

## INTEGRATION DU MODELE HYDRAULIQUE 2D DANS LA CHAINE DE PREVISION DES CRUES-ECLAIRS EN TEMPS REEL

ERLICH M.<sup>1</sup>, GIRARD C.<sup>2</sup>, DAVID E.<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> ARTELIA Eau et Environnement, Echirrolles, France, e-mail : [marc.erlich@arteliagroup.com](mailto:marc.erlich@arteliagroup.com)

**Résumé :** L'article décrit la mise en œuvre, les tests et la validation d'un service pré-opérationnel de prévision de crues éclaircs utilisant des outils de modélisation météorologiques et hydrauliques avancés. Le développement qui a été effectué dans le cadre du Projet SAFER du programme GMES a été appliqué dans la zone pilote de la rivière Gardon, fréquemment soumise aux crues éclaircs spectaculaires. Ce service intègre des outils de prévision météorologique de Météo France avec le modèle hydrodynamique TELEMAC- 2D dans une chaîne de prévision pré-opérationnelle.

**Mots-Clés :** cartographie des zones inondables en temps réel, services de secours; crue éclairc, prévision opérationnelle d'inondation, TELEMAC 2D

**Abstract :** The paper describes implementation, test and validation of an pre-operational service of flash floods forecasting using advanced meteorological and hydraulic modeling tools. The development carried on in the frame of SAFER Project (GMES program) was applied in the pilot area of the Gardon river, frequently subject to spectacular flash floods. This forecast service sets up coupling between Meteo France (national meteo service) pre-opérational forecasting chain, which integrates meteorological forecast as well as rainfall/runoff model, and TELEMAC-2D hydrodynamic model.

**Keywords :** real-time inundation mapping, emergency services, flash flood, operational forecasting of inundated zones

### Introduction

Dans le monde entier des crues rapides provoquent de plus en plus des pertes humaines et des dommages économiques, particulièrement dans les zones urbanisées. Seulement en Union Européenne depuis 1990 les pertes dues aux crues éclaircs dans les zones urbaines atteignent 58 milliards euro. En France, la submersion marine due à la tempête Xynthia (28 février 2010) a provoqué 53 morts et 1.4 milliards euros des dommages (dont seulement 0.8 milliards euros couvert par l'assurance des catastrophes naturels CATNAT [1]).

La Directive européenne relative aux inondations [2] est une des composantes du programme d'actions que l'Union Européenne met en œuvre pour la gestion des inondations. Ces actions résultent d'une prise de conscience et d'un travail important mené par les états membres et la Commission pour encourager la solidarité et viser un niveau de gestion du risque d'inondation ambitieux en Europe.

En France, une de recommandations du Plan des Submersions rapides qui a été élaboré par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement [3] suite à cet événement tragique insiste sur le besoin d'améliorer la diffusion de l'information aux populations concernées au travers de la vigilance météorologique et de la vigilance crues. En termes d'actions concrètes il s'agit d'analyser la faisabilité technique et sociale, puis le déploiement, d'un service d'avertissement des communes sur la possibilité de crues soudaines, prenant en compte les conséquences hydrologiques.

Pour répondre aux attentes des services de secours et de protection civile et des organisations non gouvernementales (ONG) l'Union Européenne a lancé dans le cadre du programme GMES (Global Monitoring and Emergency System) le projet SAFER (Services and Applications for Emergency Response <http://safer.emergencyresponse.eu>) et particulièrement pour développer et mettre en œuvre des services pré-opérationnelles de cartographie rapide sur la base de l'observation spatiale.

Un de domaine thématique d'application de SAFER concerne les crues éclairs et vise à montrer la faisabilité de la production en quasi temps réel des cartes d'inondation prévue. En France, ce service pré-opérationnel est mis en œuvre, évalué et validé sur la rivière Gardon, fréquemment soumise aux crues éclairs spectaculaires.

Ce service de prévision est fondé sur le couplage de l'information décrivant la répartition spatiale de la pluie produite par le service de météo national de METEO France et le modèle bidimensionnel TELEMAC 2D mis au point par EDF est diffusé par la SOGREAH (désormais ARTELIA Eau & Environnement). La chaîne du traitement intègre la prévision météorologique à petite échelle spatiale et le modèle hydraulique TELEMAC 2D de la plaine de Gardonnenque de la rivière Gardon. Le service a été développé dans l'esprit d'une approche générique et transposable à un autre site en Europe avec l'objectif d'élaboration d'un prototype pré-opérationnel qui respecte notamment les contraintes de temps limité des simulations et production des cartes de zones inondable en quasi temps réel.

### 1. Architecture du prototype du service de prévision

Le prototype du service de prévision de crues éclairs mis en place dans le cadre du projet SAFER intègre des outils de deux acteurs principaux :

- Météo France (MF par la suite), chargé de fournir les données et des prévisions météorologiques. Les données prévisionnelles de pluie sont fournies grâce au modèle atmosphérique AROME. MF dispose également d'un modèle de transformation pluie-débit (Isba/Topmodel) permettant d'avoir le débit prévisionnel du cours d'eau principal de la zone d'étude,
- Artelia EE (ex. SOGREAH), dont le but est d'utiliser des prévisions météorologiques dans le modèle hydrodynamique (TELEMAC 2D) et de effectuer des simulations hydrauliques puis générer des cartes des zones inondables en quasi temps réel.

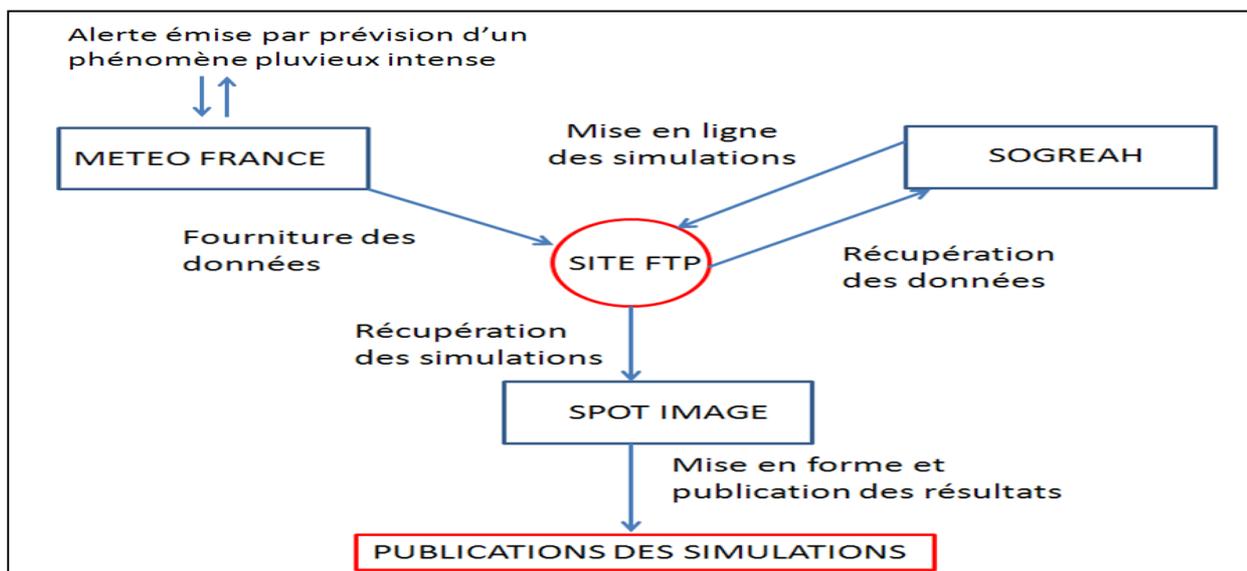


Figure 0- Schéma des échanges des informations du service de prévision des crues éclairs du projet SAFER

#### 1.1. Présentation de la zone pilote de l'étude du bassin versant de Gardon

Pour le projet SAFER nous avons choisi le bassin situé dans une zone à fort risques des inondations rapides. Ce bassin versant se situe dans le département du Gard. Celui-ci est connu pour

ses évènements pluvieux très intenses qui frappent le bassin versant étudié et le bassin versant du Gardon plus globalement.



Figure 1-Localisation du bassin d'Alès

Ces phénomènes, connus aussi sous les noms des épisodes cévenols surviennent en régions méditerranéennes : ces phénomènes naturels à cinétique rapide se caractérisent par des pluies intenses et durables provoquant des cumuls de pluviométrie de plusieurs centaines de millimètres en quelques heures.

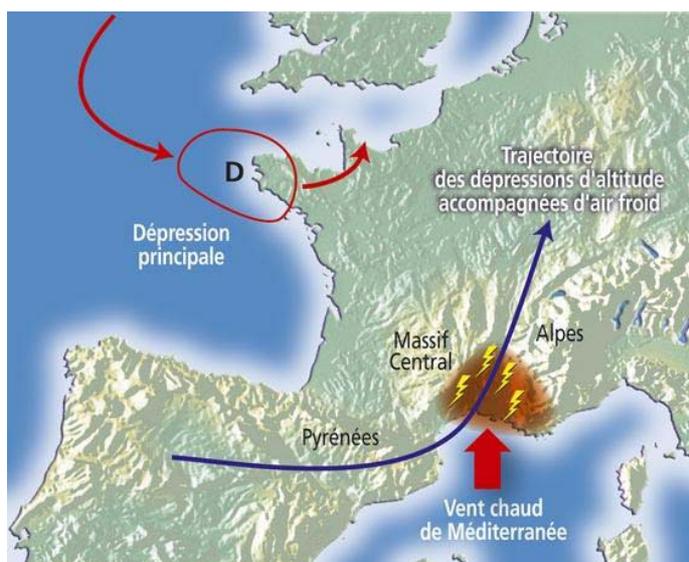


Figure 2-Localisation de la zone des événements cévenols (source : <http://www.risquesmajeurs.fr/mieux-comprendre-les-episodes-Cevenols>)

Parmi des événements extrêmes historiques enregistrés dans les annuaires de Météo France on note le 29 septembre 1900, à Valleraugue, un petit village cévenol situé au pied du mont Aigoual, où il tomba ainsi 950 mm en 10 heures, soit près de mille litres d'eau par m<sup>2</sup>. A Nîmes le 3 octobre 1988, il tomba 400 mm de précipitations en 6 heures ; et durant les inondations de Vaison-La-Romaine le 22 septembre 1992, où ce sont 300 mm d'eau qui tombèrent, dont 150 mm en moins de 2 heures, transformant la rivière de l'Ouvèze en un torrent meurtrier (41 morts) et destructeur (320 maisons endommagées). Les pluies cévenoles, ont généralement lieu au début de l'automne, quand la mer est encore suffisamment chaude, et se produisent par vent de sud, sud-est sur les massifs des Cévennes, des Préalpes et des Corbières. Des phénomènes semblables se produisent aussi sur les bassins versants à fort relief situés entre la Catalogne et le Piémont italien.

Dans le bassin du Gardon deux sous-bassins, celui amont d'Alès et celui aval de la Plaine de Gardonnenque ont été choisis pour le réglage et validation de la méthodologie proposée.

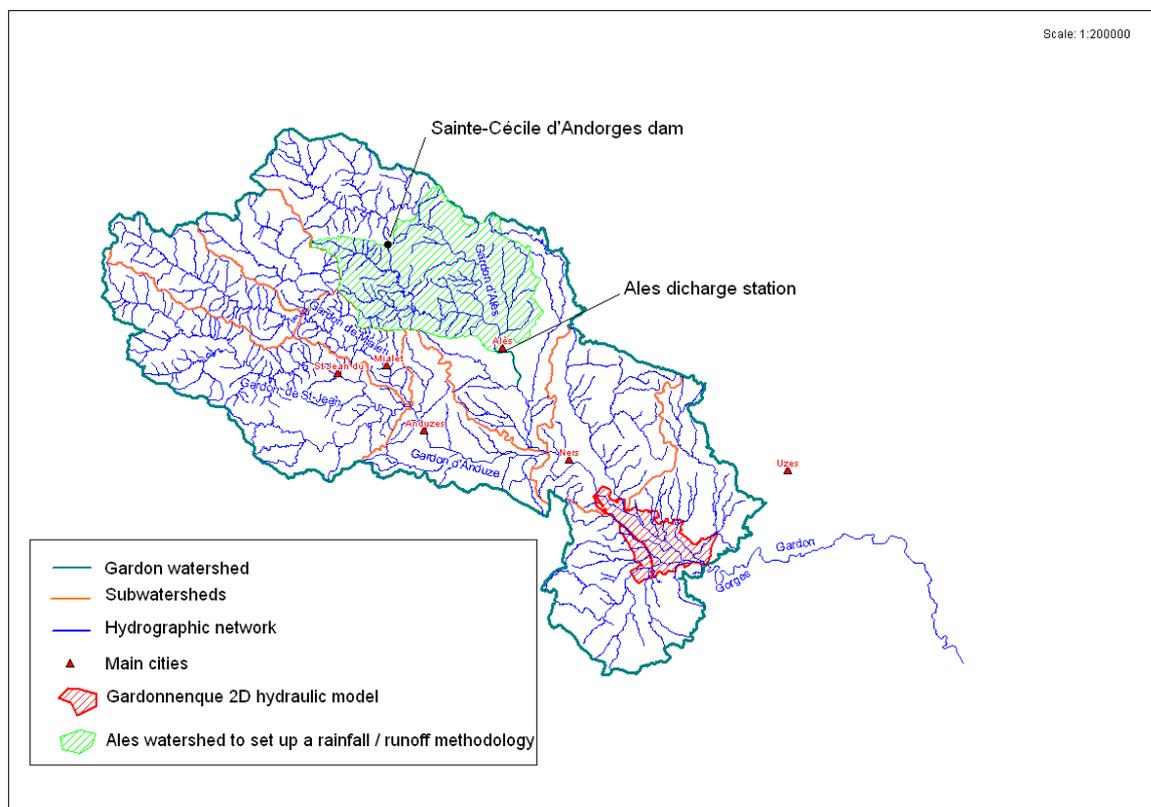


Figure 3- Schéma fonctionnel du TELEMAC 2D

Le bassin étudié du Gardon d'Alès possède les caractéristiques suivantes :

|                               |                     |
|-------------------------------|---------------------|
| Superficie en km <sup>2</sup> | 198 km <sup>2</sup> |
| Longueur du plus long drain   | 45 km               |
| Altitude min.                 | 108.4 m             |
| Altitude max.                 | 1334 m              |
| Pente moyenne                 | 3.6%                |

A son exutoire à Alès il y a une station de jaugeage permettant de mesurer le débit.

### 1.2. Information météorologique et transformation pluie-débits

L'exposition aux risques d'inondation dans cette région a permis de mettre en place un réseau de surveillance particulier. L'Observatoire Hydro-météorologique Méditerranéen Cévennes-Vivarais - OHMCV (<http://www.ohmcv.fr/>) met à disposition de données des pluies spatialisées telles qu'elles apparaissent via de signal de radar météorologique. Les pluies sont accessibles au pas de temps horaire ou sur l'évènement global. Sur le bassin versant d'Alès, nous avons choisi deux crues indépendantes : celle de 19/10/2008 et celle du 26/10/2008. Ces crues ont été choisies en fonction du débit de crue observé à Alès et de l'intensité des pluies sur le bassin versant. La crue débutant le 19 octobre 2008 était utilisée comme l'évènement de calage et la seconde était utilisée pour la validation des résultats.

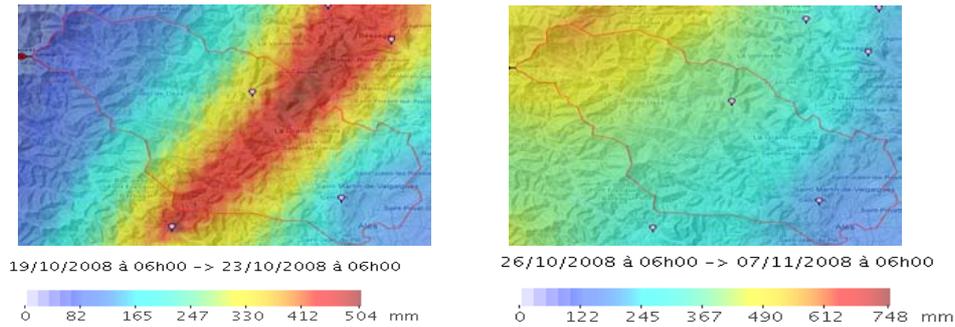


Figure 4-Cartographie des évènements pluvieux étudiés

### 1.3. Bref présentation de TELEMAC 2D

TELEMAC 2D [4] est un système logiciel développé par le Laboratoire National d'Hydraulique et d'Environnement (LNHE) d'EDF qui permet, à partir de la résolution des équations de Barré Saint Venant, de pouvoir modéliser des problèmes hydrodynamiques fluviaux et maritimes. TELEMAC permet de simuler la propagation de crues, la rupture de digue, l'influence d'un ouvrage sur le cours d'eau et il peut être couplé avec d'autres logiciels pour compléter ses domaines d'application.

TELEMAC 2D est un logiciel qui est conçu pour pouvoir évoluer et permet à l'utilisateur de modifier les applications de base du logiciel. Plusieurs versions ont donc vu le jour. De nouvelles applications permettent de compléter et de faire évoluer cet outil de simulation hydraulique, dans le cadre du projet SAFER cette adaptation concerne des simulations dans une chaîne de prévision des crues notamment par intégration de la prévision des précipitations et la transformation de pluie en débit.

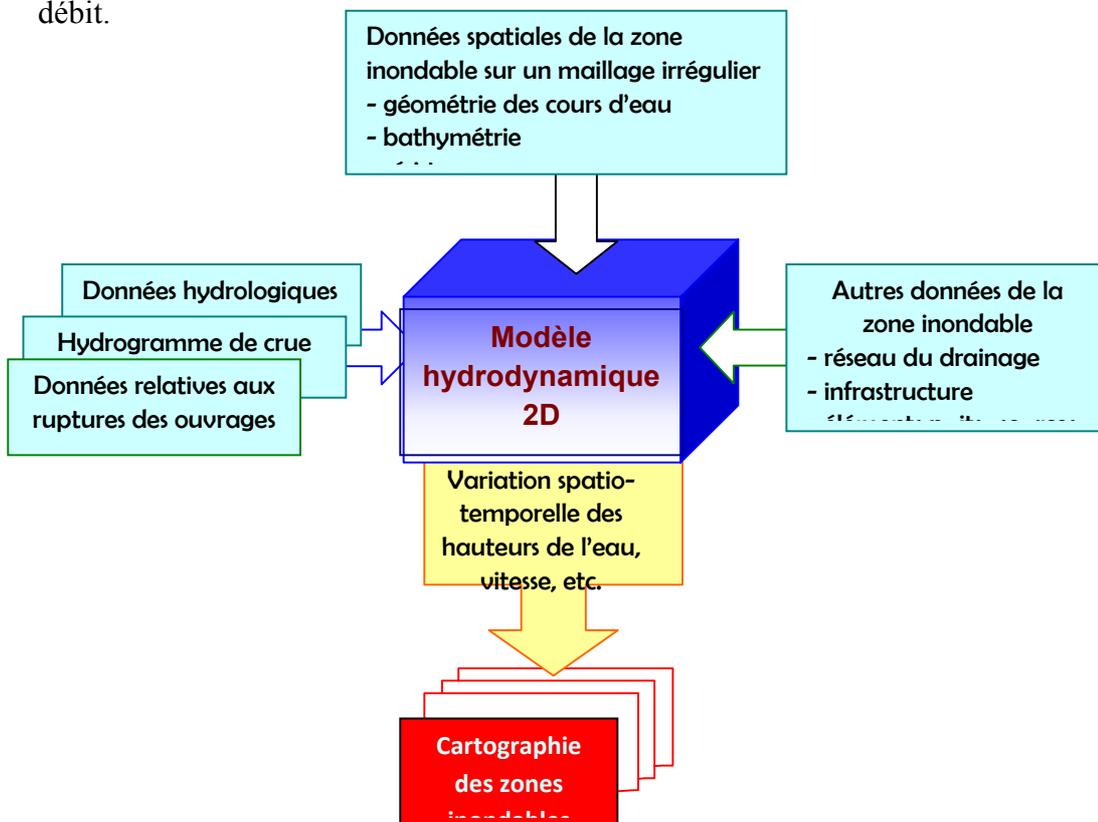


Figure 5- Schéma fonctionnel du TELEMAC 2D

Plus des informations sur le système TELEMAC (distribué désormais comme un open source freeware) peut être trouvé sur <http://www.opentelemac.org/>.

## 2. Procédure du calage et validation du modèle TELEMAC 2D

Cette étape a permis de valider d'une part la modélisation des cours d'eau par des lignes et d'autre part démontrer la capacité de TELEMAC 2D à intégrer l'information hydrologique dans la chaîne du traitement. La zone d'étude a été maillée selon deux critères de taille de mailles. L'ensemble du bassin versant avec des mailles de 300m et l'aval du modèle (zone noircie sur la Fig.6), par un critère de maille de 55m.

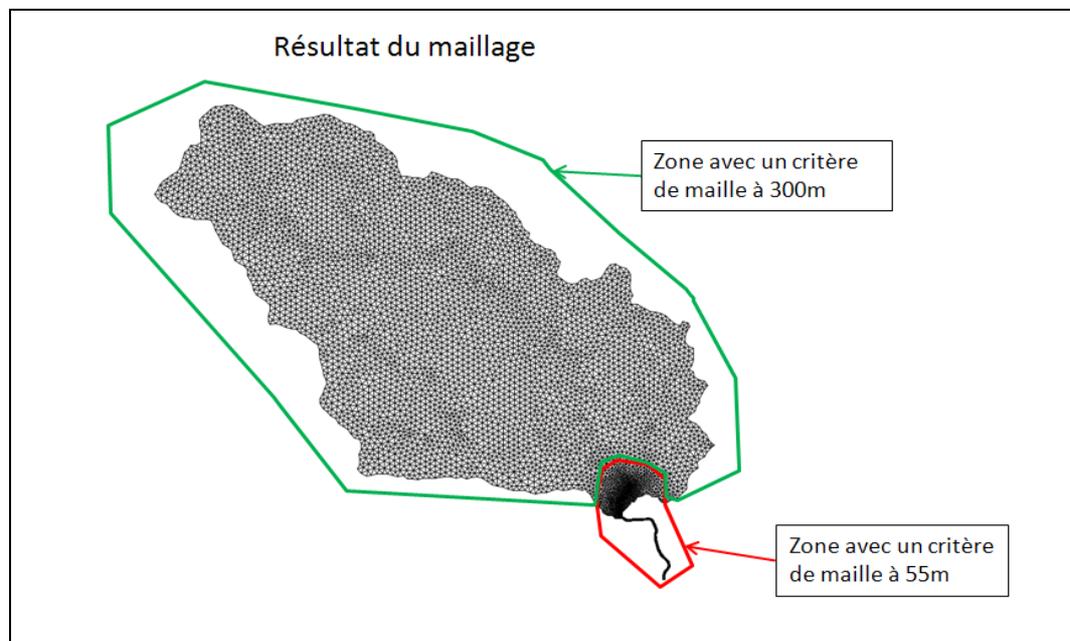


Figure 6-Illustration du maillage simplifié

Pour l'épisode de calage, nous avons réalisé plusieurs tests pour approcher au mieux de l'hydrogramme mesuré selon 3 critères :

- Le volume de crue
- Le débit maximum observé
- Le temps d'arrivée au pic

Le calage s'est effectué sur le coefficient de frottement et sur le coefficient de ruissellement.

### 2.1. Calage

Il du modèle hydrodynamique s'effectue modèle d'une manière itérative sur les coefficients de frottement (loi de Strickler), qui représentent la rugosité des cours d'eau et le coefficient de ruissellement, qui transforme la pluie brute en pluie nette. Une valeur initiale de 0.21 pour le coefficient de ruissellement (21% de la pluie brute participe au ruissellement). Cette valeur est le rapport du hyétogramme de la pluie brute sur le volume du débit observé à l'exutoire.

Un jeu de coefficients de Strickler de 30 dans les cours d'eau et de 20 sur le restant du bassin. Ce sont des coefficients que l'on retrouve classiquement dans d'autres études fluviales. L'évènement du calage débute réellement pour notre simulation le 21 octobre 2008 à 8h00. Simuler l'évènement avant cette date n'est pas intéressant car les pluies sont de faibles intensités et le temps de calcul serait considérablement rallongé. Les caractéristiques de cette crue sont les suivantes :

- Le débit maximum observé durant la crue est de 658 m<sup>3</sup>/s
- Le temps de montée est de 16h
- Le volume total de cette crue représente 27Mm<sup>3</sup>

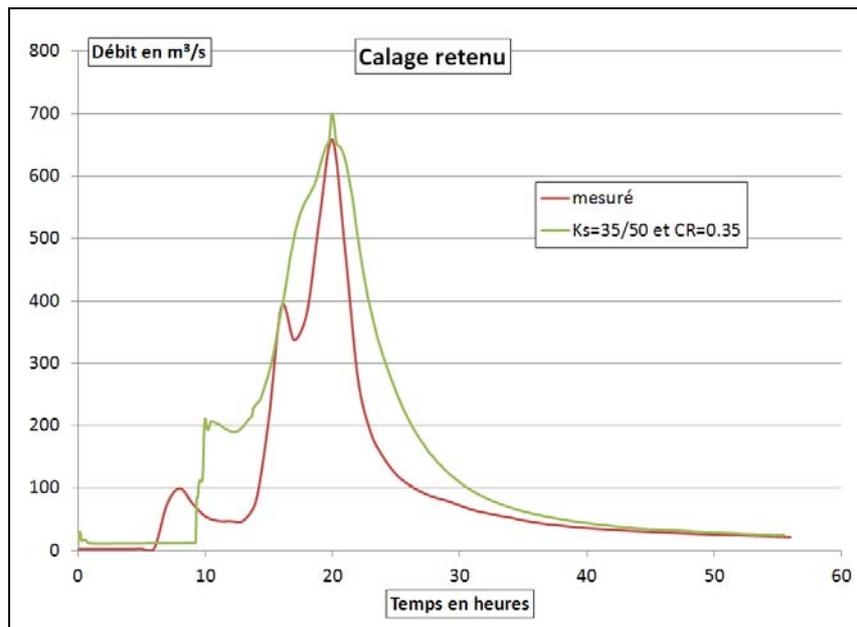


Figure 7- Graphique présentant le calage retenu de la crue du 21 au 24 octobre 2008

La Fig.7 représente la comparaison entre des débits calculés et l'hydrogramme mesuré. Nous constatons que les deux pics de crue sont parfaitement en phase. La dynamique de l'hydrogramme est assez bien respectée. L'erreur en volume est de l'ordre de 30% mais le débit de pointe présente une très faible erreur (moins de 2%). Le temps d'arrivée au pic est lui aussi assez faible (0.40% d'erreur). Les résultats sont globalement satisfaisants. Toutefois, les erreurs en volume indique le rôle du barrage écrêteur situé en aval de la zone d'étude est sûrement à l'origine d'une telle différence. Pris en compte de cet ouvrage conduit finalement à retenir le couple de paramètres:

- Une valeur de Ks à 35 dans les cours d'eau et 50 en dehors.
- Un coefficient de ruissellement de 0.45

Les résultats du calage final sont présentés sur la Fig.8.

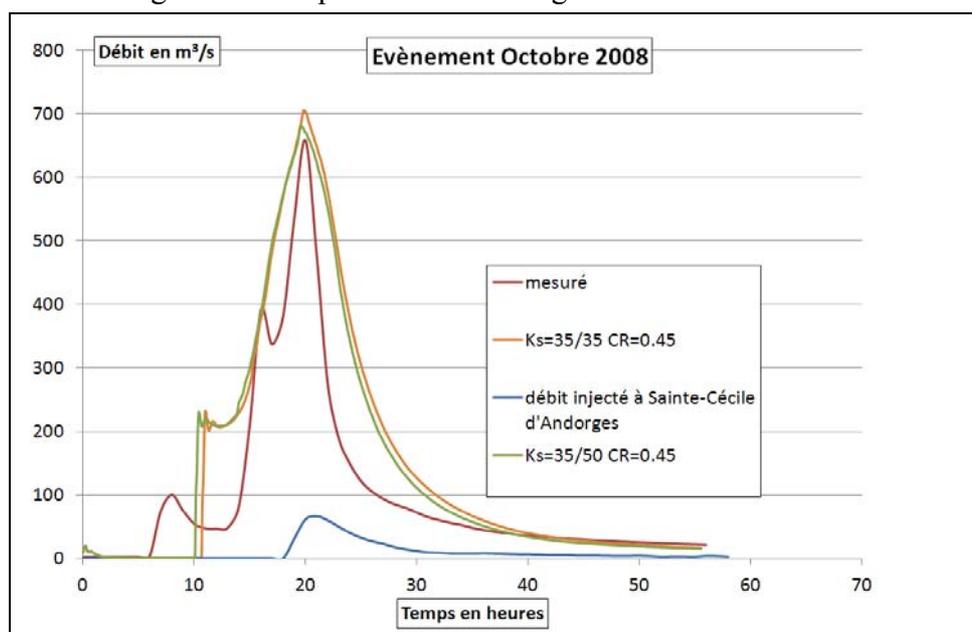


Figure 8-Résultat final du calage

Nous avons trouvé judicieux de représenter le calage avec  $K_s$  valant 35 sur l'ensemble du modèle et un coefficient de ruissellement de 0.45. En effet, nous montrons qu'une petite variation du coefficient de Strickler n'entraîne pas un résultat totalement différent. Nous constatons ici la robustesse de notre modèle. Nous conserverons cependant les valeurs de Strickler de 35 dans les cours d'eau et 50 à l'extérieur.

Dans les études d'hydraulique classiques, ce couple de coefficient de Strickler peut paraître aberrant. Toutefois, nous sommes dans une configuration particulière puisqu'en plus de modéliser la partie hydraulique, nous réalisons également une transformation pluie-débit. Ainsi, par la valeur  $K_s$  de 50, nous arrivons à compenser l'absence des rigoles et autres petits cours d'eau que notre précision de maillage ne peut prendre en compte.

## 2.2. Validation

Pour valider notre modèle, nous utilisons l'épisode de novembre 2008, indépendant de celui du réglage. Avec les mêmes jeux de coefficient ( $K_s=35/50$  et  $CR=0.45$ ), nous obtenons l'hydrogramme simulé suivant (Fig.9) :

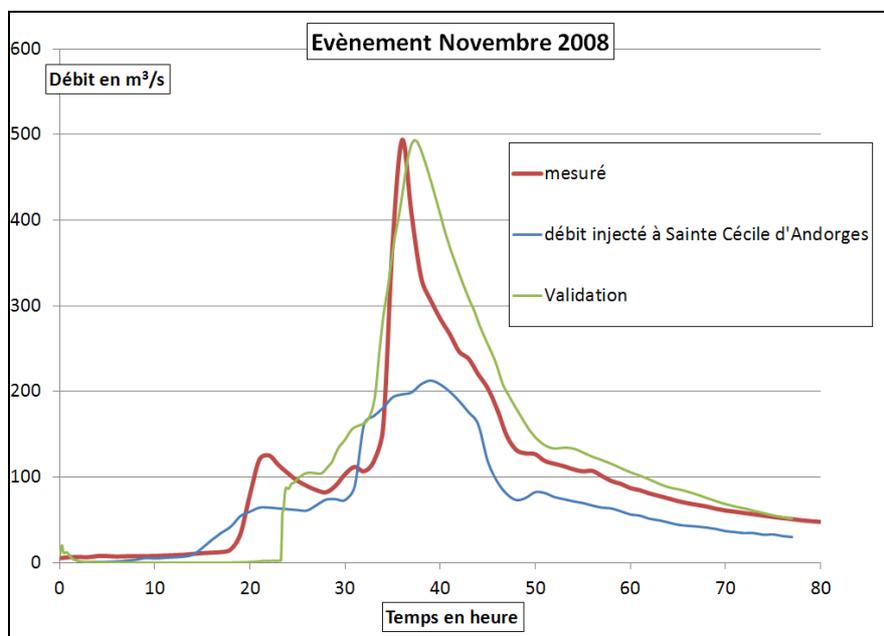


Figure 9- Représentation de l'hydrogramme simulé sur l'épisode de validation

Nous remarquons que l'hydrogramme simulé (courbe verte) présente une bonne dynamique par rapport à celui mesuré. Le débit de pointe simulé est proche de celui relevé lors de la crue. Nous constatons également que le temps d'arrivée au pic est très satisfaisant. Le tableau 1 ci-dessous quantifie les erreurs commises par le modèle selon les trois critères que l'on s'est fixé.

Tableau 1. Erreurs du modèle TELEMAC 2D sur l'événement de validation

|                                     | hydrogramme_observé | Validation |
|-------------------------------------|---------------------|------------|
| volume de crue en Mm3               | 19.71               | 23.60      |
| erreur relative (%)                 | 0.00                | 19.73      |
| debit_max en m3/s                   | 493.00              | 493.50     |
| erreur relative (%)                 | 0.00                | 0.10       |
| Temps d'arrivée au pic de crue en H | 36.00               | 37.33      |
| erreur relative (%)                 | 0.00                | 3.69       |

Cependant, comme dans l'évènement de calage, nous retrouvons une montée de crue très raide sur notre simulation. Ce gradient de montée très fort peut s'expliquer par la manière de transformer la pluie brute en pluie efficace (pluie qui participe réellement au ruissellement).

### **3. PLAINE DE LA GARDONNENQUE : ADAPTATION DE TELEMAT 2D POUR REALISER DE LA SIMULATION PREVISIONNELLE**

#### **3.1 Maillage utilisé**

Nous avons réalisé la construction des bassins versants latéraux sur la même méthodologie que le bassin versant d'Alès.

Les lignes de contraintes ont été automatiquement tracées sur l'outil de Système d'Information Géographique ARCGIS. Dans le modèle final les bassins versants latéraux ont été maillés avec un critère de maille de 300m sur la majeure partie du bassin versant.

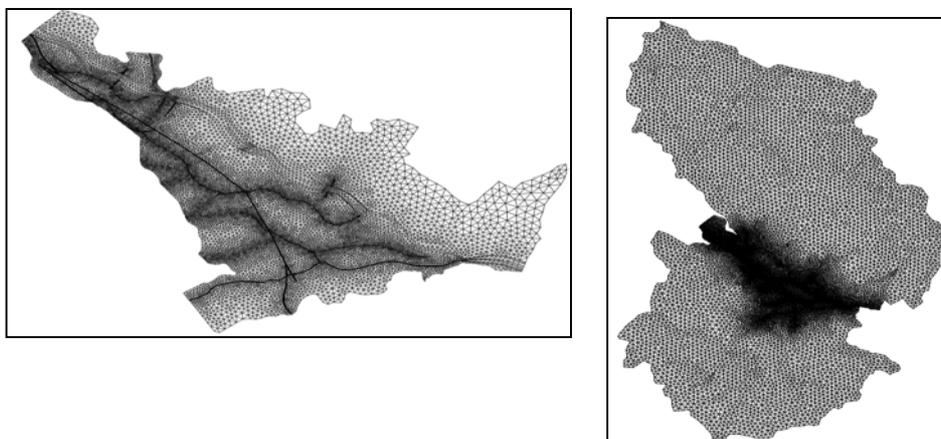


Figure 10-Modèle utilisé pour représenter la plaine de la Gardonnenque

#### **3.2 Les données et la chaîne du traitement**

Les principales données fournies par Météo France sont :

- les pluies modélisées par le logiciel AROME.
- le débit du Gardon en entrée du modèle (cercle bleu sur la Figure 12 ci-dessous). Le débit du Gardon à Ners est simulé par le modèle ISBA-TOPMODEL [5] qui intègre les prévisions d'AROME.
- les pluies issues des observations. Ces données, appelées ANTILOPE, vont nous permettre d'avoir à notre disposition la pluie réellement tombée lorsque l'on fera l'initialisation du modèle à chaque actualisation.

Les données de pluie sont sous forme de grilles comme les fichiers utilisés sur les tests du bassin d'Alès. Les données de pluie AROME sont prévues pour les 30 prochaines heures et sont actualisées toutes les 6 heures. Les données de débit sont sous la forme d'un fichier texte. L'échéance de données et l'actualisation est la même que pour les pluies.

Le modèle AROME a besoin de plusieurs heures pour produire le résultat des simulations. Ainsi, une simulation lancée à 6H00 UTC (Temps Universel Coordonné) sera disponible 3H 30 plus tard environ. Durant ce temps de calcul, les données ANTILOPE vont alimenter le modèle et les 3 premiers pas de temps de pluie seront issus des observations. Les débits quant à eux sont calculés à partir des pluies simulées par le modèle AROME. Il faut 1H30 de calcul supplémentaire pour obtenir le jeu de débit. En récapitulant, nous obtenons les données Météo France 5H00 après le lancement de la simulation AROME, soit à 11H UTC.

