

Rapport de stage de fin d'études et de DEA

Effectué du 17 février au 31 juillet 2003

ETUDE ET MODELISATION HYDROLOGIQUE DES CRUES
ECLAIRS, APPLICATION A LA REGION CEVENNES-
VIVARAIS.



Responsable LTHE : ANQUETIN Sandrine
Responsable JRC-Ispira : THIELEN Jutta

REAL Elsa
Promotion EPUM 2003
DEA de mécanique énergétique

Sommaire

I. CADRE DE L'ETUDE.....	2
I.1 PRESENTATION DU LTHE ET DU JRC.....	3
I.1.1 Le LTHE.....	3
I.1.2. Le JRC.....	4
I.1.3 L'IES.....	5
I.1.4 Le projet « Natural Hazard ».....	6
I.2 PROBLEMATIQUES POSEES PAR LE SUJET	7
I.2.1 Qu'est ce qu'une crue éclair ?	7
I.2.2 Quels sont les phénomènes à l'origine des crues éclairs ?	8
a) Aspect météorologiques.....	8
b) Aspect hydrologique.....	10
I.2.3 Pourquoi ces crues éclairs sont-elles si difficiles à prévoir et à simuler ?	11
I.2.4 Pourquoi la région Cévennes_Vivarais et pourquoi uniquement la période automnale ?	12
a) La région Cévennes-Vivarais : un terrain favorable aux crues-éclair.....	12
b) Une région marquée par les sinistres dues aux crues éclairs	13
II. PRESENTATION DU MODELE LISFLOOD ET DES SIMULATIONS	15
II.1 LE MODELE HYDROLOGIQUE LISFLOOD.....	16
II.1.1 LISFLOOD : Présentation.....	16
II.1.2 LISFLOOD: Fonctionnement	18
II.2 SOURCE DES DONNEES D'ENTREE ET DEROULEMENT DES SIMULATIONS.....	22
II.2.1 Sources des données d'entrée	22
a) Données 'physiologiques'	22
b) Données météorologiques :	22
II.2.2 Déroulement des simulations.....	26
a) Evénements pluvieux étudiés	26
b) Localisation des stations choisis pour comparer mesures et simulations.....	28
c) Déroulement des simulations pour les années 2000 et 2001.....	29
III. RESULTATS ET ANALYSES.....	31
III.1 TEST DES DIFFERENTES BASES DE DONNEES METEOROLOGIQUES.....	32
III.1.1 Simulations avec les données de précipitation issues de la base MARS.....	32
III.1.2 Simulations avec les données de précipitation issues des pluviomètres de la base OHM-CV.....	34
a) Simulations journalières	34
b) Simulations horaires.....	35
III.2 CALIBRAGE DU MODELE.....	38
III.2.1 Influence des paramètres sur le débit simulé.....	39
a) Influence de la conductivité à saturation de la couche sol 1.....	39
b) Influence de la limite d'eau infiltrant les eaux souterraines par percolation.....	40
c) Influence de la conductivité de la zone supérieure de stockage des eaux souterraines.....	41
III.2.2 Calibrage choisi pour chaque bassin	42
III.3 ANALYSE DES RESULTATS APRES CALIBRAGE.....	44
III.3.1 Résultats obtenus sur les événements 2000 et 2001.....	44
III.3.2 Résultats obtenus sur l'événement du 8/9 septembre 2002.....	45
IV. CONCLUSION.....	47
V. ANNEXES.....	48

Introduction

Les crues éclairs, crues particulièrement violentes et rapides, sont parmi les inondations les plus meurtrières et les moins prévisibles. Aujourd'hui, l'opinion scientifique internationale commence à se mobiliser afin de comprendre, de modéliser et, à long terme, de prévoir ces crues éclairs.

Ce stage s'inscrit dans une volonté de collaboration entre le Laboratoire des Transferts en Hydrologie et Environnement de Grenoble (LTHE) et le groupe inondations de l'IES (Institute for Environment and Sustainability) du Joint Research Center (JRC) à Ispra (Italie) sur le thème de l'étude des crues éclairs.

L'objectif de ce stage est la modélisation de chroniques de débits à partir du modèle hydrologique LISFLOOD développé au JRC. Les données d'entrée de ce modèle sont les données issues de la base de données hydrométéorologique sur la région Cévennes – Vivarais qui est l'objectif principal de l'Observatoire Hydrométéorologique Méditerranéen Cévennes – Vivarais (OHMCV). Cette base de données est coordonnée au LTHE. L'objectif de ce travail est d'évaluer la faisabilité du modèle hydrologique régional LISFLOOD à reproduire des épisodes de crues éclairs.

Le stage s'est effectué en deux parties : la première s'est déroulée à Grenoble durant 1 mois ½ et a consisté à collecter et mettre en forme les données issues de la base de données OHM-CV, principalement des données de mesures de pluie et de débits. La deuxième s'est déroulée à Ispra durant 3 mois et a consisté à utiliser ces données précises pour forcer le modèle hydrologique LISFLOOD sur la région des Cévennes et comparer les débits simulés par LISFLOOD aux débits effectivement observés dans les rivières.

I. Cadre de l'étude

I.1 Présentation du LTHE et du JRC

I.1.1 Le LTHE

Le Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE) est une unité mixte de recherche CNRS- Université Joseph Fourier- Institut National Polytechnique de Grenoble – Institut de Recherches pour le Développement. Les thèmes de recherche abordés sont déclinés en référence aux équipes et aux observatoires qui composent le laboratoire :

3 principales équipes travaillent au laboratoire :

- **L'équipe hydrométéorologique** qui étudie les précipitations, leur variabilité et les phénomènes qui les contrôlent : systèmes convectifs, circulations régionales et synoptiques, fluctuations climatiques.
- **L'équipe hydraulique et hydrologie de bassin** qui étudie la phase continentale du cycle de l'eau et des flux associés d'énergie, de substances physico-chimiques, et de sédiments à l'échelle régionale.
- **L'équipe poreux et processus hydrologique** qui s'intéresse aux couplages entre processus hydrologiques de surface (ruissellement et érosion hydrique) et de sub-surface (infiltration, évaporation), physico-chimiques et microbiologiques, et ce en relation avec la topologie du milieu et sa dynamique temporelle (états de surface, espace poral).

J'ai effectué mon stage au sein de l'équipe hydrométéorologique. Elle pilote, entre autres, l'Observatoire Hydrométéorologique Méditerranéen Cévennes-Vivarais (OHM-CV).

Cet observatoire bénéficie de partenariat avec de nombreux laboratoire de recherche français et internationaux, ainsi qu'avec des organismes français à vocation opérationnelle tels que :

- Météo-France.
- La Direction Départementale de l'Équipement du Gard et de l'Ardèche.
- La direction environnementale Rhône-Alpes et Languedoc-Roussillon.
- EDF.

L'observatoire OHM-CV a pour objectif principal l'étude des pluies intenses et des crues éclaircies en région de moyenne montagne méditerranéenne en s'appuyant sur un service d'observation reposant essentiellement sur l'instrumentation opérationnelle disponible dans la région Cévennes-Vivarais.

Mon travail de stage s'inscrit dans les projets relatifs à l'observatoire OHM-CV.

I.1.2. Le JRC

Le Joint Research Center (JRC) est un centre de recherche dépendant de la commission européenne. