Mise à disposition du registre de surveillance.</p> <p>Informations de la situation aux communes et service de la préfecture.</p>
SIRACED - PC (préfecture)	<p>Préparation de la phase d'alerte et d'évacuation auprès de tous les services d'interventions concernés.</p> <p>Suivi des bulletins météorologiques pour prévention.</p>
Service d'interventions (SDIS, Gendarmerie, DDE)	<p>Intervention d'évacuation du périmètre de sécurité en cas de rupture du barrage.</p>

6.2. Organisation générale de la gestion de l'ouvrage



6.3. Surveillance du site

6.3.1. Surveillance mensuelle

La surveillance du site est assurée mensuellement (fréquence une fois au moins tous les 30 jours), et par tout moyen, par l'exploitant du barrage (registre de ronde ouvert).

L'exploitant de cet ouvrage est l'Entente Oise Aisne.

Les objets de cette surveillance sont :

- le relevé des données piézométriques,
- le relevé des mesures topographiques,
- le relevé des variations de niveaux de la retenue,
- un contrôle visuel de l'état des ouvrages.

De plus, en cas de besoin, les Brigades de Gendarmerie Nationale de Saint Michel et de Hirson auront accès libre au site afin de pouvoir communiquer toutes informations utiles relevées dans le cadre de son service normal aux Maires des communes concernées par le Plan de secours à établir ultérieurement.

L'ensemble des données relevées lors de cette surveillance mensuelle sera transmis à un prestataire externe spécialisé dans le suivi de ce type d'ouvrage et choisi par l'exploitant afin d'analyser ces données et permettre de définir l'état de l'ouvrage et les éventuelles actions d'entretien à mener.

6.3.2. Surveillance renforcée

Déclenchement

En cas d'anomalie relevée lors de la surveillance mensuelle, une surveillance renforcée du site sera mise en place dès lors qu'interviennent un des facteurs suivants :

- crue locale du Petit Gland,
- annonce de fortes précipitations, sur le département, par Bulletin Régional d'Alarme Météorologique (B.R.A.M.),
- tout autre événement local laissant craindre une aggravation du risque.

Le Maire de Saint Michel décide de la mise en oeuvre de la phase de surveillance renforcée, après avis du Maire de Hirson.

La mairie coordinatrice informe alors des services désignés ci-après de la mise en place de la phase de surveillance renforcée :

- Préfecture de l'Aisne,
- Subdivision de l'Equipement,

- Brigades de Gendarmerie Nationale,
- S.I.A.C.E.D.-P.C.

Compte tenu de l'urgence, les avis peuvent être rendus verbalement puis confirmés ultérieurement par écrit (télécopie, courrier...).

La surveillance du site est effectuée par l'exploitant qui prendra toutes les mesures pour informer les communes concernées ainsi que les Brigades de Gendarmerie Nationale de Saint Michel et de Hirson..

Cette surveillance a lieu toutes les trois ou quatre heures (modulable suivant la nature et l'intensité de l'événement) afin d'optimiser le délai de réaction des services et la sécurité immédiate des personnes concernées.

Dès le déclenchement de la phase dite "renforcée", l'exploitant établit, en partenariat avec son prestataire externe, un planning des tours de surveillance qui mentionne les heures et les personnes chargées de l'effectuer. Un registre de surveillance est mis en place en Mairie de Saint Michel et est renseigné chaque jour à cet effet.

La mairie coordinatrice se doit d'informer les mairies de toute évolution de la situation ainsi que prévenir tous les riverains concernés du déclenchement de la phase de surveillance renforcée à l'aide du système d'information commun.

Fin de surveillance renforcée

La surveillance renforcée est effective jusqu'à ce que disparaissent ou cessent le ou les événements l'ayant motivée. Pour ce faire, le Maire de Saint Michel décide de la fin de la surveillance renforcée après avis du Maire de Hirson et consultation des services désignés ci-après :

- Préfecture de l'Aisne,
- Subdivision de l'Équipement,
- Brigade de Gendarmerie Nationale,
- S.I.A.C.E.D.-P.C.

Les avis et consultations peuvent être rendus verbalement, puis confirmés par télécopie.

La phase de surveillance mensuelle est alors réactivée.

La mairie coordinatrice prévient alors l'ensemble des riverains de l'arrêt de cette phase de surveillance renforcée par l'intermédiaire du système d'information commun.

6.4. Information des populations

La liste des personnes se trouvant en zone inondable et devant être évacuée, en cas de rupture du barrage de Saint Michel, définie ultérieurement sera mise à jour par les Maires de Saint Michel et de Hirson, chacun en ce qui les concerne, au moins 1 fois par an et en tant que de besoin.

Les modifications sont transmises, au maire coordinateur qui se charge de la diffusion des mises à jour à l'ensemble des détenteurs du Plan de secours.

6.4.1. Alerte des populations

Dès lors que les communes et services concernés sont en phase d'alerte, les Maires de Saint Michel et Hirson prennent les mesures nécessaires afin d'alerter la population concernée pour quelle soit en mesure, si le besoin s'en fait sentir, d'évacuer la zone dangereuse dès réception du message d'évacuation.

Cette information peut se faire par téléphone ou tous moyens disponibles. En tout état de cause, le mode d'information doit être distinct du signal d'évacuation afin d'éviter toute confusion.

Il est proposé aux communes de se regrouper afin de mettre en place un système de communication efficace permettant de prévenir toute la population concernée à l'aide de tous moyens de communication (internet, téléphonie mobile et fixe). Plusieurs entreprises de communications proposent ce type de système d'informations ; la fiabilité de ces systèmes repose sur une mise à jour régulière des données d'envoi et des coordonnées des destinataires.

La gestion de ce système d'information serait laissée à la charge des communes riveraines afin d'assurer une meilleure connaissance des habitants et de leurs évolutions du fait de leur proximité. L'exploitation de ce système d'alerte sera pris en charge par la mairie coordinatrice.

6.4.2. Mesures à prendre par la population

En phase d'alerte, les mesures suivantes doivent être prises par la population :

- fermer les portes et fenêtres,
- se préparer à couper le gaz et l'électricité,
- mettre les produits au sec,
- prévoir l'évacuation :
 - prendre les papiers nécessaires (carte d'identité, livret de famille, chéquiers, cartes bancaires),
 - si besoin, préparer les médicaments indispensables,
 - rassembler dans un sac pour chaque membre de la famille :
 - * des vêtements et chaussures de rechange,
 - * des affaires de toilette et de nuit.
- rejoindre les centres de regroupements définis sur chaque commune.

6.5. Alerte

6.5.1. Définition

La procédure d'alerte est l'action par laquelle la personne assurant la surveillance du site, informe sans délai, téléphoniquement ou par tout autre moyen, la mairie coordinatrice et les différents services d'une anomalie dans la situation ; ceux-ci sont chargés de répercuter l'information et de mettre en oeuvre les mesures qui leur incombent décrites dans le présent document.

6.5.2. Déclenchement de l'alerte

L'alerte est déclenchée dès qu'il est constaté au cours de la surveillance renforcée du site, un phénomène rendant imminent la rupture du barrage.

L'équipe en charge de la surveillance renforcée, alerte téléphoniquement, pour action, le Maire coordinateur ou les Brigades de Gendarmerie Nationale du secteur.

Dès la réception du message, le responsable communal prévient téléphoniquement ou par tout autre moyen les mairies des autres communes concernées et ses services (services communaux, Centre de Secours, etc...). Il déclenche également le message d'information d'évacuation aux riverains.

Les responsables communaux des autres communes préviennent téléphoniquement leurs services (services communaux, Centre de Secours, etc...) et informent téléphoniquement les services suivants :

- le membre de permanence du corps préfectoral,
- la Subdivision de l'Equipement du Rhône,
- le C.T.A. (18) du S.D.I.S.

Les Brigades de Gendarmerie du secteur rendent compte de l'événement au C.O.G.

La Subdivision de l'Equipement rend compte de l'événement à la Direction Départementale de l'Equipement.

6.6. Évacuation

L'évacuation des populations menacées est décidée par les Maires des communes de Saint Michel et Hirson avec le déclenchement de la phase d'alerte.

Le Maire coordinateur avise de leur décision dès que possible les services suivants :

- Membre de permanence du corps préfectoral,
- Subdivision de l'Equipement,

- CODIS du Service Départemental d'Incendie et de Secours.

6.6.1. Organisation de l'évacuation

Conduite à tenir

Si la population a été avisée préalablement de l'imminence de l'évacuation, celle-ci prend soin de respecter les consignes suivantes :

- fermer les portes et fenêtres,
- se préparer à couper le gaz et l'électricité,
- mettre les produits au sec,
- prévoir l'évacuation :
 - prendre les papiers nécessaires (carte d'identité, chèquiers, ...),
 - si besoin, préparer les médicaments indispensables.

En cas de menace grave et imminente, les mesures décrites ci-dessus ne pourront être prises, faute de temps ; ainsi à compter de la perception du signal approprié, la population devra évacuer la zone sans délai et se conformer aux consignes suivantes :

- prendre les papiers d'identité, si besoin les médicaments indispensables,
- couper le gaz et l'électricité,
- éviter de gaspiller du temps précieux en cherchant à protéger ou emporter autre chose,
- fermer à clé les portes extérieures.

Les services municipaux, assistés du concours de la Force Publique contrôlent le bon déroulement des opérations et notamment assistent la population.

Centre de regroupement

Les personnes évacuées ne trouvant pas à s'héberger par leurs propres moyens, sont regroupées dans un lieu à déterminer avec les communes.

Lorsque la période d'hébergement tend à perdurer au vu des événements et si les moyens communaux deviennent insuffisants, le Maire de la commune d'hébergements demande au Préfet (S.I.A.C.E.D.-P.C.) le recours à des moyens départementaux afin d'apporter à la population l'assistance dont elle a besoin :

- accueil,
- alimentation et soins pour les populations,

- fourniture de moyens nécessaires à l'hébergement (tentes, lits, couvertures,...) ou tout autre moyen justifié par la situation.

7. Identification et caractérisation des potentiels de dangers

Pour l'aire de sur-stockage de Saint Michel, le potentiel de danger résulte essentiellement de la libération de tout ou partie de l'eau de la retenue suite à une rupture de la digue.

Une rupture de digue peut être provoquée par différents types de phénomènes selon que leur origine est externe à l'aménagement, c'est-à-dire liée aux interactions entre l'aménagement hydraulique et son environnement, ou bien interne, c'est-à-dire liée à une défaillance au sein des ouvrages constituant l'aménagement hydraulique lui-même.

Les principales causes possibles de défaillances de l'aménagement liées aux éléments extérieurs sont :

- une crue supérieure à la crue de projet (cf. §8),
- un séisme (cf. §8) ,
- un acte de vandalisme,
- une erreur humaine.

On exclut les scénarios catastrophes de type terrorisme, chute d'avion, dont la probabilité d'apparition est quasi nulle, et dont la concomitance avec un remplissage de la retenue (seul cas réellement dangereux) est encore plus improbable.

Les défaillances internes de l'aménagement peuvent être dues à :

- un dysfonctionnement des organes électromécaniques,
- un dysfonctionnement des organes de commande (automate, système de mesures, alimentation électrique),
- une obstruction du pertuis,
- une détérioration du corps de digue,
- une déstabilisation du corps de digue,
- une rupture du corps de digue par infiltrations (renard).

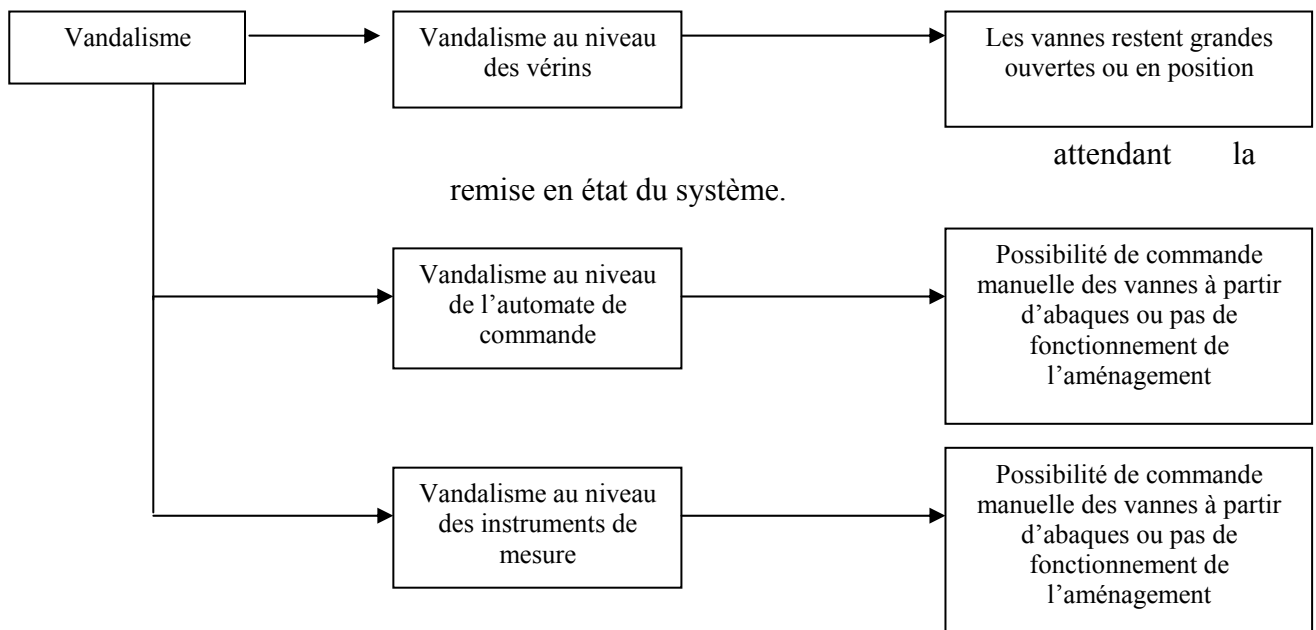
7.1. Vandalisme

Des actes de vandalisme peuvent être commis soit au niveau des équipements électromécaniques et instruments de mesures, soit au niveau du local technique.

En cas de détérioration des organes de manœuvres des vannes, l'action des vannes peut devenir impossible :

- dans le cas d'un blocage en position haute : les débits sortants demeureront égaux aux débits incidents, comme c'est le cas actuellement.
- dans le cas d'un blocage en position abaissée des vannes, le niveau dans la cuvette peut dépasser la cote 193 NGF et le déversoir de sécurité entre alors en service. Rappelons ici que les hypothèses de dimensionnement de l'évacuateur de sécurité tiennent compte de ce risque de blocage en position basses (vannes complètement obstruées) et que l'ouvrage déversant permet d'évacuer, dans ces conditions extrêmes, une crue d'occurrence cinqmillénaire, ce qui constitue un gage quasi total de sûreté.

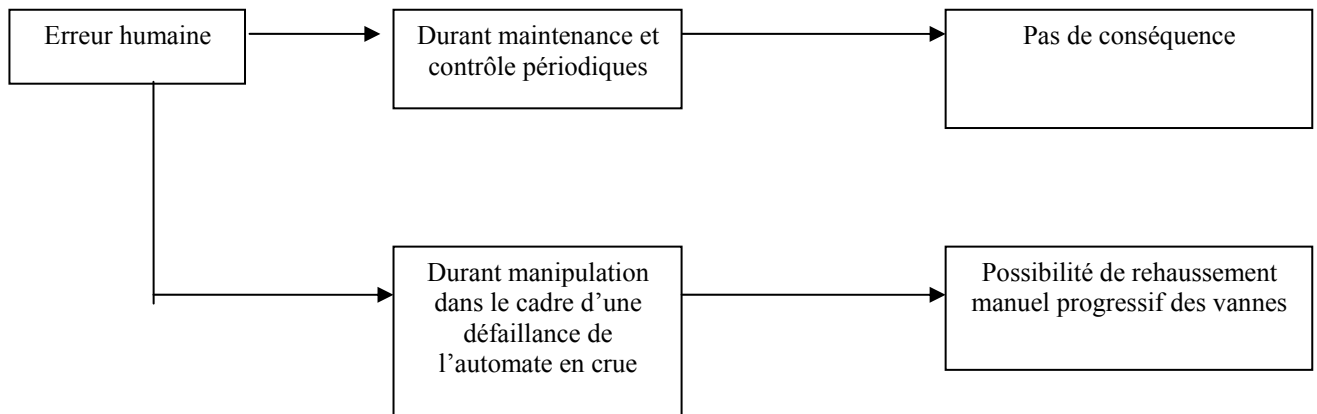
En cas d'intrusion dans le local technique, cas le plus probable, et de détérioration de l'automate de commande ou des instruments de mesure, l'alarme avertit l'équipe d'exploitation qui peut alors intervenir. Dans l'éventualité où l'incident se produirait en période de crue (conjonction très improbable), les membres de l'équipe d'exploitation peuvent intervenir dans un délai suffisamment bref (<1 h) en regard de la durée de la crue pour éviter toute perturbation néfaste et soit, assurer une commande manuelle des vannes à partir d'abaques pré-établies, soit éviter le fonctionnement de l'ouvrage en



Pour prévenir ces cas de vandalisme, le local technique sera muni d'une porte métallique avec serrure anti-effraction et d'un détecteur d'ouverture de porte qui déclenchera une procédure de téléalarme. Les inspections visuelles régulières permettront de vérifier l'intégrité des équipements.

7.2. Erreur humaine

Dans le cas général, en situation de crue, le système fonctionne de manière totalement automatique. La commande manuelle n'est utilisée que, d'une part pour les besoins de maintenance et de contrôle périodiques réalisés en période d'étiage, d'autre part en secours en cas de défaillance des automatismes. Une erreur humaine dans le premier cas de figure serait peu préjudiciable. Dans le deuxième cas, une erreur peut être rapidement corrigée, quitte à réaliser par défaut un rehaussement manuel contrôlé des vannes.



7.3. Dysfonctionnement des organes électromécaniques

7.3.1. Blocage des vannes

Dans le cas d'un blocage en position haute, pouvant notamment être occasionné par une accumulation d'embâcles sur le tablier à l'occasion de faibles crues, l'ouvrage ne pourra assurer sa fonction de régulation des débits : les débits sortants demeureront égaux aux débits incidents, comme c'est le cas actuellement. Les inspections, nettoyages et manœuvres réguliers doivent permettre d'éviter ce cas de figure.

Dans le cas d'un blocage en position abaissée des vannes, ne pouvant être occasionné que par la rupture d'une ou des deux crémaillères, cas fortement improbable de par la conception de l'aménagement, le niveau dans la cuvette peut dépasser la cote 193 NGF et le déversoir de sécurité entre alors en service. Rappelons ici que les hypothèses de dimensionnement de l'évacuateur de sécurité tiennent compte de ce risque de blocage en position basses (vannes complètement obstruées) et que l'ouvrage déversant permet d'évacuer, dans

ces conditions extrêmes, une crue d'occurrence cinquiennale, ce qui constitue un gage quasi total de sûreté.

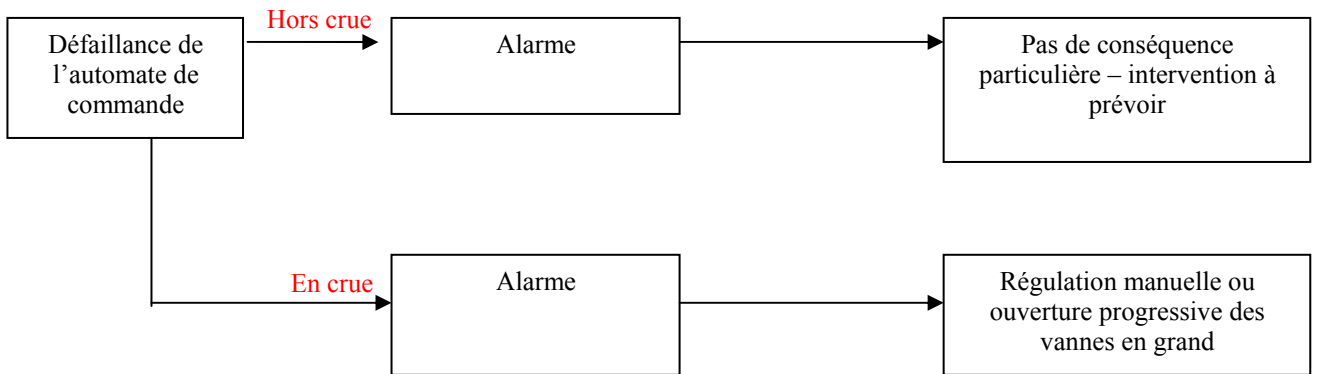
7.3.2. Détérioration du tablier des vannes

Le tablier est conçu spécialement pour résister à la torsion et aux chocs pouvant être occasionnés par des objets flottants même massifs. Le risque de rupture est négligeable.

7.4. Dysfonctionnement des organes de commande

7.4.1. Défaillance de l'automate de commande

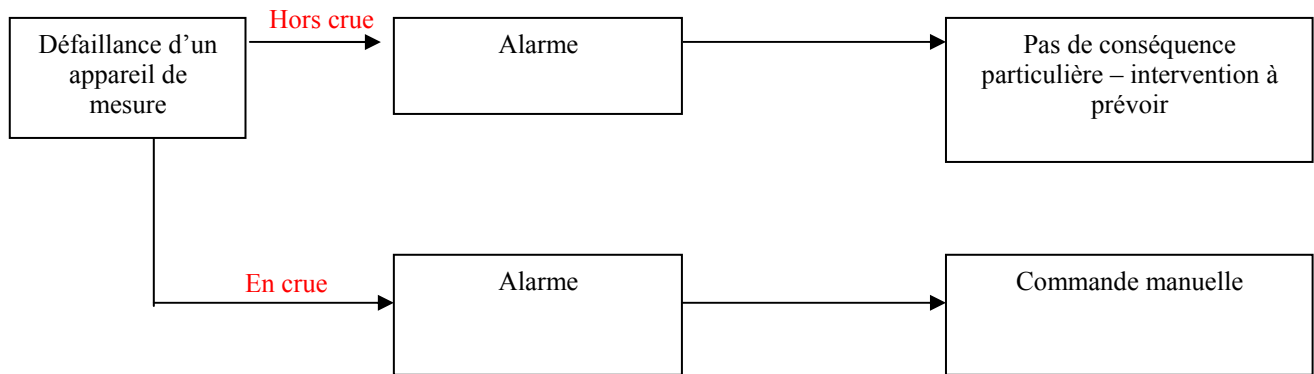
En cas de défaillance de l'automate, la téléalarme est activée. Un opérateur peut alors intervenir rapidement (moins d'une heure, soit un délai faible en regard de l'évolution des débits de crue du Petit Gland) et procéder manuellement à la régulation à partir d'abaques ou, le cas échéant à ouvrir progressivement les vannes en grand. Il faut toutefois remarquer que dans ce dernier cas, le débit restitué à l'aval de l'aménagement sera supérieur au débit entrant et à 21 m³/s ce qui a des conséquences sur l'inondation à l'aval qui peut se trouver sensiblement aggravée.



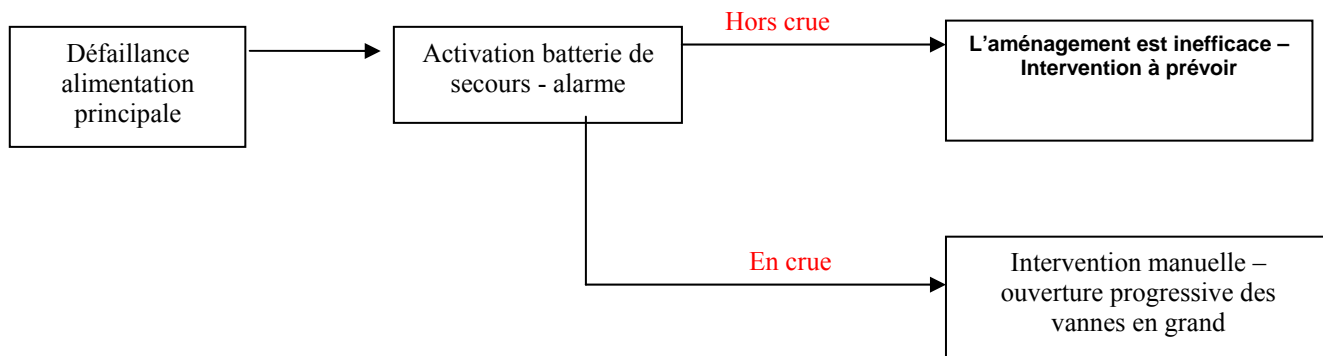
7.4.2. Défaillance des systèmes de mesure

Si l'un des instruments de mesure est défaillant, la téléalarme est activée. Un opérateur peut alors intervenir pour réparer. En situation de fonctionnement des vannes, l'équipe d'exploitation, avisée par l'alarme, intervient et peut reprendre le contrôle du système au moyen des commandes manuelles, comme dans les autres cas de défaillance évoqués précédemment. On peut noter également que, par sécurité, les mesures sont doublées de manière à augmenter la fiabilité du système.

7.4.3. Défaillance de l'alimentation électrique



Si le circuit principal d'alimentation électrique s'avère défaillant, des batteries de secours sont activées automatiquement et la téléalarme est déclenchée. Si la défaillance intervient en période de fonctionnement de l'aménagement, un opérateur doit procéder manuellement à l'ouverture progressive des vannes.



7.5. Obstruction du pertuis

Une obstruction partielle ou totale du pertuis peut être causée par l'accumulation d'embâcles dans l'ouvrage ou la rupture d'une ou des deux crémaillères (cf. § Blocage des vannes).

Les inspections visuelles régulières permettront d'évaluer l'encombrement de l'ouvrage.

7.6. Détérioration du corps de digue

Différents facteurs peuvent provoquer des désordres plus ou moins importants au niveau du corps de digue. On peut citer notamment :

- Risques de tassements,
- Risque d'orniérage en cas de circulation d'engins agricoles sur la risberme,

- Risques liés au ruissellement sur les parements de la digue,
- Risques liés au piétinement de la digue par les animaux (vaches),
- Risques liés aux animaux fouisseurs,
- Risques liés à la végétation.

Tassements

Les tassements seront contrôlés fréquemment en cours de construction puis pendant plusieurs mois, grâce au dispositif d'auscultation mis en place sur la digue, et le cas échéant, des ajustements complémentaires seront effectués sur le corps du remblai jusqu'à stabilisation totale de l'aménagement aux cotes de projet. Par la suite, des contrôles réguliers seront réalisés par sécurité de manière à repérer d'éventuels quoique improbables mouvements de la digue.

Risque d'orniérage

Les accès sont prévus latéralement à la digue, les dégâts liés à l'orniérage seront ainsi largement diminués : seul le pied de digue sera concerné et non le corps lui-même.

Ruissellement

L'enherbement contrôlé de la digue limitera les phénomènes d'entraînement de matériaux par ruissellement.

Piétinement

Le pied du parement amont de la digue sera protégé par un dispositif pour interdire l'accès aux troupeaux, évitant ainsi le risque de dégradation par piétinement.

Fouisseurs

En ce qui concerne l'action des fouisseurs, on pourra éventuellement être confronté à des terriers de lapins, blaireaux et renards, qui seront repérés lors des inspections visuelles et comblés. Les ragondins ne semblent pas constituer un risque majeur étant donné que l'aménagement est dans le cas général totalement hors d'eau. Or, ces animaux ne s'installent qu'à proximité immédiate du cours d'eau (berges, digues latérales). Les berges de la rivière au niveau de l'ouvrage seront protégées par des enrochements.

Végétation

L'entretien régulier de la végétation (fauche, suppression des pousses d'arbres) facilitera l'inspection visuelle et évitera les infiltrations et déstabilisations possibles dans le remblai liées à l'action des racines et à la masse des végétaux.

Dans tous les cas, l'inspection visuelle semestrielle du corps de digue permettra la détection rapide des dégradations et des actions seront engagées pour remettre l'ouvrage en état.

Déstabilisation du corps de digue

Des mesures très sécuritaires ont été prises quant à la stabilité du corps de digue, avec notamment des pentes très faibles pour les parements (2,5/1). Des précautions particulières seront prises au moment de la réalisation pour éviter des problèmes d'hétérogénéité du remblai ou de migration des fines. Une déstabilisation massive du corps de digue est donc très peu probable.

Rupture de la digue par infiltrations

Etant donnée la revanche importante prise par rapport au niveau des plus hautes eaux exceptionnelles, un phénomène de surverse sur la digue est quasiment impossible.

Un phénomène de type renard hydraulique susceptible de produire la ruine du remblai est donc le plus probable, notamment à partir d'infiltrations à la jonction du remblai avec les ouvrages de génie civil (hétérogénéité locale des matériaux). La probabilité et les conséquences de ce type de défaillance seront analysées par la suite.

8. Caractérisation des aléas naturels

Sur Saint Michel, les aléas naturels susceptibles de provoquer une ruine partielle ou totale de l'ouvrage sont :

- un séisme
- une crue du Petit Gland quand celle-ci est supérieure à la crue de projet

8.1. Crue supérieure à la crue de projet (vannes fonctionnelles)

8.1.1. Hydrologie du site

Les développements de l'étude hydrologique font l'objet d'une note spécifique. On rappelle ci-après les principales valeurs caractéristiques de crue du Gland à considérer.

L'absence de mesure de débit sur le Petit Gland impose de s'appuyer sur les cours d'eau jaugés voisins et sur des méthodes empiriques pour évaluer les crues caractéristiques. Les méthodes suivantes ont été utilisées :

- *pour l'estimation du quantile de crue décennale* : le modèle pluie-débit SCS ;
- *pour l'estimation des crues rares et exceptionnelles* : la méthode du gradex.

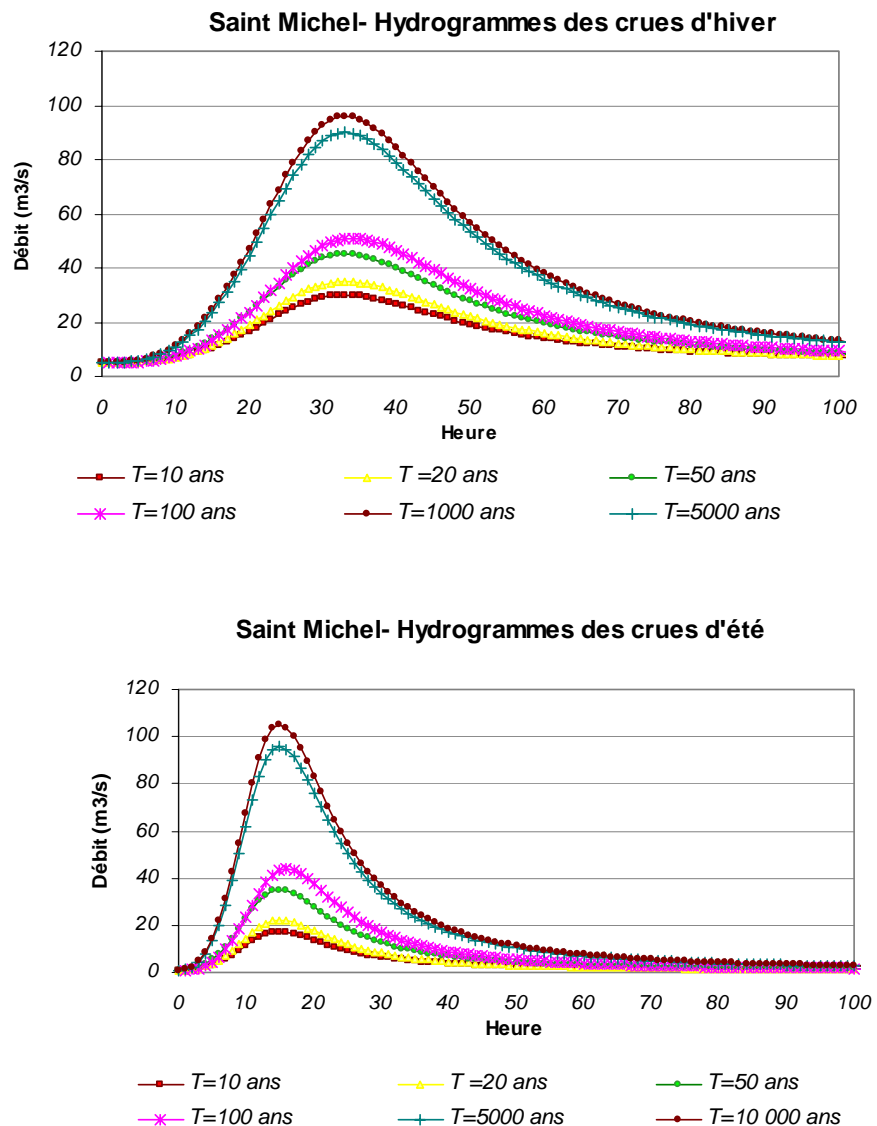
A noter que les apports des affluents du Petit Gland dans la cuvette étant très faibles, ils sont négligés dans l'étude hydrologique du Petit Gland.

Tableau 8-1 : Site de Saint Michel – Débits de pointe de crue (QIXA) de différentes fréquences

Le Petit Gland à Saint-Michel		
S = 72,8 km ²		
	Crue d'hiver	Crue d'été
Période de retour	QIXA (m ³ /s)	QIXA (m ³ /s)
10 ans	30	17
20 ans	35	22
50 ans	45	35
100 ans	51	44
5000 ans	90	96
10 000 ans	96	105

Les hydrogrammes des crues de fréquence caractéristique (**Figure 8-1**) sont reconstitués selon la méthode du Comité Français des Grands Barrages. Pour les différentes occurrences de crues traitées, les hydrogrammes sont calculés en respectant le débit de pointe et le débit moyen de durée 24h, 48h et 72h pour les crues d'hiver.

Figure 8-1 : Hydrogrammes de crue au barrage de Saint Michel

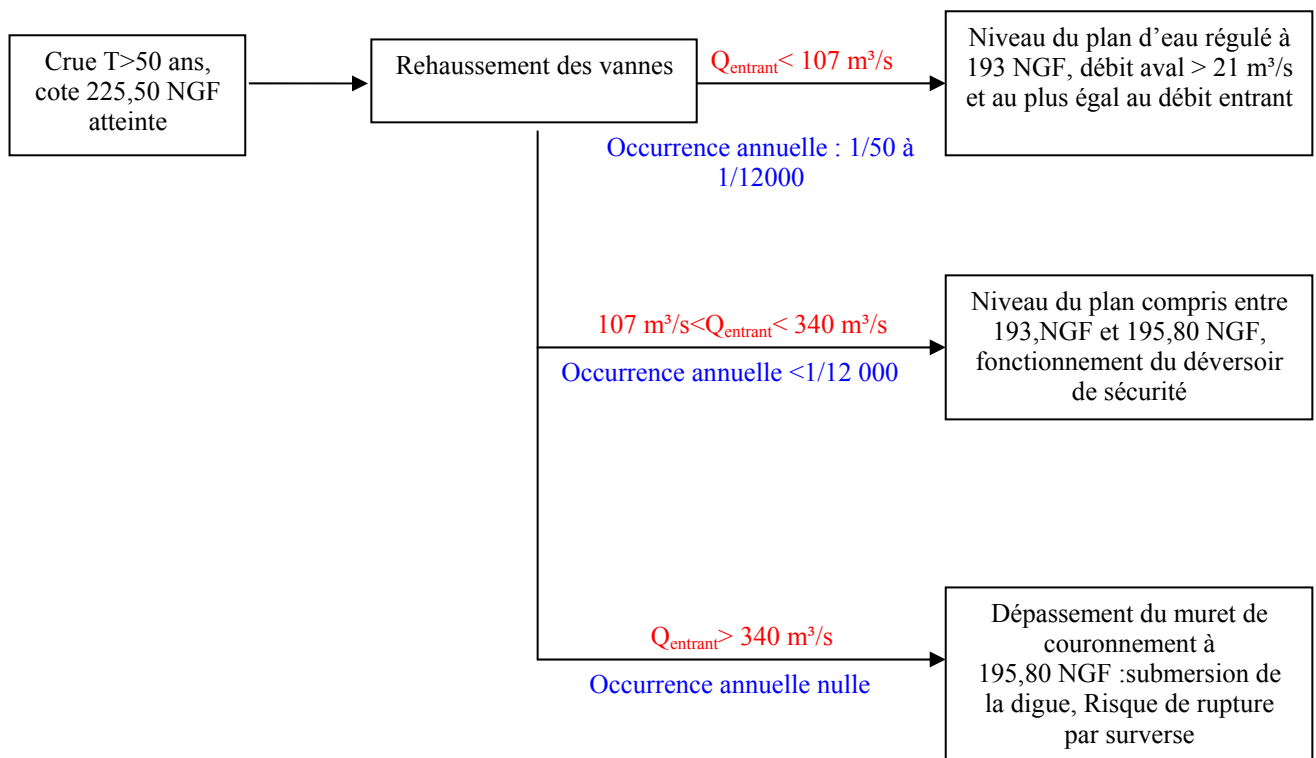


8.1.2. Caractérisation de l'aléa crue

Pour une crue supérieure à la crue de projet (crue cinquantennale), la capacité du plan d'eau est insuffisante pour écrêter l'hydrogramme au niveau du débit d'écrêtement retenu ($21 \text{ m}^3/\text{s}$) et la cote des plus hautes eaux normales 193 NGF est atteinte. L'automate adapte alors la position des vannes (rehaussement) pour réguler la cote de la retenue à 193 NGF au maximum, et non plus le débit aval qui peut alors être supérieur à $21 \text{ m}^3/\text{s}$ mais est au plus égal au débit entrant dans la retenue à cet instant (pas d'aggravation de l'événement naturel).

La régulation de la cote de la retenue à 193 NGF est assurée jusqu'à un débit entrant de l'ordre de $107 \text{ m}^3/\text{s}$, les vannes de régulation étant alors complètement ouvertes. Au-delà, bien que les vannes soient grandes ouvertes, le niveau dans la retenue augmente et le déversoir de sécurité entre en fonctionnement pour un débit de l'ordre de $110 \text{ m}^3/\text{s}$ soit presque 2 fois le débit de pointe de la crue centennale (probabilité d'occurrence annuelle de 1/15000 environ).

Lorsque les vannes sont complètement ouvertes, la capacité du pertuis permet d'évacuer un débit de l'ordre de $340 \text{ m}^3/\text{s}$ (soit 3,5 fois le débit de pointe de la crue centennale d'hiver) sans atteindre la limite de submersion au niveau du muret de couronnement (195,80 NGF). Les habitations à l'amont du site (hameau de Montorieux et voie communale) peuvent dans ce cas être touchées par une surinondation. L'occurrence d'un tel débit sur le Petit Gland est hautement improbable.



8.2. Séisme

8.2.1. Sismologie du site

Un zonage sismique de la France a été élaboré, sur la base de 7 600 séismes historiques et instrumentaux (séismes uniquement ressentis par les capteurs des réseaux de surveillance ou de recherche) et des données tectoniques, pour l'application des règles parasismiques de construction.

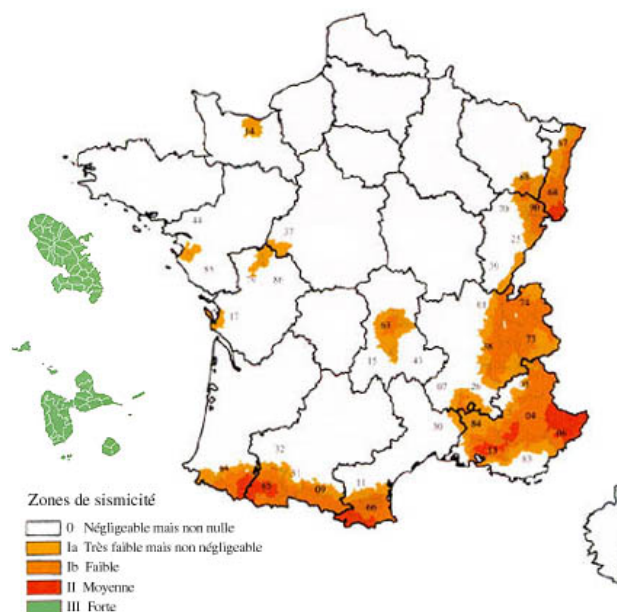
Le territoire métropolitain est divisé en cinq zones de 0 à III. Ce zonage n'est pas seulement une carte d'aléa (phénomène naturel d'occurrence et d'intensité données) sismique, il répond également à un objectif de protection parasismique dans des limites économiques supportables pour la collectivité.

Le décret du 14 mai 1991 détermine cinq zones de sismicité croissante :

- une zone 0 de « sismicité négligeable mais non nulle » où il n'y a pas de prescription parasismique particulière : aucune secousse d'intensité supérieure à VII n'y a été observée historiquement,
- quatre zones Ia, Ib, II et III où l'application de règles de construction parasismique est justifiée.

Toute l'aire d'étude est située en zone 0 de sismicité, comme l'ensemble du département de l'Aisne.

Notons qu'un aléa sismique de faible intensité a été enregistré en 2005 sur la commune (mouvement du sol : $0,7 \text{ m/s}^2 \leq \text{accélération} < 1,1 \text{ m/s}^2$).



8.2.2. Caractérisation de l'aléa séisme

L'aire d'étude étant située en zone 0 de sismicité, aucun séisme de référence n'a été défini.

La probabilité d'occurrence d'un séisme susceptible de provoquer la ruine de l'ouvrage de Saint Michel étant extrêmement faible, le risque lié à un tel scénario n'est pas approfondi par la suite

9. Etude accidentologique et retour d'expérience

La digue de Saint Michel étant un ouvrage neuf aucun accident n'a été observé sur cet ouvrage. Aucun retour d'expérience de rupture de digue n'a été recensé dans la région.

10. Identification et caractérisation des risques

10.1. Méthodologie

10.1.1. Démarche globale

La phase initiale d'identification des potentiels de dangers du site a permis de dresser un portefeuille global des risques associés à l'aire de sur-stockage de Saint Michel et d'identifier les événements redoutés qui vont faire l'objet de l'analyse des risques.

L'objectif de l'analyse des risques est donc, pour chaque événement redouté considéré d'en identifier les causes et les conséquences, ainsi que les moyens de prévention et de limitation des effets mis en place. Ceci permet, par l'intermédiaire d'une cotation, d'identifier les événements pouvant conduire à des scénarios d'accidents majeur.

La méthode choisie est l'Analyse Préliminaire des Risques (APR).

L'analyse préliminaire des risques est une méthode générale couramment utilisée dans le cadre des études de danger.

10.1.2. Principes généraux de la méthode APR

L'analyse des risques de type APR a pour but d'identifier successivement et pour chaque événement redouté préalablement identifié :

- les causes pouvant conduire à l'occurrence de ces événements redoutés ;
- les mesures de prévention prévues pour pallier à l'apparition des causes identifiées ;
- les phénomènes dangereux provoqués par la réalisation des événements redoutés (premiers ou secondaires), les effets prévisibles et leurs conséquences sur des cibles potentielles ;
- les mesures de limitation des conséquences prévues ;
- la probabilité d'occurrence et la gravité des scénarios d'accidents identifiés (cotation semi-quantitative).

10.1.3. Moyens mis en œuvre

L'analyse des risques est réalisée par une équipe pluridisciplinaire du bureau d'études STUCKY.

L'analyse est fondée sur les connaissances et expériences acquises par le groupe de travail sur les éléments suivants :

- conception de digue,
- hydrologie du bassin versant,
- fonctionnement hydraulique de l'ouvrage,
- environnement du projet,
- protocoles d'exploitation et d'entretien,
- gestion du site et sécurité.

10.2. Détermination des scénarios de défaillance

L'identification des scénarios est formulée dans le **Tableau 10-1**.

Tableau 10-1 : Analyse des scénarios de défaillance

N° de scénario	Evènement redouté	Causes	Prévention	Probabilité	Conséquences	Maîtrise des conséquences	Gravité			Risque*		
							Pop.	Mat.	Env.	Pop.	Mat.	Env.
SC1	Rupture partielle ou totale de digue	Vandalisme : détérioration des organes de manoeuvres des vannes ET Crue supérieure à la crue de période de retour 5000 ans	Dissuader l'accès aux organes de manoeuvres par l'aménagement d'une grille cadenassée en crête de digue Possibilité de commande manuelle des vannes à partir d'abaques à établir	$2 \cdot 10^{-6}$	Vannes obstruées totalement - Surverse sur la digue – Formation d'une brèche Propagation d'une onde de rupture dévastatrice en aval	-	5	5	2	15	15	12
SC2		Vandalisme au niveau de l'automate de commande ou des instruments de mesure ET Crue supérieure à la crue de période de retour 12 000 ans	Local technique muni d'une porte métallique avec serrure anti-infraction Alarme Possibilité de commande manuelle des vannes à partir d'abaques à établir	$8 \cdot 10^{-7}$	L'aménagement ne fonctionne pas – Surverse sur la digue – Formation d'une brèche - Propagation d'une onde de rupture dévastatrice en aval	-	5	5	2	15	15	12
SC3		Erreur humaine Et Crue T>10 ans	-	10^{-3}	Conséquences réversibles – Erreur rattrapée au pas de temps suivant	-	1	1	1	41	41	41
SC4		Dysfonctionnement des organes électromécaniques (Blocage des vannes en position basse) ET Crue supérieure à la crue de période de retour 5000 ans	Le tablier est conçu spécialement pour résister à la torsion et aux chocs Inspections, nettoyages et manoeuvres réguliers	$2 \cdot 10^{-6}$	Vannes obstruées totalement - Surverse sur la digue – Formation d'une brèche - Propagation d'une onde de rupture dévastatrice en aval	-	5	5	2	15	15	12
SC5		Dysfonctionnement des organes de commande (défaillance de l'automate, des systèmes de mesure, du système électrique)	Alarme déclenchée en cas de défaillance Batteries de secours activées automatiquement Possibilité de commande manuelle des vannes à partir d'abaques à établir	10^{-3}	Conséquences réversibles – Erreur rattrapée au pas de temps suivant par intervention manuelle	-	1	1	1	41	41	41
SC6		Obstruction du pertuis par accumulation d'embâcle OU rupture d'un ou des deux crémaillères ET Crue supérieure à la crue de période de retour 5000 ans	Inspections, nettoyages et manoeuvres réguliers	$2 \cdot 10^{-6}$	Vannes obstruées totalement - Surverse sur la digue – Formation d'une brèche - Propagation d'une onde de rupture dévastatrice en aval	-	5	5	2	15	15	12
SC7		Détérioration du corps de digue	Contrôles réguliers des dispositifs d'auscultation, entretien régulier, accès prévus latéralement à la digue, enherbement de la digue, accès limité sur la digue aux troupeaux, Enrochement des berges,	10^{-2}	Pas de ruine même partielle de l'ouvrage	-	1	1	1	41	41	41
SC8		Destabilisation du corps de digue ET Crue T>20 ans	Pente conservatrice des talus de digue	$5 \cdot 10^{-7}$	Ruine totale de l'ouvrage - Propagation d'une onde de rupture dévastatrice en aval	-	5	5	2	15	15	12
SC9		Rupture du corps de digue par infiltrations (renard) ET Crue T>20 ans	Contrôles réguliers des dispositifs d'auscultation, entretien régulier	$5 \cdot 10^{-6}$	Formation d'une brèche par renard - Propagation d'une onde de rupture plus ou moins dévastatrice selon l'intensité de la crue	-	5	5	2	15	15	12
SC10		Crue supérieure à la crue de période de retour T> 12 000 ans	-	$5 \cdot 10^{-6}$	Surverse sur la digue – Formation d'une brèche haute et partielle- Propagation d'une onde de rupture	Créer un service de prévision des crues	5	5	2	15	15	12
SC11		Séisme et crue T>10 ans	Prises en compte des dispositions parasismiques pour le choix des matériaux constituant le corps de digue	10^{-7}	Ruine totale de l'ouvrage - Propagation d'une onde de rupture dévastatrice en aval	-	5	5	2	15	15	12

* cf Tableau 10-4

Le contenu des différentes colonnes est détaillé dans les paragraphes suivants :

- *détermination des évènements redoutés (ER)* : les évènements redoutés analysés dans les tableaux sont issus de l'étude des potentiels de dangers. Dans le cas de l'air de sur-stockage de Saint Michel un seul évènement redouté a été identifié celui de la libération partielle ou totale de la masse d'eau suite à une rupture de digue.
- *détermination des causes* : les causes sont les facteurs susceptibles de provoquer seuls ou en combinaison avec d'autres, l'évènements redouté. S'il y a combinaison, on le précise dans les tableaux d'APR par des opérateurs « ou » ou « et ».
- *détermination des conséquences* : les conséquences sont les effets physiques de l'évènement redouté sur les cibles potentielles, non atténués par d'éventuelles mesures de protection.
- *détermination des mesures de prévention* : les mesures de prévention sont les mesures permettant d'éviter l'apparition des causes de l'évènement redouté.
- *détermination des mesures de maîtrises des conséquences* : les moyens de maîtrise des conséquences sont les moyens mis en œuvre pour d'une part détecter l'occurrence de l'évènement redouté ou de ces conséquences, et d'autre part protéger l'environnement humain, matériel et environnemental du site,
- *Cotation du niveau de probabilité* : la probabilité d'occurrence de l'évènement redouté (colonne P) est évaluée de manière semi-quantitative en tenant compte des mesures de prévention existantes. L'évaluation de cette probabilité est réalisée en se basant sur le tableau suivant :

Niveau de probabilité	Détail de la probabilité		
5	Fréquent	Se produit de façon récurrente sur des installations comparables	$> 10^{-2}$ / an
4	Probable	S'est déjà produit quelques fois sur des installations comparables	de 10^{-3} à 10^{-2} / an
3	Peu probable	A été rapporté une fois sur des installations comparables	de 10^{-4} à 10^{-3} / an
2	Rare	A pu être observé une fois sur des installations comparables	de 10^{-5} à 10^{-4} / an
1	Extremement rare	N'a jamais été observé ni rapporté nulle part	$< 10^{-5}$ / an

Ce niveau de probabilité, croisé ultérieurement avec le niveau de gravité permettra de déterminer la criticité de l'évènement redouté.

- *Cotation du niveau de gravité* : la gravité des conséquences de l'évènement redouté est également évaluée de manière semi-quantitative compte tenu des barrières de maîtrise des conséquences (mesures de détection et de protection) prises en compte par le projet.

L'indice de gravité est évalué au stade des analyses des risques, de façon intuitive, soit en appréciant les résultats de l'étude accidentologique soit à partir du retour d'expérience.

A noter que seule une modélisation permet d'évaluer avec « précision » les conséquences physiques d'un évènement redouté, cependant, à ce stade de l'étude de dangers, une évaluation précise des conséquences ne présente aucun intérêt au vu du très grand nombre de scénarios de défaillance. De plus l'objet de l'analyse de risques est aussi d'identifier les scénarios d'accidents nécessitant une évaluation précise de leurs conséquences.

Le niveau de gravité est défini pour l'impact sur 4 catégories :

- les personnes à l'extérieur du site, ceux dénommés par la suite comme « populations »,
- les travailleurs à l'intérieur du site,
- les biens,
- l'environnement.

Tableau 10-2 : Critères de gravité en fonction des catégories

	Gravité				
	1	2	3	4	5
Personnel présent sur site	Pas d'effets létaux ou premiers effets irréversibles	Premiers effets létaux ou effets irréversibles peu étendus	Effets létaux ou irréversibles peu étendus	Effets létaux ou irréversibles étendus	Effets létaux ou irréversibles largement étendus
Personne hors site (riverains, ERP, voie de circulation,..)					
Matériel	Pas de dommage	Dompage matériel mineur réparable	Dommmages irréparables limité aux équipements du site	Dommmages affectant les unités adjacentes (effet domino possible)	Dommmages étendus – Dommmages en dehors des limites du site
Dommmages sur l'environnement naturel	Pollution négligeable – pas d'impact significatif sur l'environnement – retour à l'état initial quasi immédiat	Impact significatif sur l'environnement et nécessitant des travaux de dépollution minimales – Récupération dans une cuvette de rétention étanche	Atteintes sévères à l'environnement limité du site – Récupération en bassin de contrôle – nécessitent des travaux importants de dépollution (retour état initial <1 an)	Atteintes majeures des zones vulnérables hors du site avec répercussions à l'échelle locale – nécessitent des travaux lourds de dépollution (retour état initial > 1 an)	Atteintes catastrophiques dans une zone largement étendue hors du site – Effets irréversibles nécessitant des travaux lourds de dépollution (dépollution > 5 ans)

Tableau 10-3 : Echelle d'appréciation de la gravité des conséquences humaines d'un accident à l'extérieur du site

Niveau de gravité des conséquences		Zone délimitée par le seuil des effets létaux significatifs	Zone délimitée par le seuil des effets létaux	Zone délimitée par le seuil des effets irréversibles sur la vie humaine
5	Désastreux	Plus de 10 personnes exposés (1)	Plus de 100 personnes exposées	Plus de 1000 personnes exposées
4	Catastrophiques	Moins de 10 personnes exposées	Entre 10 et 100 personnes exposées	Entre 100 et 1000 personnes exposées
3	Important	Au plus 1 personne exposée	Entre 1 et 10 personnes exposées	Entre 10 et 100 personnes exposées
2	Sérieux	Aucune personne exposée	Au plus une personne exposée	Moins de 10 personnes exposées
1	Modéré	Pas de zone de létalité en dehors de l'établissement		Présence humaine exposée à des effets irréversibles inférieure à « une personne »

Ainsi, comme pour la probabilité, à chaque évènement redouté, un niveau de gravité compris entre 1 et 5 est attribué. Ces éléments vont permettre de déterminer la criticité d'un évènement redouté.

- *Cotation du niveau de criticité* : la criticité de l'évènement redouté peut être définie comme étant un couple Gravité/ Probabilité. Elle est évaluée en tenant compte des mesures de prévention, détection et protection. Les critères d'évaluation des niveaux de probabilité P et de gravité G retenus par le projet sont présentés auparavant.

10.3. Sélection des scénarios d'accidents majeurs

La criticité des scénarios identifiés sur le site de Saint Michel est reportée dans la grille suivante :

Tableau 10-4 : Matrice de probabilité/ gravité/ criticité des risques sur le site de Saint Michel

Probabilité	Fréquent	5					
	Probable	4	SC3, SC5, SC7				
	Peu probable	3					
	Rare	2					
	Extrêmement rare	1					SC1, SC2, SC4, SC6, SC8, SC9, SC10 et SC11
			1	2	3	4	5
			Mineure	Significative	Sévère	Critique	Catastrophique
			Gravité				

Avec :

- Vert : risque acceptable
- Jaune : Risque à surveiller
- Rouge : risques inacceptables

Ainsi, il apparaît que plusieurs scénarios de rupture se trouvent considérés a priori comme « à surveiller ». Parmi ces scénarios, les scénarios n°9 (rupture de digue par renard concomitante avec une crue de période de retour supérieure à 20 ans) et n°10 (rupture par surverse suite à une crue de période de retour supérieure à 15 000 ans) sont les scénarios les plus probables. Le scénario n°9 est retenu pour étudier en détail les incidences hydrauliques de la propagation de l'onde de rupture en aval.

10.4. Etude de propagation d'une onde de submersion

10.4.1. Calcul de l'hydrogramme de rupture au barrage de Saint Michel

Description du logiciel "RUPRO"

Le logiciel RUPRO permet le calcul de l'hydrogramme de rupture d'un barrage en terre homogène.

Le logiciel couple par une méthode de RUNGE-KUTTA un calcul hydraulique déterminant les variables hydrauliques moyennes sur la digue à un calcul de transport solide qui suppose l'érosion uniforme dans l'ensemble de la digue.

La digue est décrite par un profil en travers type et la cuvette de retenue par des couples hauteur-surface.

L'élargissement progressif de la brèche dépend des propriétés des matériaux composant la digue :

- Le diamètre moyen D_{50} des matériaux
- Leur masse volumique
- Leur porosité
- Le coefficient de Strickler de l'écoulement hydraulique sur et dans la digue

Les résultats de cette modélisation sont les caractéristiques de la brèche (taille et temps de formation) et l'hydrogramme qui en résulte.

Une description plus détaillée est fournie en **annexe 1**.

Hypothèses et résultats des simulations

Hypothèses de simulation

Conformément au décret relatif aux études de danger réalisé établi en 2008, l'occurrence de crue à considérer pour les digues en remblai est l'occurrence décennale.

La rupture de digue est simulée en fin de phase d'écroulement pour la crue décennale en considérant un dysfonctionnement de l'ouvrage de régulation se traduisant par son obstruction totale.

Le calcul considère que la rupture se produit au moment du pic de la crue décennale, ce qui conduit à retenir les hypothèses suivantes :

- la courbe de décrue est introduite en tant qu'hydrogramme entrant dans la retenue
- le plan d'eau atteint un niveau de 194,58 IGN69.

L'hypothèse d'érosion interne de la digue par phénomène de renard est considérée, en considérant le développement du phénomène le long du pertuis de fond qui traverse le corps du barrage. La cote du fond du renard à l'instant initial est donc égale au pied de digue soit 186,0 IGN69.

L'hypothèse d'érosion par surverse est écartée car la revanche pour la crue décamillénale reste significative (40 cm) et du fait de la présence d'un mur anti-batillage de 80 cm de haut implanté en crête de digue.

Résultats des simulations de rupture

Les matériaux du corps de digue proviendront d'une ou de plusieurs zones d'emprunt situées dans la cuvette de Saint Michel. La localisation des zones d'emprunt reste à définir mais elles seront situées préférentiellement en pied de versant, hors nappe où les conditions géotechniques paraissent a priori meilleures. Le choix de ces zones d'emprunt dépendra par ailleurs des opportunités foncières. Au stade avant-projet, les caractéristiques des matériaux qui entrent en jeu dans le calcul de rupture sont tirés des études géotechniques réalisées par HYDROGEOTECHNIQUE en 2007.

Différentes valeurs de coefficient de Strickler, de granulométrie et de pas de temps de calcul en fonction des caractéristiques des matériaux disponibles pour la réalisation de la digue (tirés des études géotechniques réalisées par HYDROGEOTECHNIQUE) ont été testées. Les zones de prélèvement de matériaux étant les mêmes que celles pour la digue de Watigny on retiendra les mêmes caractéristiques des matériaux (cf. tests dans l'étude de danger relative au site de Watigny).

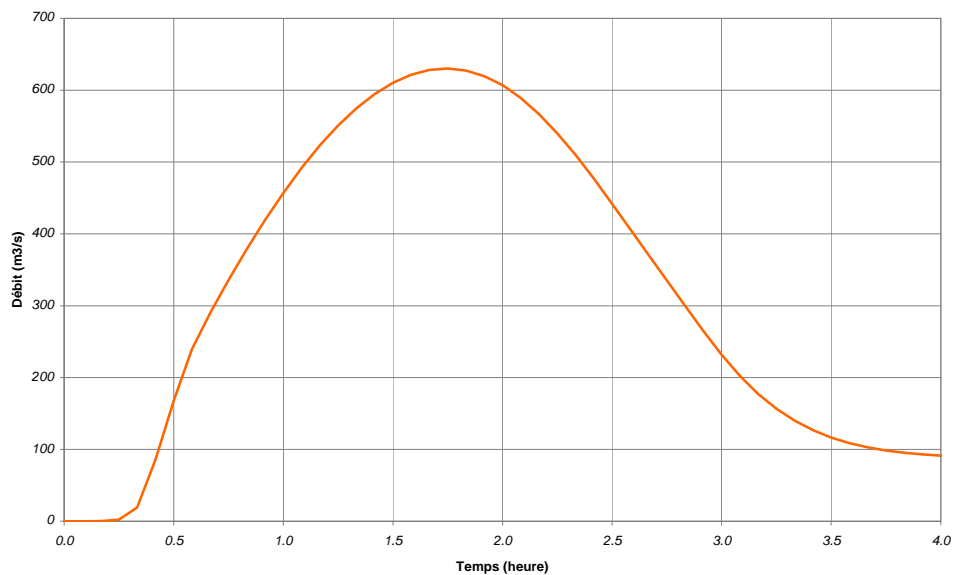
Les valeurs retenues sont données dans le **Tableau 10-5**.

Tableau 10-5 : Caractéristiques des matériaux de la digue pour le calcul de l'érosion interne par renard

D50 des matériaux	0,015 mm
Masse volumique des grains	2200 kg/m ³
Porosité des matériaux	40 %
Coefficient de Strickler de l'écoulement hydraulique sur et dans la digue	42
Rayon initial du renard	0,05 m

Les paramètres de l'hydrogramme de rupture calculé font apparaître une pointe de débit de 630 m³/s atteinte deux heures après le début de la rupture. L'hydrogramme de rupture est présenté à la **Figure 10-1**.

Figure 10-1 : Hydrogramme de rupture au barrage de Saint Michel calculé par RUPRO



Comparaison avec les évaluations données par des méthodes empiriques

Deux formules empiriques développées par Froehlich D.C (1987) donnent la largeur de brèche et la durée de formation. Ces formules ont été établies à partir de la rupture historique de 43 barrages de taille variant de 4,5 m à 86,3 m et dont 37 avaient une hauteur inférieure à 30,5 m :

$$b = 20,79 * k_o * (V * hd)^{0,25}$$

$$\tau = 6,94 * \left(\frac{V}{hd^2} \right)^{0,5} \text{ avec :}$$

- b : largeur moyenne de la brèche (m)
- τ : durée de formation de la brèche (heure)
- hd : hauteur d'eau au-dessus de la brèche (m)
- V : volume de la retenue (hm³)
- k_o : coefficient égal à 1 dans le cas d'une rupture par renard, et égal à 1,4 dans le cas d'une rupture par surverse

Les incertitudes sur ces paramètres sont importantes :

- l'erreur sur la largeur b est de ± 54 %,
- l'erreur sur le temps de rupture est de ± 70 %.

Formules de Fread

Le débit résultant peut être calculé selon la formule développée par Fread (1981) :

$$Q_p = 0,288 * b * \left(C / (\tau + C / (hd * 3,2808)^{0,5}) \right)^3 \text{ avec :}$$

- avec $C = 1\,762 * A / b$
- avec A surface du bassin à la cote de retenue normale (km²).

Résultats

Dans les mêmes conditions que celles du calcul de Rupro, soit

- $V = 4,0 \text{ hm}^3$,
- $hd = 7,0 \text{ m}$
- $A = 1,00 \text{ km}^2$,

On obtient les résultats suivants :

Tableau 10-6 : Largeurs de brèche, temps de rupture et débits de pointe de l'onde de rupture par les formules de Froehlich et Fread

Rupture par renard	Hypothèse moyenne	Hypothèse minimum	Hypothèse maximum
Temps de rupture (heure)	2,0	2,8	0,6
Largeur moyenne de la brèche (m)	48	26	89
Coefficient C	31,0	57,3	16,7
Débit de pointe au travers de la brèche (m ³ /s)	679	433	1750

Les valeurs moyennes et extrêmes calculées par cette méthode rejoignent les valeurs estimées par les autres méthodes. L'écart entre ces valeurs montre que ce calcul est entaché d'une large incertitude.

Conclusion

La comparaison des débits de pointe estimés par les deux méthodes met en évidence une valeur de pointe du même ordre de grandeur.

Pour la suite de l'étude, il paraît cohérent de retenir le résultat de la modélisation par RUPRO qui fournit une estimation du phénomène en accord avec les particularité du site (barrage particulièrement bas pour un volume de rétention relativement élevé) ce qui n'est certainement pas en accord avec les phénomènes observés à la base des formules empiriques.

Tableau 10-7 : Comparaison des débits de pointe de rupture du barrage de Saint Michel calculés par les différentes méthodes

Méthode	Qmax rupture (m ³ /s)
RUPRO	630
Formule Froehlich et Fread - hypothèse moyenne	679

10.4.2. Propagation de l'onde de rupture

Description du modèle numérique

La simulation de la propagation de l'onde de rupture a été réalisée avec le logiciel "DUNAMIC 2D" développé par Hydrocosmos.

Le logiciel de modélisation hydraulique est présenté en **annexe 2**.

L'onde résultant de la rupture du barrage de Saint Michel se propage dans la vallée du Petit Gland puis du Gland jusqu'à rejoindre l'Oise à Hirson. La modélisation permet de simuler le fonctionnement hydraulique de l'ensemble du linéaire du barrage de Saint Michel jusqu'en aval d'Hirson..

Reconnaissance de la vallée du Petit Gland jusqu'à Hirson

Les éléments de description de la vallée présentés au §5.2.1 mettent en évidence les particularités de la vallée, à savoir :

- *Dans la traversée de Saint Michel :*
 - géométrie encaissée à pente longitudinale élevée (de l'ordre de 1%),
 - absence de zone d'expansion et d'étalement des eaux,
 - Absence d'obstacles transversaux ou de remblais susceptibles de contrôler les écoulements
- *En aval :*
 - Elargissement et adoucissement progressif de la vallée autorisant un laminage de l'onde de rupture,
 - Ecoulements influencés par le seuil de Sougland ainsi que le remblai routier de la RD1050

La modélisation tient compte de la topographie générale de la vallée définie par le plan général, issu d'une photorestitution réalisée au 1/5000^{ème} par le cabinet SJMET en 2003, fourni par l'Entente Oise Aisne et par les profils et levés de détail disponibles sur la zone afin de représenter correctement le profil bathymétrique du Gland et de l'Oise.

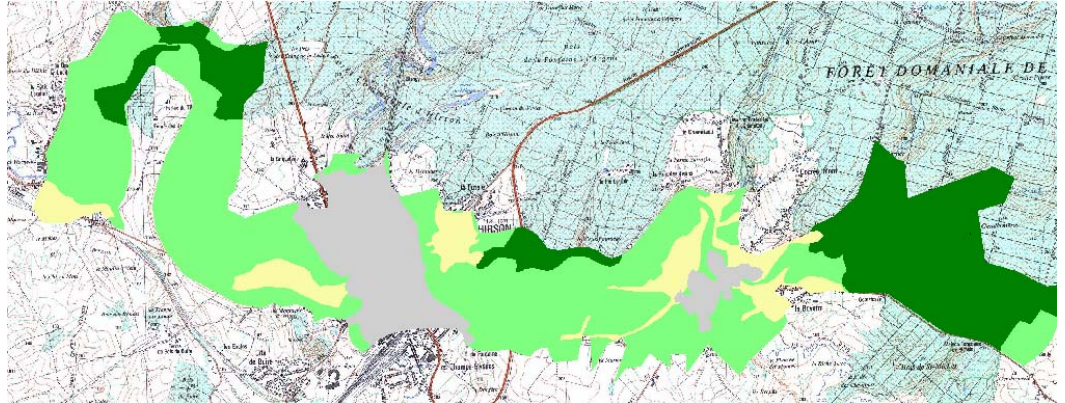
Paramètres du modèle

Le modèle est basé sur un maillage carré de 5m de coté, qui fournit une discrétisation de l'ensemble du territoire.

La rugosité

La rugosité de la vallée au sens de l'étude du phénomène hydraulique est définie selon une analyse de l'occupation du sol du secteur d'étude. Dans la vallée du Petit Gland, quatre grands secteurs d'occupation du sol, et donc de rugosité différente, sont identifiés (cf. **Figure 10-2**).

Figure 10-2 : Zonage de la rugosité utilisée pour la modélisation de l'onde de rupture au barrage



- Zone de forêt (vert foncé) : le coefficient de Strickler est pris égale à $K=15$;
- Zone rurale (vert clair) : le coefficient de Strickler est pris égale à $K=25$;
- Zone semi-urbaine (jaune) : le coefficient de Strickler est pris égale à $K=40$;
- Zone urbaine dense (gris) : le coefficient de Strickler est pris égale à $K=60$.

Des tests de sensibilité ne font pas apparaître une influence marquée du choix de ce paramètre, ce qui est en accord avec le caractère torrentiel du phénomène principalement influencé par la géométrie d'écoulement, la topographie et les obstacles dans la vallée.

Ouvrages de traversée, buses et dalots

Les ouvrages pris en compte dans la modélisation sont :

- le seuil de Sougland : cet ouvrage est modélisé comme un seuil. L'impact hydraulique de l'onde de rupture liée à la rupture du seuil est négligeable comparé à celui de l'onde de rupture du barrage ;
- la RD1050 : cet ouvrage est uniquement modélisé comme un seuil obstacle à l'écoulement, le gabarit des transparences hydrauliques sous routier étant négligeable par rapport au débit de l'onde de rupture. L'impact hydraulique de l'onde de rupture liée à la rupture probable du remblai sous routier est négligeable comparé à celui de l'onde de rupture du barrage ;
- la voie SNCF : le remblai ainsi que les transparences hydrauliques de cet ouvrage sont représentés. Compte tenu du gabarit des transparences hydrauliques, la rupture peu probable de cet ouvrage consécutive à la rupture du barrage est négligée.

Le remblai routier de la RN43 situé en aval de la commune d'Hirson n'est pas modélisé car celui-ci présente un gabarit sous routier trop important pour contrôler les écoulements en cas de rupture du barrage.

Les autres passages souterrains en dalots ou buses sont négligés dans le modèle compte tenu de leur capacité très limitée et des très forts risques d'obstruction susceptibles d'être provoqués par les matériaux transportés par l'onde : végétaux, débris divers à la traversée des espaces urbains et des secteurs d'activité (véhicules, éléments de serres agricoles, etc...).

Conditions aux limites

La condition à la limite amont est l'hydrogramme de l'onde de rupture issu du calcul de Rupro (cf. Erreur ! Source du renvoi introuvable.). Son temps 0, correspond au début de montée de l'hydrogramme.

La condition hydraulique à la limite aval du modèle est définie par la hauteur critique d'écoulement au niveau du village de Neuve-Maison situé à 7 km en aval d'Hirson, ce qui permet de s'affranchir de toute influence hydraulique de la condition limite aval entre le barrage et Hirson. Les résultats des simulations attestent de la validité de cette hypothèse.

La ligne d'eau initiale à $t = 0$ en tout point est supposé nulle (pas de crue dans la vallée lors de la rupture). On néglige donc l'écoulement de début de crue. En revanche comme décrit précédemment l'hydrogramme de rupture tient compte des apports du bassin amont à la décrue mais pas des affluents rencontrés dans la vallée entre le barrage et Hirson.

Résultats du calcul de propagation de l'onde de rupture

Corrections selon les recommandations du CTPB

Les résultats présentés correspondent aux paramètres calculés par le modèle sans majoration selon les recommandations du Comité Technique Permanent des grands Barrages (pour les grands barrages, le CTPB préconise une majoration des tirants d'eau de 1m ou de 15% lorsque elle est supérieure à 1 m, et un réduction des durées de propagation de 13%).

Les résultats de simulation sont illustrés en **annexe 3** par :

- les cartes des hauteurs maximales, des vitesses maximales et des temps d'arrivée de l'onde ;
- les vues descriptives des écoulements localisés ;
- les tableaux et graphes des principaux paramètres.

Evolution de l'onde le long de la vallée

Evolution du débit

Le débit de pointe au moment de la rupture est de 630 m³/s au barrage de Saint Michel. Il s'atténue progressivement lors de la propagation de l'onde dans la vallée :

- au droit de l'abbaye de Saint Michel, le débit de pointe reste élevé et atteint 600 m³/s ;
- en aval du seuil de Sougland, le débit de pointe est de 520 m³/s, il a été écrêté de 17% ;
- en aval du remblai de la RD1050, le débit de pointe est de 500 m³/s,
- l'effet d'étalement des eaux dans la vallée entre la route RD1050 et la voie SNCF conduit à écrêter significativement le débit de pointe estimé à 280 m³/s en amont de la voie SNCF, ce qui représente un taux d'écrêtement de 56 % ;
- dans Hirson, le débit de pointe est de l'ordre de 250 m³/s ;
- A Neuve Maison, le débit de pointe lié à la rupture du barrage de Saint Michel devient négligeable et s'élève à 120 m³/s.

Temps d'arrivée de l'onde et de la pointe

Les temps de propagation ne sont pas modifiés suivant les recommandations du CTPB.

La zone du quart d'heure se situe entre le barrage et 1 km en aval au niveau du franchissement de la RD31. Une dizaine d'habitations, le centre commerciale SHOPI sont situés dans la zone du quart d'heure.

Le front d'onde atteint le centre ville de Saint Michel 2 heures après la rupture et le centre d'Hirson 5 heures après.

Tableau 10-8 : Temps d'arrivée de l'onde après la rupture du barrage de Saint-Michel

	Saint Michel			Hirson		Neuve-Maison
	Confluence	Quartier de l'abbaye	Seuil de Sougland	Entrée d'Hirson (voie SNCF)	Sortie d'Hirson (station d'épuration)	
Temps d'arrivée de l'onde après la rupture	55 minutes	1h05	1h40	2h40	3h45	7h10

Evolution des niveaux d'eau le long de la vallée

L'analyse de la cartographie des hauteurs de submersion maximales traduit :

- Sur Saint Michel : la propagation d'un phénomène peu amorti, ce qui conduit à des hauteurs maximales très élevées,
- les contrôles hydrauliques successifs du remblai routier de la RD1050 et de la voie SNCF conduisent à des hauteurs d'eau élevées en amont. La RD1050 est submergée par des hauteurs maximales de l'ordre de 1,0 m en moyenne sur un tronçon de 300 m. La voie SNCF n'est pas inondée ;
- à Hirson : le débit résiduel de l'onde de rupture reste important, les débordements sont généralisés avec des hauteurs d'eau moyennes dans les rues de l'ordre de 3,0 m
- en aval d'Hirson : du fait du laminage important de l'onde de crue dans les zones agricoles, les débordements sont généralisés mais le débit de pointe lié à la rupture est suffisamment écrêté pour s'apparenter à un phénomène de crue relativement fréquent à Neuve Maison (crue de période de retour estimée à 15 ans, type 2003).

Diagnostic des risques

La zone à risque en cas de rupture de digue du barrage de Saint Michel s'étend en aval jusqu'à la commune d'Hirson.

Dans cette zone, les risques sont systématiquement élevés au droit des bâtiments qui font obstacle à l'écoulement. Dans ces secteurs, les hauteurs de submersion dépassent plusieurs mètres mais les vitesses d'écoulement restent globalement modérées.

Les enjeux les plus exposés sont :

- *Sur Saint Michel :*
 - le quartier Passe Branlante,
 - le quartier de la confluence,
 - l'abbaye et la rue en rive droite,
 - l'usine de Sougland,
- *Sur Hirson :*
 - la RD1050 submergée par 1,0 m de hauteur d'eau,
 - le quartier des Taillis,
 - le centre ville.

10.4.3. Conclusions

L'étude de propagation de l'onde de rupture du barrage de Saint Michel a été réalisée sur l'ensemble de la vallée du Gland et de l'Oise jusqu'à Neuve-Maison, en considérant la rupture par renard de la digue, hypothèse de rupture qui conduit à un débit de pointe de 630 m³/s en aval immédiat de la retenue.

La propagation de l'hydrogramme de rupture dans la vallée met en évidence les phénomènes suivants :

- le phénomène est relativement rapide, la majorité du volume de la retenue s'écoule en moins de quatre heures au travers de la brèche, l'onde de rupture met moins d'une heure pour arriver à Saint Michel et trois heures pour arriver à Hirson ;
- l'onde de rupture est peu amortie jusqu'en aval de Saint Michel ;
- les contrôles hydrauliques successifs du remblai routier de la RD1050 et de la voie SNCF conduisent à des hauteurs d'eau élevées en amont ;
- la zone à risque en cas de rupture de digue du barrage de Saint Michel s'étend jusqu'en aval d'Hirson. Dans cette zone, le fond de la vallée est affecté par les inondations, avec des hauteurs de submersion maximales pouvant dépasser plusieurs mètres. Les enjeux les plus exposés sont :
 - sur Saint Michel : le centre ville, l'abbaye et la rue en rive droite, l'usine de Sougland,
 - sur Hirson : la RD1050 submergée par 1 m de hauteur d'eau, le quartier des Taillis, le centre ville.
- en aval : les débordements sont généralisés mais le débit de pointe lié à la rupture est suffisamment écrêté pour s'apparenter à un phénomène de crue relativement fréquent type crue de 2003 (période de retour 15 ans).

11. Etude de réduction des risques

Le projet d'aménagement d'une aire d'écroulement des crues du Petit Gland sur le site de Saint Michel est assorti d'un risque lié à la libération totale ou partielle du volume d'eau stocké par la retenue en cas de rupture de digue.

L'analyse détaillée du risque de rupture réalisée dans le paragraphe précédent montre que le risque de rupture est très peu probable. Bien que les conséquences d'une rupture de digue soient très importantes en aval, la rareté du phénomène rend le risque de rupture « tolérable » sous condition de respecter strictement le protocole d'entretien de l'ouvrage (fréquence et degré de surveillance du dispositif d'auscultation, d'entretien et d'exploitation courante) et de former les organismes compétents des mesures à suivre en cas d'urgence.

L'ensemble des mesures déjà intégrées au projet pour réduire le risque de rupture de digue sont présentées dans le **Tableau 11-1**.

Tableau 11-1 : Mesures actuelles intégrées au projet de digue de Saint Michel pour réduire le risque lié à une rupture de digue

Mesures préventives	Phénomènes aggravant
Grille cadenassée en crête limitant l'accès aux organes de manœuvres des vannes	Vandalisme
Local technique muni d'une porte métallique avec serrure anti-infraction	Vandalisme
Possibilité de commande manuelle des vannes à partir d'abaques à établir	Vandalisme, dysfonctionnement
Alarme de télésurveillance	Vandalisme, dysfonctionnement
Conception spéciale du tablier pour résister à la torsion et aux chocs	Dysfonctionnement
Inspections, nettoyages et manœuvres réguliers	Dysfonctionnement
Batteries de secours activées automatiquement	Dysfonctionnement
Contrôles réguliers des dispositifs d'auscultation, Entretien régulier	Détérioration, destabilisation, formation de renard
Accès prévus latéralement à la digue, accès limités aux troupeaux	Détérioration, destabilisation, formation de renard
Enherbement de la digue et enrochements en pied et des berges	Détérioration, destabilisation, formation de renard
Pente conservatrice des talus de digue	Détérioration, destabilisation, formation de renard
Prises en compte des dispositions parasismiques pour le choix des matériaux constituant le corps de digue	Séisme
Formation des organismes compétents et de la population au protocole d'intervention en cas de surveillance renforcée du site et en phase d'alerte	Désordres et mouvements de panique

Les mesures complémentaires qui permettraient de réduire encore le risque de rupture consisteraient en :

- la mise en place à l'échelle du département d'une cellule de prévision des crues
- la surveillance des ondes sismiques au droit du site.

Annexes :

Annexe 1 : Présentation du logiciel RUPRO

Annexe 2 : Présentation du logiciel Dunamic 2D

Annexe 3 : Cartographie des paramètres de propagation de l'onde de rupture du barrage de Saint Michel

Annexe 1 : Présentation du logiciel Rupro

Présentation des logiciels RUPRO - RUBAR3 et RUBAR BE

Le logiciel RUPRO permet le calcul de l'hydrogramme de rupture d'un barrage en terre homogène.

Le logiciel RUBAR 3 permet le calcul de propagation de l'onde de rupture en monodimensionnel et plus généralement tout écoulement qui suit les équations de Saint-Venant.

Le logiciel RUBAR BE permet d'associer une modélisation du transport solide à la modélisation hydraulique des écoulements.

Ces logiciels complémentaires ont été développés par le CEMAGREF.

Le logiciel RUPRO

Le logiciel RUPRO couple, par une méthode de RUNGE-KUTTA, un calcul hydraulique déterminant les variables hydrauliques moyennes sur la digue à un calcul de transport solide qui suppose l'érosion uniforme dans l'ensemble de la digue.

La digue est décrite par un profil en travers type et la retenue par des couples hauteur-surface.

Le logiciel permet de simuler 2 types de rupture :

- une érosion par renard; le renard est schématisé par une conduite circulaire qui s'élargit progressivement (le point bas du cercle restant fixe) jusqu'à ce que son diamètre atteigne les 2/3 de la hauteur du barrage; il y alors effondrement et la brèche devient rectangulaire puis s'élargit (sans s'approfondir)
- une érosion par submersion; la brèche est supposée rectangulaire; elle s'approfondit sans s'élargir jusqu'à atteindre le substratum puis s'élargit jusqu'à atteindre la longueur du barrage à moins que la retenue ne se soit vidée auparavant

L'élargissement progressif de la brèche dépend des propriétés des matériaux composant la digue :

- Le diamètre moyen D_{50} des matériaux
- Leur masse volumique
- Leur porosité
- Le coefficient de Strickler de l'écoulement hydraulique sur et dans la digue

Il est possible d'introduire un hydrogramme incident à l'amont de la retenue ainsi qu'un débit de fuite au niveau du barrage qui corresponde, par exemple, à un évacuateur continuant à débiter pendant la phase de vidange de la retenue à travers la brèche.

Les résultats de cette modélisation sont les caractéristiques de la brèche (taille et temps de formation) et l'hydrogramme qui en résulte.

Le logiciel RUBAR3

Le logiciel RUBAR3 permet la simulation d'écoulements transitoires en régime torrentiel et en régime fluvial. Il a été développé plus particulièrement pour l'étude de propagation d'ondes de rupture de barrages.

Le modèle permet de simuler la propagation d'une onde issue soit d'une rupture instantanée de barrage (on partira d'un mur d'eau), soit d'une rupture progressive (pour laquelle on connaît l'hydrogramme au droit du barrage, calculé par le logiciel RUPRO).

Le code RUBAR 3 résout les équations complètes de Barré de Saint Venant par une méthode explicite. Cette dernière utilise un schéma de type Godounov du second ordre. A chaque pas, le problème de Riemann est résolu de façon approchée grâce à une linéarisation de Roe.

Les hypothèses simplificatrices habituelles sont faites pour permettre la schématisation des équations de Saint-Venant :

- l'écoulement est considéré unidimensionnel avec toutes les hypothèses s'y rattachant. La vallée est rectifiée en déployant les courbes,
- la géométrie de la vallée est supposée ne pas présenter de brusques singularités (en particulier elle est relativement régulière entre les profils en travers choisis pour la représenter),
- la distribution des pressions dans l'écoulement est supposée hydrostatique et les effets de viscosité à l'intérieur du fluide sont supposés négligeables par rapport aux frottements externes,
- le frottement est très global, le coefficient de Manning Strickler rend compte de nombreux phénomènes (nature des rives, courbures, occupation du lit, etc.).

La topographie de la vallée dans laquelle s'effectue la propagation est décrite par une série de profils en travers. Le calcul s'effectue entre des sections de calcul (pas d'espace constant ou variable) dont la géométrie est déterminée par interpolation entre les profils en travers donnés.

La condition limite amont est constituée :

- soit par un hydrogramme (auquel peut être associée une hauteur amont imposée)
- soit par une condition de réflexion (débit nul à tout instant)
- soit par un limnigramme (simulation d'un réservoir à niveau constant par exemple).

La condition limite aval est :

- soit une courbe de tarage ($Q(z)$)
- soit une réflexion,
- soit une cote donnée en fonction du temps ($z(t)$),
- soit un flux libre (dérivées nulles)
- soit un régime uniforme.

Les conditions initiales sont fixées en tirant d'eau (ou cote) et vitesse (ou débit) dans chaque section de calcul par l'utilisateur.

Le pas de temps et le pas d'espace peuvent être soit fixes, soit variables (des variations trop brutales engendrent cependant des perturbations numériques).

Ainsi, RUBAR 3 traite les discontinuités hydrauliques comme des points ordinaires. Contrairement à la plupart des modèles de propagation d'onde de rupture qui traitent la propagation du front d'une manière séparée (méthode du Shock fitting), RUBAR 3 intègre le front dans le modèle. Les passages en torrentiel et les ressauts sont également traités comme des points courants.

La version de base de RUBAR3 ne calcule les écoulements que dans un bief alors qu'une autre version permet de prendre en compte plusieurs biefs (confluence ou défluence possibles). Une troisième version permet de calculer le transport par charriage et d'en déduire la déformation du lit.

Logiciel RUBAR BE

Le code RubarBE, développé par le CEMAGREF de Lyon, est basé sur la résolution des équations de Saint Venant couplées à une équation d'Exner pour les sédiments. Le schéma numérique est explicite, ce qui permet une forte stabilité numérique, qui autorise le calcul de propagation d'ondes de rupture de barrage aussi bien que les crues en rivière de montagne.

Différentes formules de transport de sédiments peuvent être utilisées (Meyer-Peter-Müller ou Smart-Jaeggi étant vraisemblablement retenue ici). L'évolution du fond est calculée à partir de contraintes locales, ce qui permet de répartir le volume de sédiments déposé ou érodé (estimé par le calcul 1D de transport dans l'axe de la vallée) sur la section en travers de manière réaliste.

Validation

Ces logiciels ont fait l'objet de nombreuses validations et comparaisons avec d'autres outils de calcul similaires, par le CEMAGREF. Largement utilisés en France, par le CEMAGREF et de nombreux bureaux d'études (dont STUCKY), ils ont servi à la définition de nombreux PPI sous contrôle du Comité Technique Permanent des Barrages.

Les références

Barrage de Saint Calais du Désert (Mayenne) – h=35 m – Dec. 1994 – Conseil Général
<ul style="list-style-type: none">• Rupture par surverse et par renard.• Propagation sur 45 km (dossier soumis au CTPB)• Logiciel Rubar 3
Barrage de Combani (Mayotte) – h=20 m – Mars 1996 – Collectivité territoriale
<ul style="list-style-type: none">• Rupture par surverse et par renard.• Propagation sur 10 km. Analyse du risque pour les villages aval• Logiciel Breach Dambreak
Barrage de Dzoumogné (Mayotte) – h=20 m – Fev. 1998 – Collectivité territoriale
<ul style="list-style-type: none">• Rupture par surverse et par renard.• Propagation sur 5 km.• Analyse du risque pour l'agglomération de Dzoumogné• Logiciel Breach Dambreak
Bassin de décantation industriel (Meurthe et Moselle) – 4 hm³– Fev. 1997 – SOLVAY
<ul style="list-style-type: none">• Rupture par surverse et par renard.• Propagation de l'onde de rupture dans la plaine de la Meurthe.• Analyse du risque pour les zones urbaines et les infrastructures touchées par l'onde• Logiciel Breach Dambreak
Le Loch en aval du barrage de Tréauray (Morbihan) – Nov.1994 – SIVOM
<ul style="list-style-type: none">• Effacement instantané du barrage à contreforts.• Propagation de l'onde de rupture jusqu'à l'estuaire• Logiciel Rubar 3
Digue de l'étang de Lindre (Moselle) - 7 m, 15 hm³ – Juin 2002 – Conseil général
<ul style="list-style-type: none">• Rupture par renard.• Propagation de l'onde sur 25 km.• Logiciel Rubar 3
Digues de l'Isère en Combe de Savoie— Juin 2002 – Conseil général
<ul style="list-style-type: none">• 9 Ruptures simulées par renard ou par surverse dans le lit majeur de l'Isère• Propagation de l'onde sur 5 km en moyenne• Logiciel Rupro pour l'étude de l'onde de rupture au droit de la brèche• Logiciels Carima (pseudo-2D) ou Dunamic 2D selon les conditions hydrauliques initiales dans le lit majeur

Annexe 2 : Présentation du logiciel Dunamic 2D

Présentation du logiciel DUNAMIC 2D

1- Présentation générale

HydroCosmos a développé le logiciel DUNAMIC 2D qui résout les équations complètes de St-Venant (représentatives des écoulements à surface à libre) par la méthode des volumes finis.

Les plus récents développements de l'hydraulique numérique y sont intégrés. Les flux aux interfaces des éléments sont résolus avec l'algorithme HLL (Harten, Laax, van Leer) modifié par Toro. Les termes sources sont traités de manière particulière pour permettre une simulation sur topographie réelle.

Ce logiciel autorise l'analyse non-stationnaire de tous les écoulements bidimensionnels. La numérique utilisée permet évidemment l'étude des écoulements en régime mixte (fluvial, torrentiel) et le positionnement automatique des ressauts, mais également l'analyse de la propagation de fronts sur un terrain sec. Il est particulièrement adapté pour la modélisation de propagation d'onde occasionnée par exemple, par une rupture de digue ou de barrage.

Le logiciel basé sur une interface graphique (DUMAP) permet :

- Le traitement de la topographie et la création du modèle numérique de terrain ;
- La saisie des paramètres hydrauliques ;
- Le calcul proprement dit ;
- La restitution des résultats dans une base de données et le traitement des données (synthèses, graphes, cartographies).

1-1 L'interface DUMAP

<http://www.hydrocosmos.ch/outils/Dumap/Dumap.jpg> Les outils de modélisation numérique des écoulements bidimensionnels sont aujourd'hui d'usage courant dans le cadre des projets de protection contre les crues, d'aménagement de rivières et d'évaluation des risques suite à une rupture de digue, de barrage ou de conduite.

Ces outils se basent tous sur un modèle numérique de terrain qui doit être élaboré à partir de données se présentant sous divers formats :

- semis de points XYZ relevés par un géomètre ;
- profils en travers d'un cours d'eau ;
- plans topographiques.

En outre, les plans cadastraux contiennent également des informations importantes, comme la situation d'infrastructures sensibles ou la position des bâtiments qui constituent un obstacle à l'écoulement sur les surfaces inondées.

Afin de pouvoir intégrer toutes ces informations géoréférencées dans une simulation numérique d'un écoulement bidimensionnel, HydroCosmos a développé l'interface Dumap. Ce logiciel est utilisé comme pré- et post-processeur pour le logiciel DUNAMIC 2D.

Dumap permet de représenter et d'éditer les images géoréférencées, les semis de points, les TIN, les MNT, les shape files de ArcVIEW, les fichiers DXF d'AutoCAD 2002, les fichiers HEC-RAS et évidemment les modèles 2D de Dunamic 2D.

1-2 Description du logiciel Dunamic 2D

La simulation de la propagation de l'eau sur le terrain se fera à l'aide d'un modèle hydraulique 2D non-stationnaire. Le logiciel retenu est *Dunamic 2D* développé en interne par Dr Jérôme Dubois pour HydroCosmos SA.

L'hydraulique non-stationnaire à surface libre est régie par l'équation de St-Venant, connue depuis fort longtemps. En deux dimensions et dans sa forme conservative, elle s'écrit :

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} h \\ q \\ r \end{pmatrix} + \frac{\partial}{\partial x} \begin{pmatrix} q \\ \frac{q^2}{h} + \frac{1}{2}gh^2 \\ \frac{qr}{h} \end{pmatrix} + \frac{\partial}{\partial y} \begin{pmatrix} r \\ \frac{rq}{h} \\ \frac{r^2}{h} + \frac{1}{2}gh^2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -S \\ gh \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\tau_{bx}}{\rho} \\ gh \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{\tau_{by}}{\rho} \end{pmatrix} = 0$$

avec :

h	hauteur d'eau
q	débit unitaire selon l'axe x
r	débit unitaire selon l'axe y
S	terme source
z	altitude du sol
τ_{bx}	contrainte de cisaillement sur le sol dans la direction x
τ_{by}	contrainte de cisaillement sur le sol dans la direction y
ρ	masse volumique de l'eau

Ce système d'équations différentielles est de nature hyperbolique. Sa solution admet des discontinuités (des chocs, comme un ressaut hydraulique par exemple), ce qui rend sa résolution particulièrement délicate.

Sous forme vectorielle, cette équation s'écrit :

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} + \mathbf{S} = 0$$

où \mathbf{U} est le vecteur des variables primaires, et \mathbf{F} et \mathbf{G} sont les flux selon x et y .

Ces équations sont résolues à l'aide de la méthode des volumes finis. Sans entrer dans trop de détails, sur la base de volumes finis carrés de côté Δx et orientés selon les axes principaux, en une dimension par simplicité, une solution numérique explicite et conservative peut s'écrire :

$$\mathbf{U}^{n+1} = \mathbf{U}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(\tilde{\mathbf{F}}_{i+\frac{1}{2}} - \tilde{\mathbf{F}}_{i-\frac{1}{2}} \right)$$

où n désigne le pas de temps et $\tilde{\mathbf{F}}$ est un flux numérique qui approxime le flux moyen temporel à travers chaque frontière des volumes finis. Evidemment, toute la difficulté réside dans l'estimation de ce flux numérique, difficulté connue sous le nom de problème de Riemann.

Le problème de Riemann à résoudre à travers chaque frontière entre les éléments est traité à l'aide de l'algorithme dénommé HLL, du type *Flux Difference Splitting*, et proposé en 1983 par Harten, Lax et van Leer. La célérité des ondes, également lors d'une propagation sur fond sec, est estimée selon la proposition faite par E. F. Toro en 1995. Actuellement, ce schéma numérique est implémenté dans le logiciel *Dunamic 2D* avec une précision du premier ordre dans l'espace et dans le temps.

2 Mise en œuvre du logiciel

2-1 Construction du modèle

Le modèle topologique exploité par DUNAMIC 2D est un Modèle Numérique de Terrain intégrant, sous forme d'un semis de point et de segment positionnés dans l'espace, les données topographiques du lit majeur et bathymétriques du cours d'eau modélisé.

Si des variantes d'aménagement sont envisagées, il est possible de modifier facilement les données topographiques grâce à l'interface DUMAP très simple à l'utilisation.

A partir du modèle numérique de terrain, DUNAMIC 2D réalise une triangulation selon la méthode de Delaunay permettant de connaître l'ensemble des propriétés topologiques en chaque point du plan étudié.

Après triangulation, un pas d'espace est fixé pour définir les dimensions du maillage carré. Chaque maille constituant l'élément de volume unitaire nécessaire à la résolution du code de calcul, la valeur du pas d'espace est fixée de manière à obtenir la meilleure précision du modèle tout en garantissant une durée de calcul correcte.

A partir de « l'ossature » mise en place, le code de calcul résout les équations complètes de Barré de Saint-Venant, sous certaines hypothèses, entre chaque maille du modèle et à chaque pas de temps en régime transitoire.

2-2 Conditions aux limites

Les conditions aux limites doivent être définies sur l'ensemble de la périphérie du plan modélisé et sont données par :

- Un débit ou un hydrogramme (entrant ou sortant du modèle),
- Un niveau ou un limnigramme,
- Une loi hauteur débit en imposant le nombre de Froude constant ;
- Un mur imperméable.

2-3 Condition initiale

Une solution complète (Q_x, Q_y, h) observée au temps $t=0$ doit être fournie en tout point du modèle.

2-4 Représentation des ouvrages hydrauliques

DUNAMIC 2D n'intègre pas directement les singularités physiques des écoulements (seuils, orifices, lois de frottement, conduites en charge,...).

Une singularité, selon sa nature, est représentée sous DUNAMIC 2D: soit en modifiant le modèle numérique de terrain soit en calculant séparément la loi hauteur/débit et en introduisant cette loi dans le modèle comme un terme source (phénomène de perte ou d'apparition d'eau dans le modèle en un point du plan et pour un temps donné).

2-5 Calage du modèle

Hors configuration où le terrain est initialement sec et la simulation n'a jamais été observée dans la réalité, il convient de procéder au calage du modèle, puis à sa validation. La philosophie générale consistant à reproduire, par le calcul, les observations effectuées pour un événement caractéristique.

Le réglage s'effectue principalement en ajustant les coefficients de frottements de chaque maille.

Le calage est considéré suffisant lorsque les écarts sont faibles et acceptables entre les observations (niveaux maximaux en général) et les paramètres calculés. L'appréciation du calage et de sa précision sont de la responsabilité du modélisateur et dépendent du phénomène étudié.

2-5 Exploitation du modèle

Le code de calcul DUNAMIC 2D bénéficie d'une interface conviviale grâce à l'outil DUMAP sous WINDOWS, ce qui le rend simple et facile à utiliser.

La construction du modèle se fait de façon attractive et didactique, grâce à des menus déroulants.

De nombreuses fonctionnalités sont disponibles autour du code de calcul :

- Visualisation graphique de l'ossature du modèle,
- Extraction de profils en travers,
- Dessin de profils en long hydraulique,
- Cartographie des paramètres hydrauliques à différents pas de temps et des maxima,
- Visualisation dynamique des phénomènes par enchaînement des séquences à différents pas de temps.

2-5 Fonctionnalités et utilisation

STUCKY Ingénieurs Conseils en partenariat avec HYDROCOSMOS met en œuvre le logiciel DUNAMIC 2D pour tout projet nécessitant une analyse hydraulique détaillée.

Les développements du logiciel ou de modules complémentaires sont assurés par HYDROCOSMOS.

3- Principales références

3-1 Etudes réalisées par HYDROCOSMOS

Ruppen SA. Embouchure du Rhône dans le Léman (Suisse). Simulation de l'effet d'un épi sur l'érosion des berges. 2001.

White Sands. Marina au Bouveret (Suisse). Etude de l'alimentation en eau fraîche des bassins pour maintenir une bonne qualité d'eau. 2001.

SRCE, Section Bas-Valais. Rhône à Vouvry(Suisse). Étude de capacité hydraulique et de la protection de la rive. 2001.

SRCE, Section Bas-Valais. Rhône à Riddes (Suisse). Étude des possibilités de protection des berges contre l'érosion. 2000.

Stucky SA. Lac Sarez(Tadjikistan). Simulation d'une onde de crue suite à la rupture de la digue pour l'installation d'un système d'alarme eau. 2002.

SRCE. Conduite forcée de Chandoline (Suisse). Simulation de la propagation d'une vague suite à un accident de chantier de route provoquant une rupture de la conduite forcée. 2002.

3-2 Etudes réalisées en partenariat HYDROCOSMOS – STUCKY Ingénieurs Conseils France

SICEC. Bras de décharge de la Leysse (Savoie – France). Optimisation de l'ouvrage de dérivation des crues 130 m³/s. 2003.

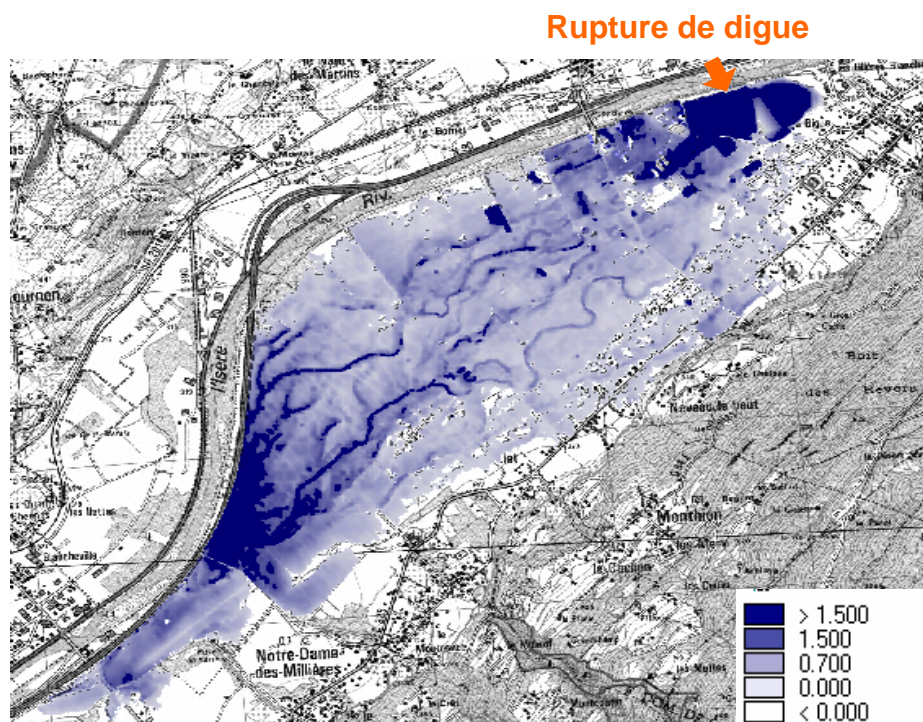
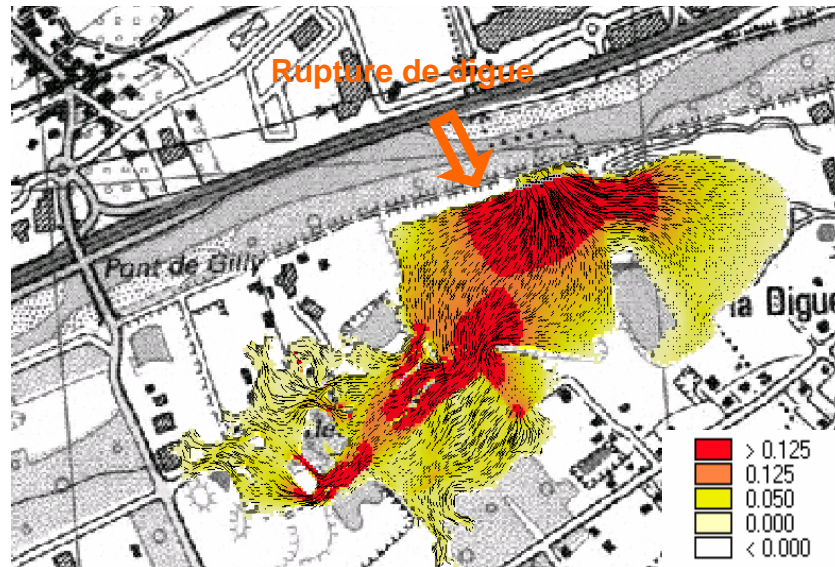
Préfecture de la Savoie. PPRI de la Combe de Savoie (France). Simulation de l'onde de rupture des digues de l'Isère, entre Gilly sur Isère et Sainte Hélène sur Isère. 2006.

Ville de Nîmes. Renouvellement urbain du quartier Hoche Sernam (France). Simulation des écoulements en crue en milieu urbain et définition du projet d'aménagement. 2006 en cours.

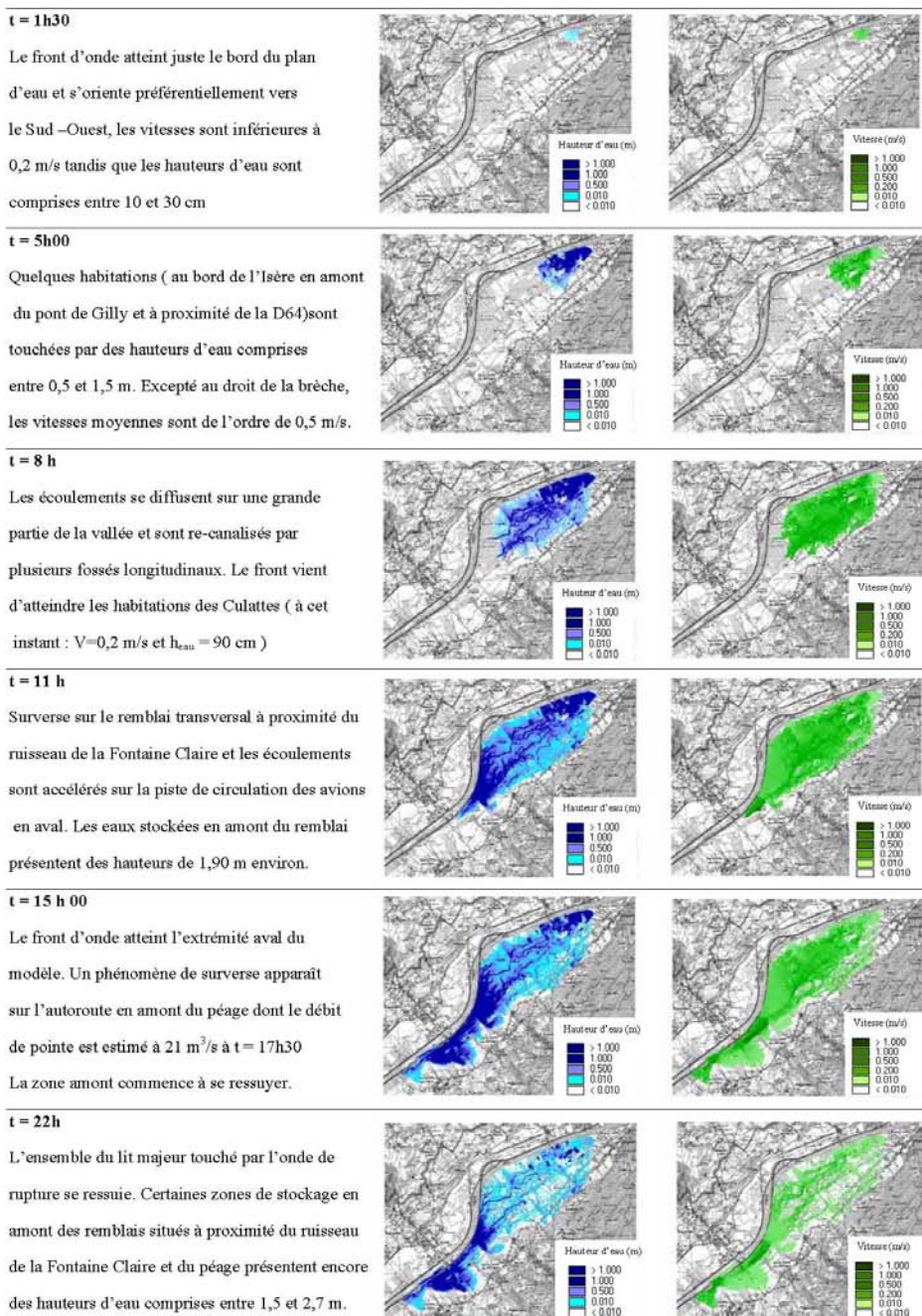
Grand Lyon. Etude de l'onde de rupture d'un barrage écrêteur de crue du ruisseau du Ravin – Simulation de l'onde de rupture sur 2 km entre le barrage et la confluence du ruisseau avec la Saône.

4-Illustrations cartographiques

PPRI de l'Isère en Combe de Savoie - Modélisation de rupture de digue par DUNAMIC 2D
– Cartographie des niveaux maximaux et des débits maximaux.



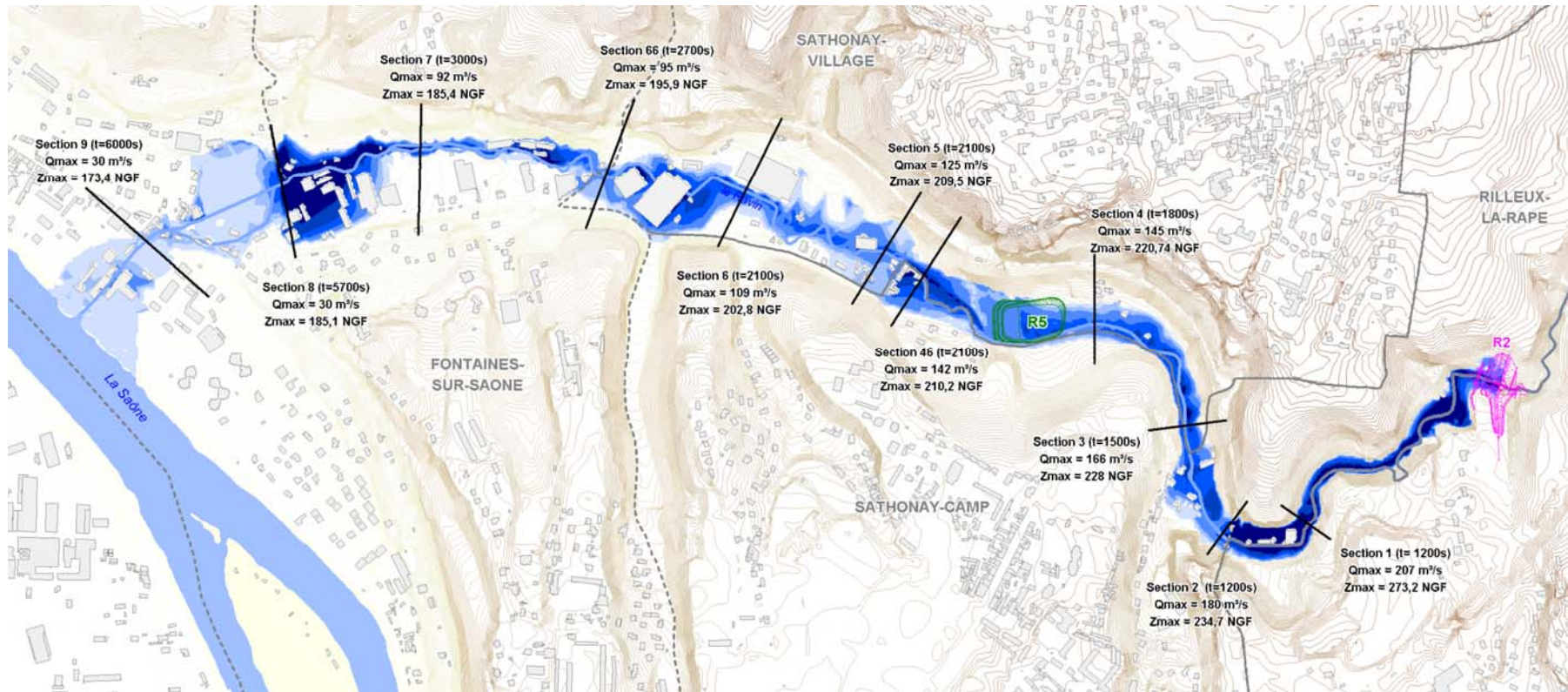
PPRI de l'Isère en Combe de Savoie - Modélisation de l'onde de rupture de digue par DUNAMIC 2D. Séquences de propagation de l'onde de rupture



Projet de renouvellement urbain du quartier Hoche-Sernam à Nîmes- Etude de la propagation de la crue de 1988 – Hauteurs d'eau (m)



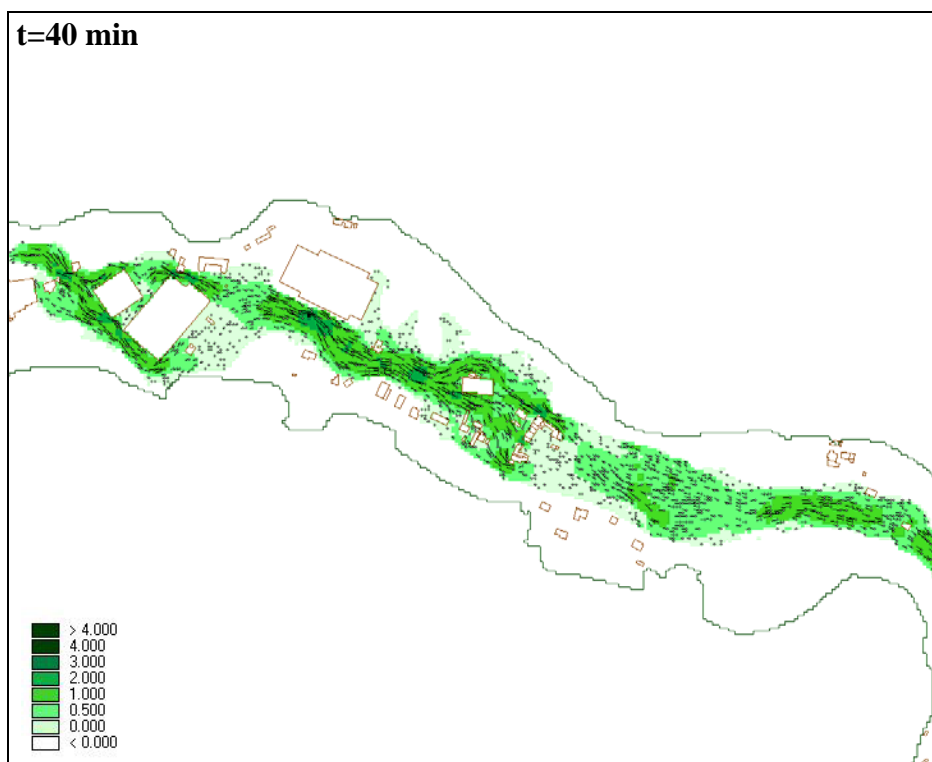
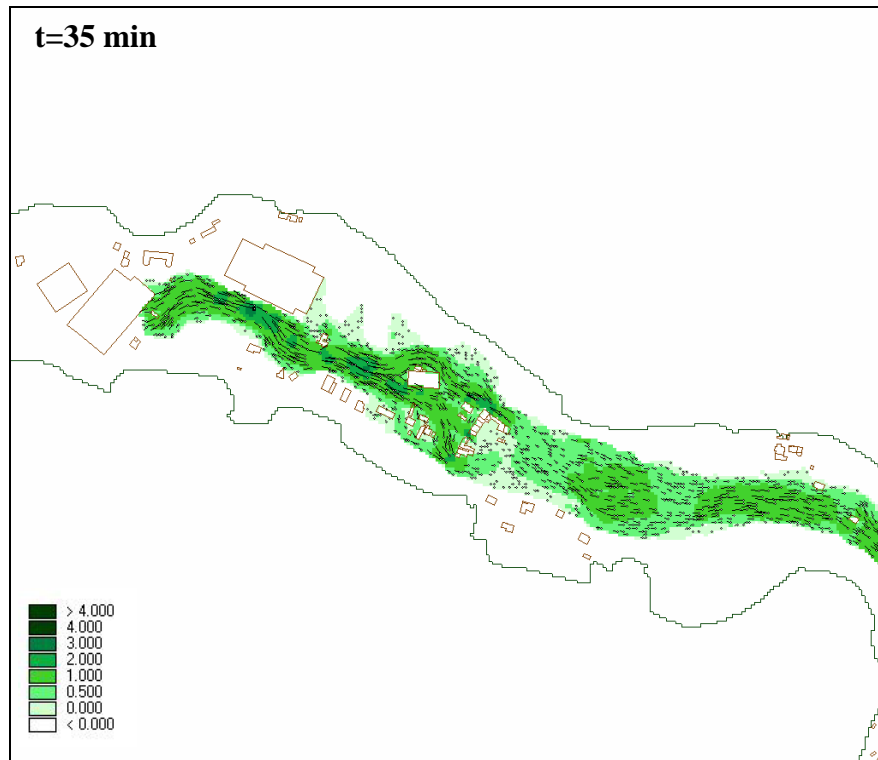
Réalisation de deux ouvrages écrêteurs de crue sur le bassin versant du Ravin (69) Etude des ondes de rupture- Hauteurs maximales pendant la propagation de l'onde de rupture du barrage R2 dans le lit majeur du Ravin



Hauteur maximale en mètre :

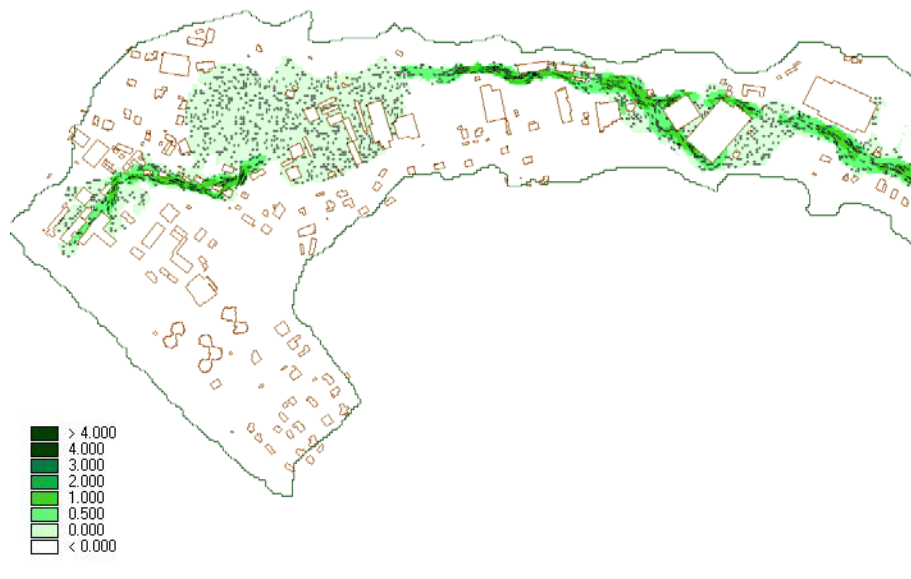


Réalisation de deux ouvrages écreteurs de crue sur le bassin versant du Ravin
(69) Etude des ondes de rupture- Evolution des vitesses (m/s)
pendant la propagation de l'onde de rupture du barrage R2 dans le
lit majeur du Ravin – ZOOM 1

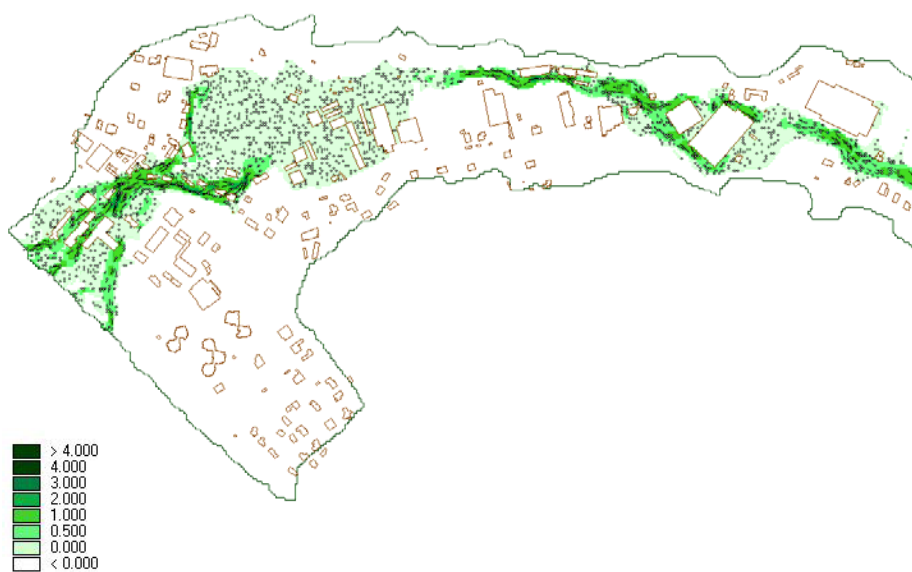


**Réalisation de deux ouvrages écreteurs de crue sur le bassin versant du Ravin
(69) Etude des ondes de rupture- Evolution des vitesses (m/s)
pendant la propagation de l'onde de rupture du barrage R2 dans le
lit majeur du Ravin – ZOOM 2**

t=1h20min



t=1h30min



Annexe 3 : Cartographie des paramètres de propagation de l'onde de rupture du barrage de Saint Michel

Carte 1 : Présentation de la zone d'étude

Carte 2 : Hauteur maximale de l'onde de rupture

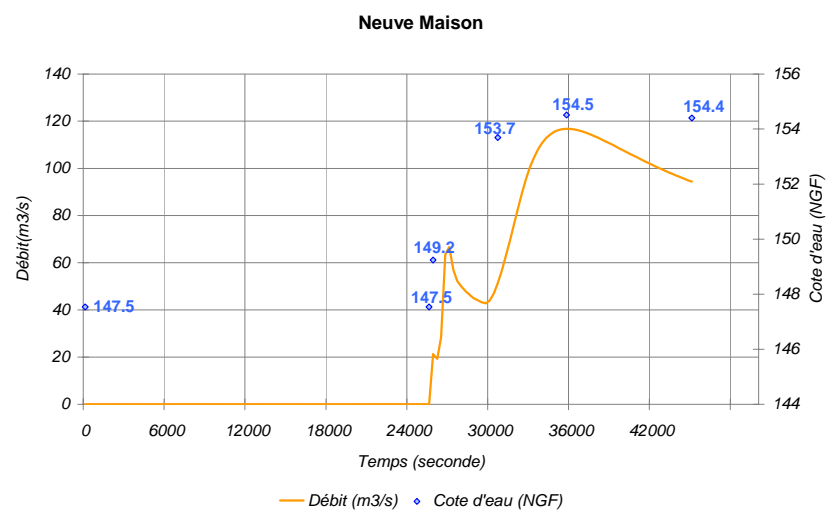
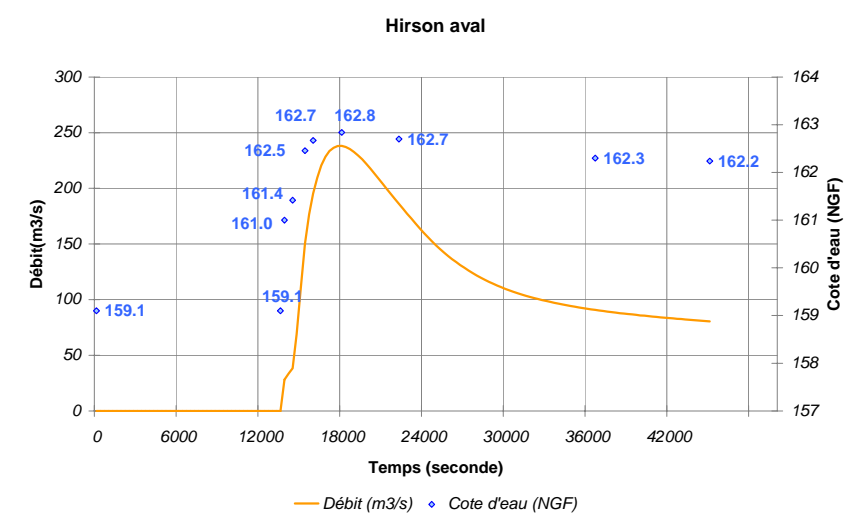
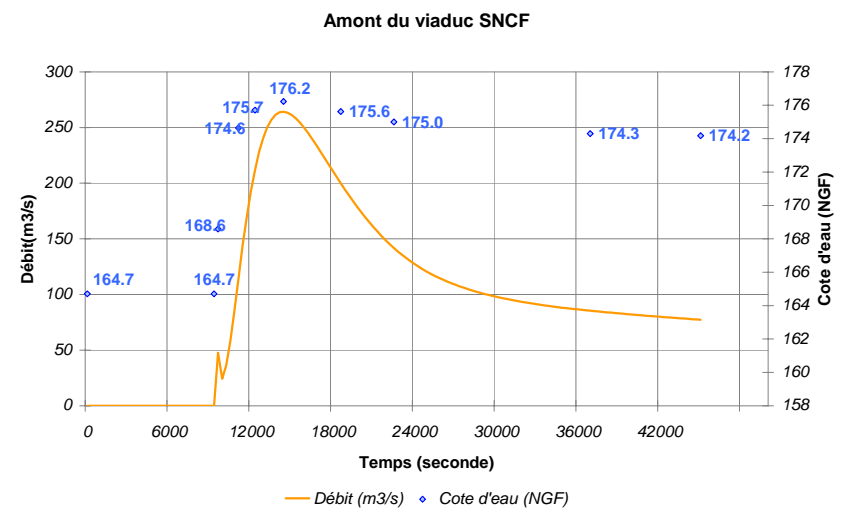
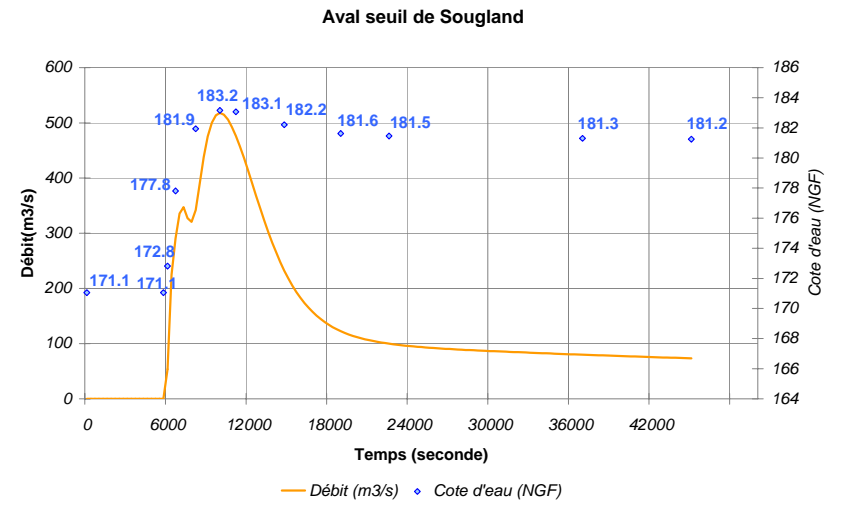
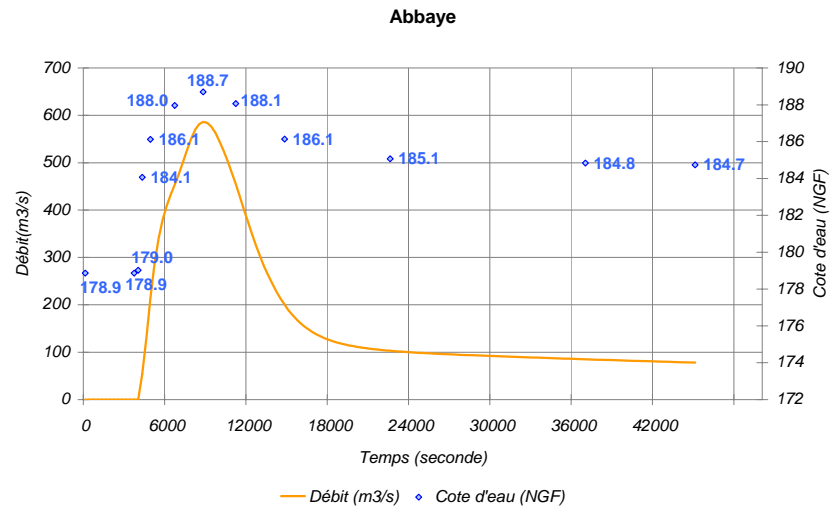
Carte 3 : Vitesse maximale de l'onde de rupture

Carte 4 : Arrivée du front d'onde

Carte 5 : Evolution des vitesses pendant la propagation de l'onde de rupture

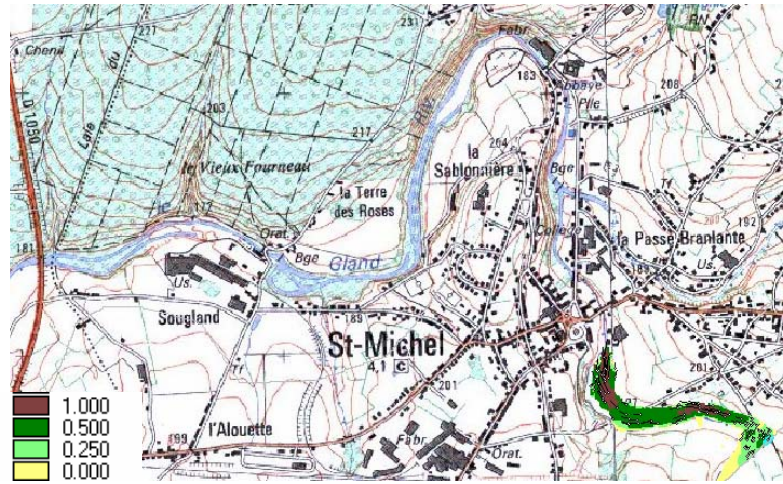
Carte 6 : Evolution du niveau d'eau en différents points de la vallée (cf. implantation sur la carte 2) pendant la propagation de l'onde de rupture du barrage de Saint Michel

Evolution du niveau d'eau en différents points de la vallée (cf. implantation sur la carte 2) pendant la propagation de l'onde de rupture du barrage de Saint Michel

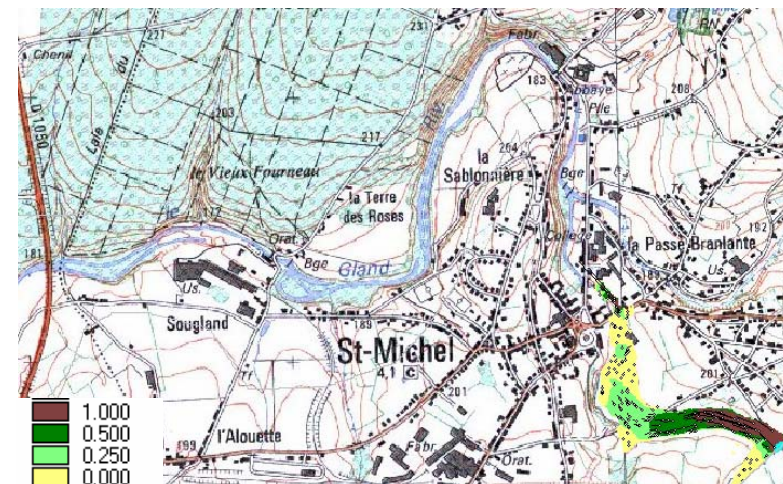


Evolution des vitesses (m/s) pendant la propagation de l'onde de rupture du barrage de Saint Michel sur Saint Michel