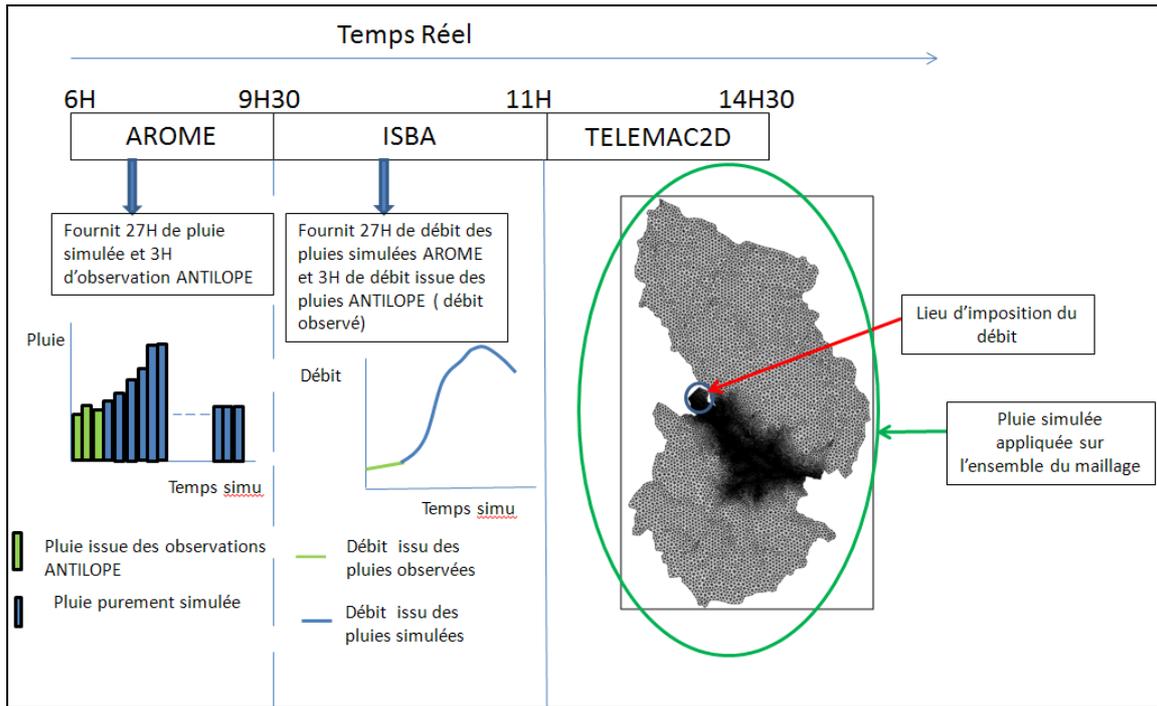


Figure 11 - Représentation schématique de la chaîne de prévision

### 3.2 Les résultats

Pour cette zone le calage s'est effectué sur les laisses de crues de 2002. La crue étant de période de retour supérieure à cent ans sur cette partie du bassin, nous considérons que ce dernier est saturé et toute la pluie qui s'écoule ruisselle (CR=1). Les coefficients de Strickler ont été pris à 50 dans les cours d'eau et 35 sur le reste des bassins latéraux. Un calage spécifique sur le modèle existant de la plaine de la Gardonnenque avait été réalisé, nous prendrons ces coefficients de Strickler pour la zone concernée.

Grâce au logiciel TELEMAC2D et son outil d'exploitation graphique FUDAA, nous avons pu réaliser une cartographie de la hauteur d'eau et de la vitesse quand la crue est à sa plus forte intensité. Les résultats sont présentés sur les Figures 13 et 14.

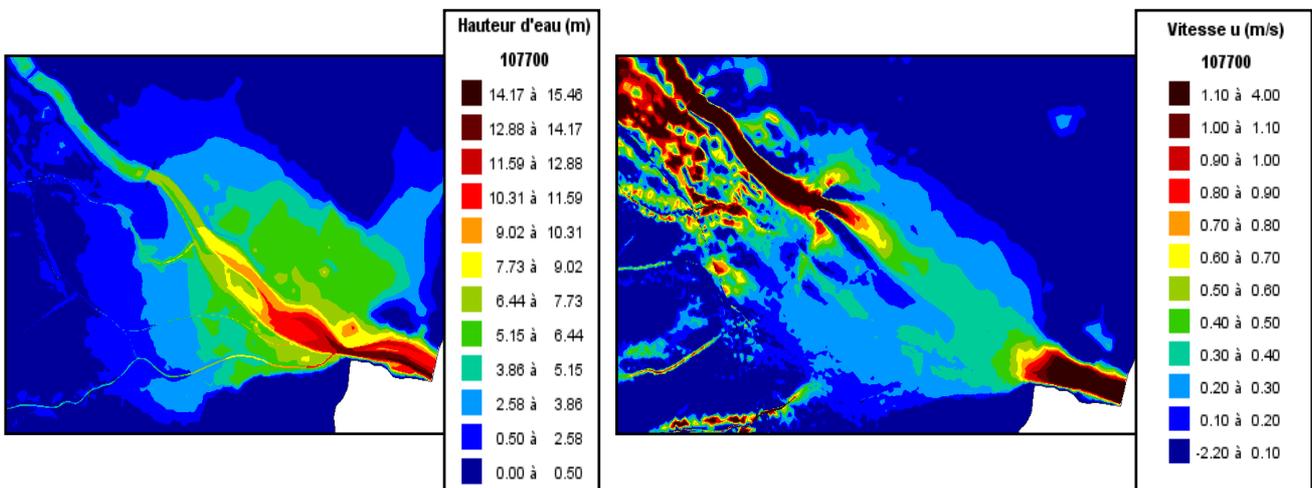


Figure 12-Cartographie de la hauteur d'eau et de la vitesse dans la plaine de la Gardonnenque

Cette cartographie permet aux personnes de la protection civile de visualiser quelles zones doivent être secourues en priorité. Avec le croisement vitesse hauteur, des valeurs sont communément admises pour déterminer si l'intervention doit avoir lieu et avec quels moyens (à pied, camion ou bateau à moteur).

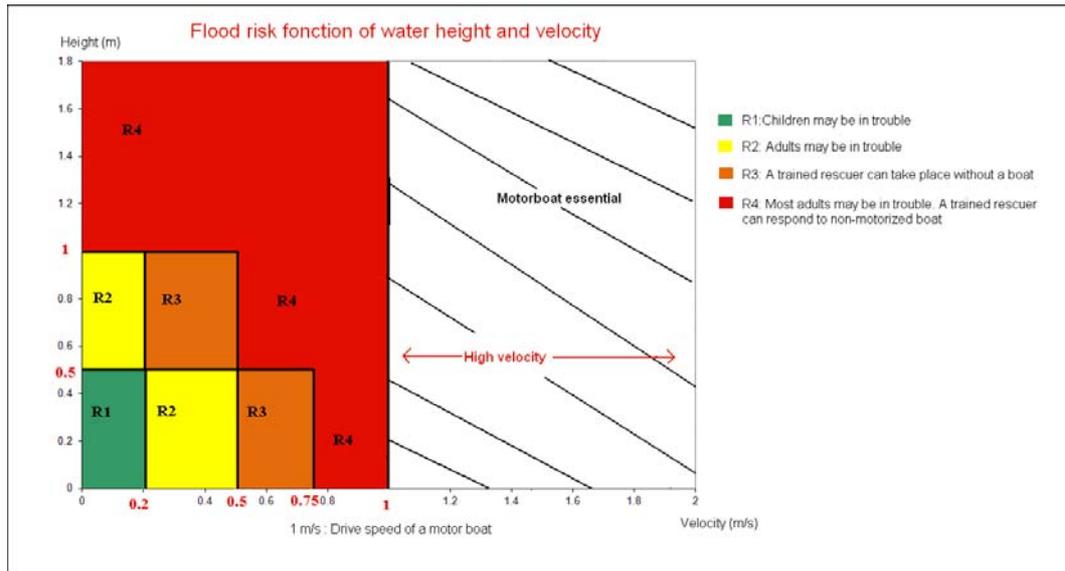


Figure 13-Cartographie des risques dans la plaine de la Gardonnenque

### Conclusions

La modélisation de cet épisode cévenol dans les conditions de temps réel a permis de nous montrer qu'il est possible de développer un tel outil. La partie hydraulique peut être prise en charge par Télémac2D.

D'un point de vue opérationnel, la chaîne AROME-ISBA/TOPMODEL/TELEMAC2D permet d'obtenir une cartographie des hauteurs d'eau sur la plaine de la Gardonnenque 8H30 après le début de la simulation. Les crues étudiées ayant une montée entre 15 et 20 heures, cela laisse une faible manœuvre pour la sécurité civile. Soit l'alerte est émise suffisamment tôt grâce à de l'observation satellite, soit il faudrait diminuer les temps de calcul des différents outils de modélisation de la chaîne. Grâce à des machines multi-processeurs le calcul de TELEMAC2D peut être divisé par 3.

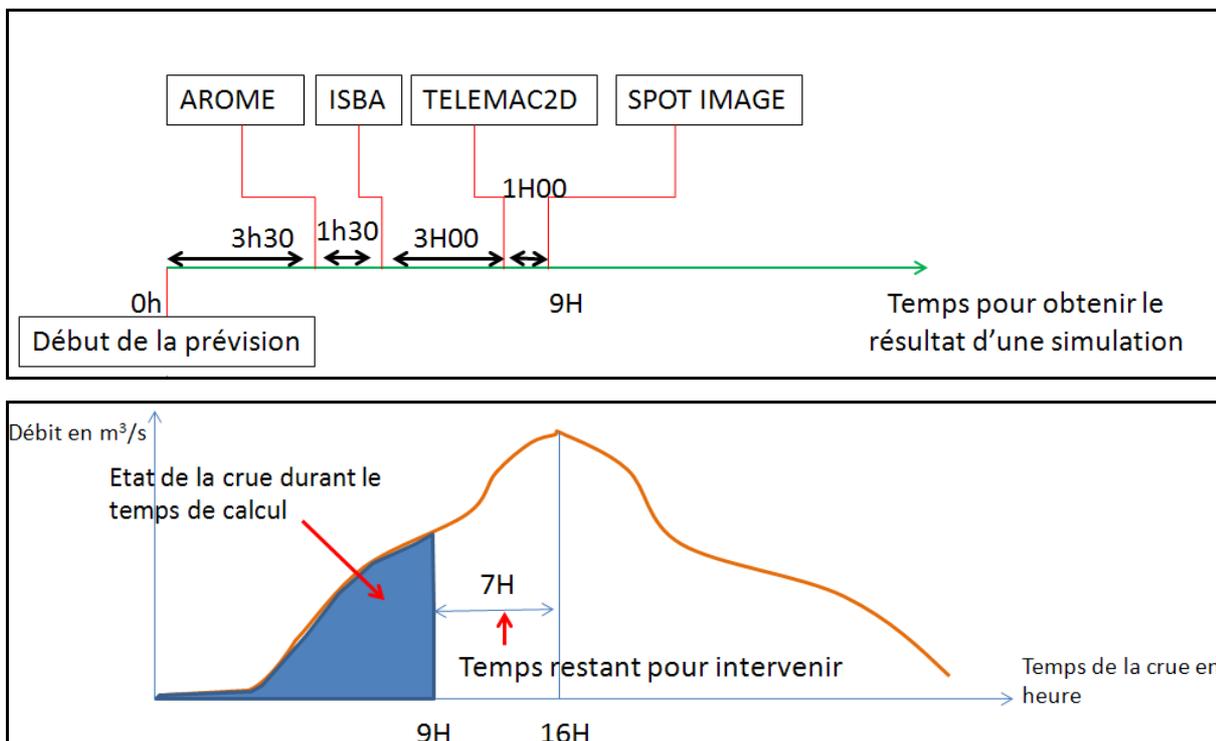


Figure 14 - Mise en parallèle du temps de calcul pour réaliser la simulation et l'avancée de la crue

## REFERENCES

- [1] MEEDDM, "Tempête Xynthia - Retour d'expérience, évaluation et propositions d'action", Rapport du gouvernement français, Mai 2010, 2 Tomes.
- [2] Directive 2007/60/EC du 23 octobre 2007 du Parlement européen et du Conseil relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation, Journal Officiel de l'Union Européenne, 6 novembre 2007.
- [3] Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement; "Plan submersions rapides", février 2011 (<http://www.risquesmajeurs.fr/le-risque-inondation>)
- [4] Hervouet JM, Van Haren L., TELEMAC-2D Version 3.0 - Principe Note, 1994, Electricité de France, Département Laboratoire National d'Hydraulique.
- [5] Thirel G., Amélioration des prévisions d'ensemble des débits sur la France de SAFRAN-ISBA-MODCOU, Thèse du doctorat de l'Université de Toulouse, soutenue le 23 novembre 2009.