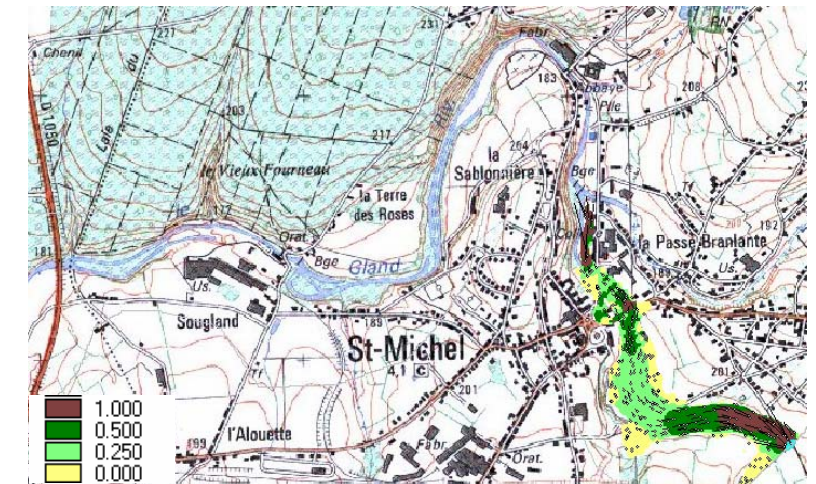
t= 5 min



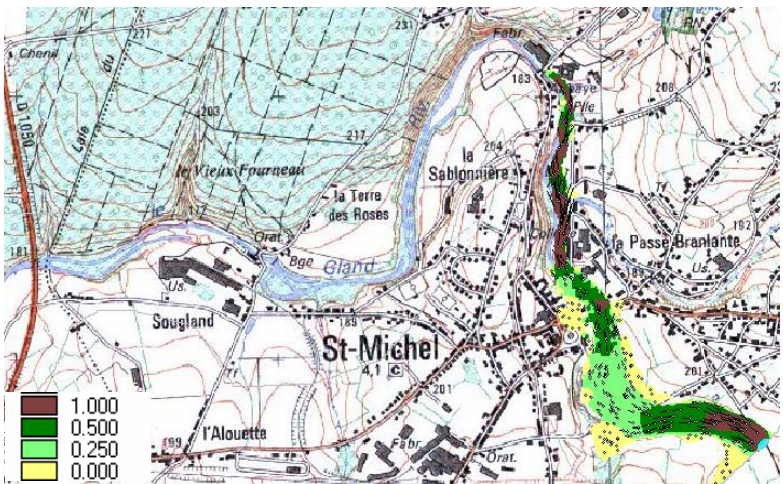
t= 40 min



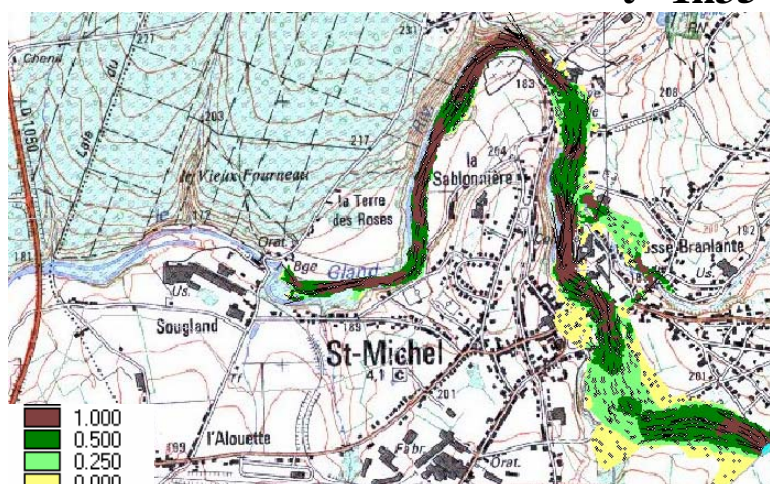
t= 55 min



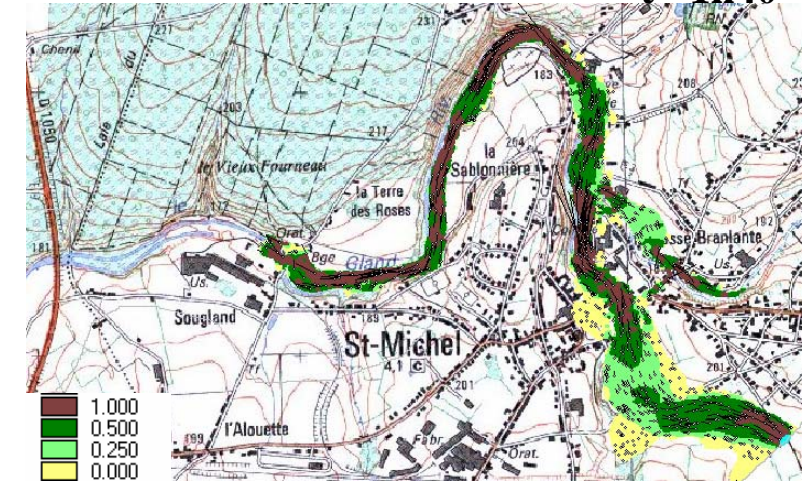
t= 65 min



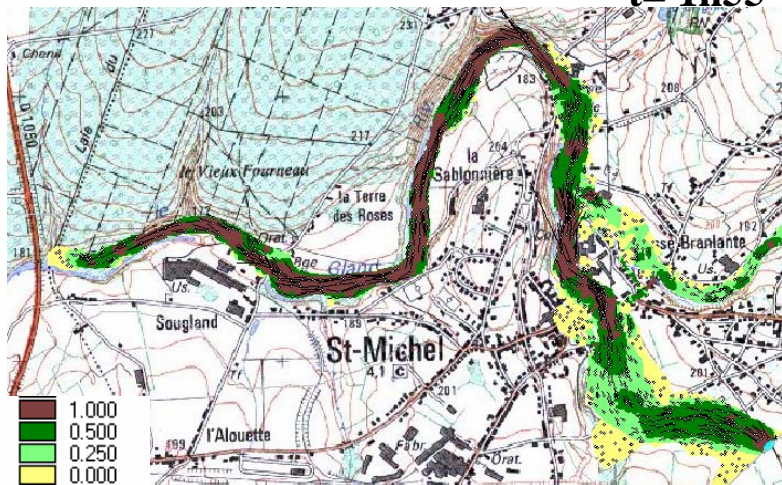
t= 1h35



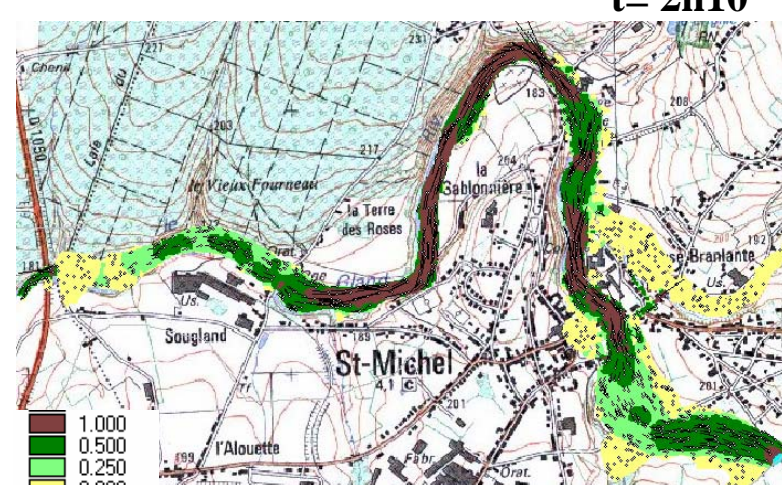
t= 1h40



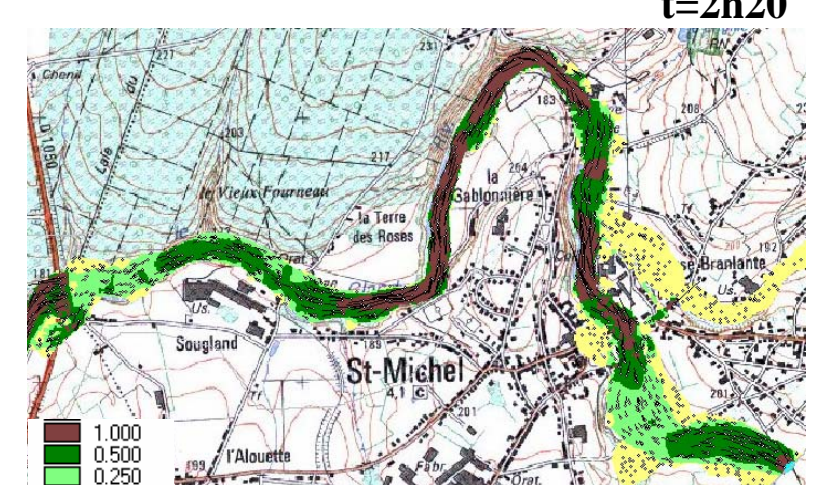
t= 1h55



t= 2h10

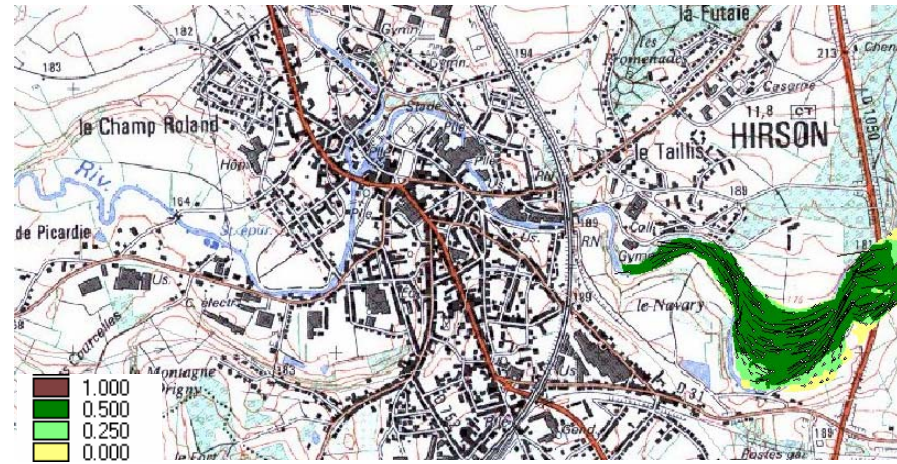


t=2h20

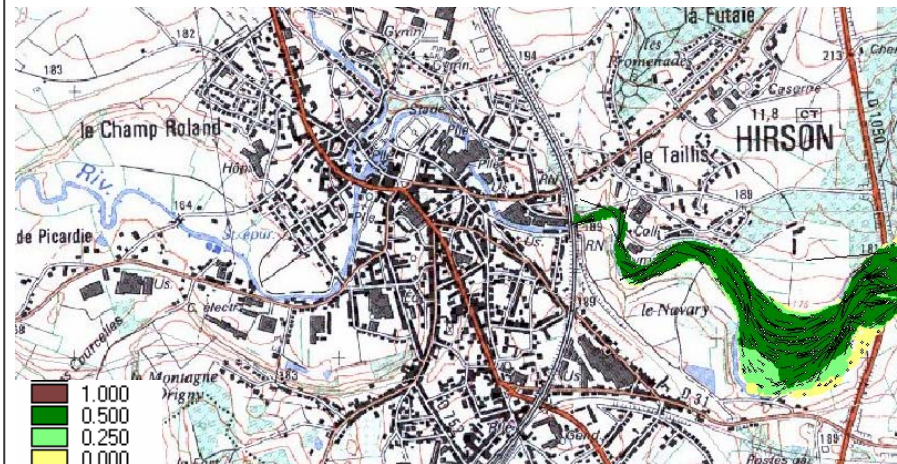


Evolution des vitesses (m/s) pendant la propagation de l'onde de rupture du barrage de Saint Michel sur Hirson

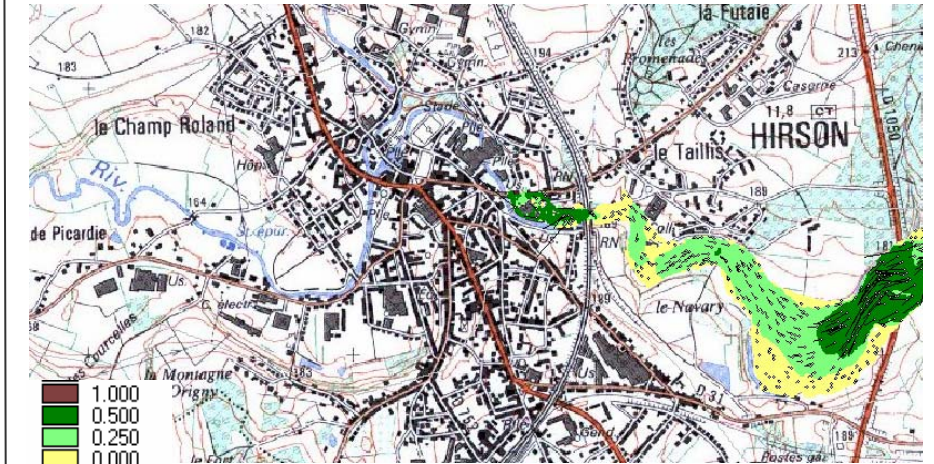
t= 2h35



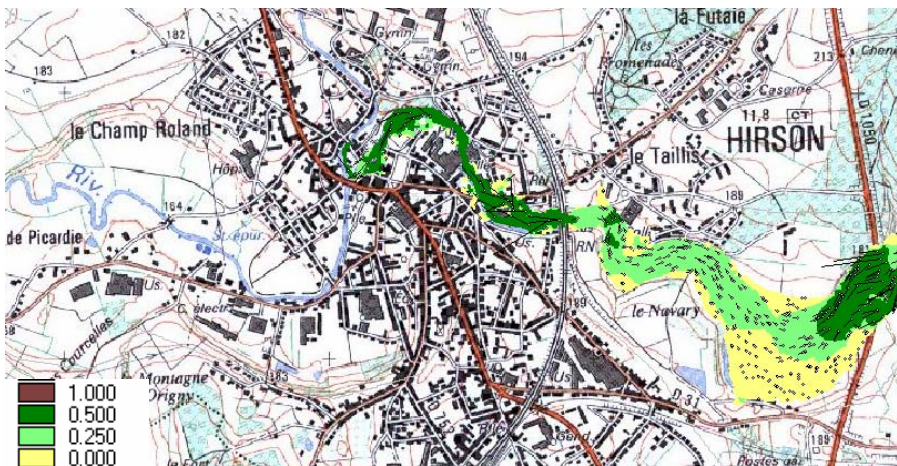
t= 2h40



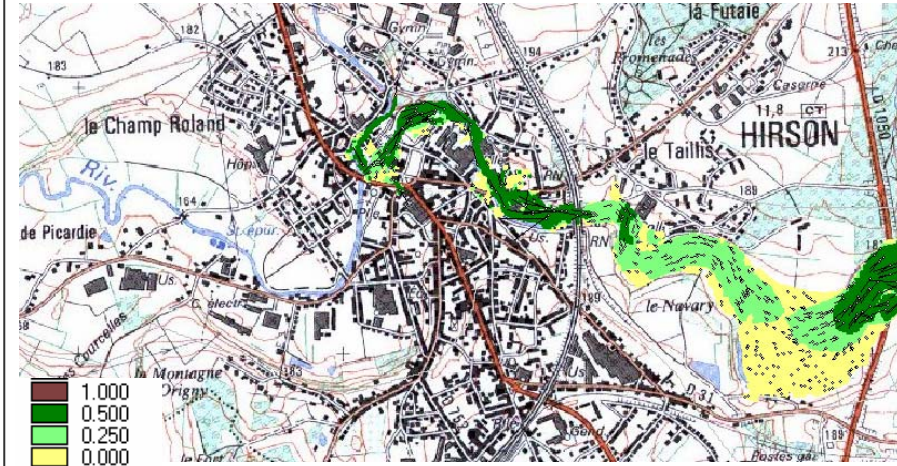
t= 2h55



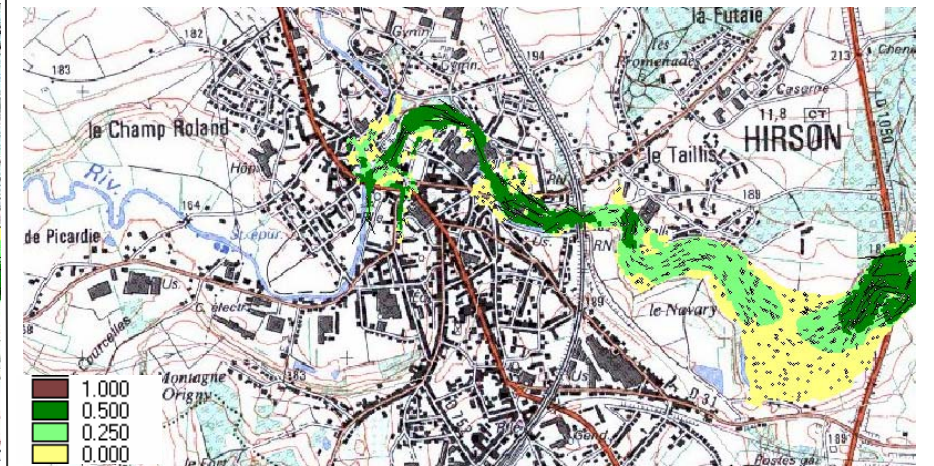
t= 3h15



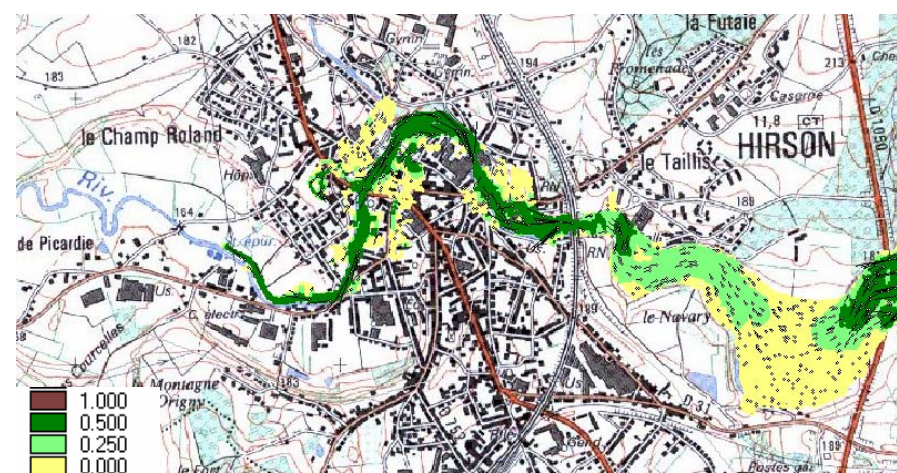
t= 3h20



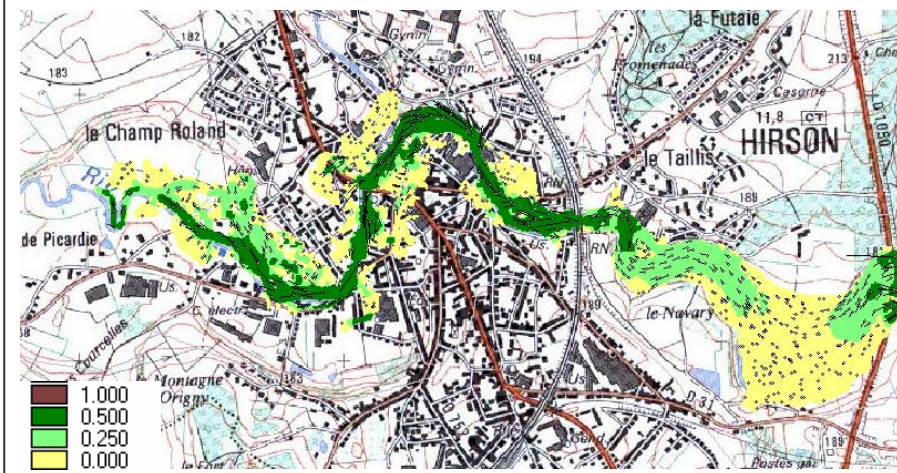
t= 3h25



t= 3h40



t= 4h00



t= 4h45

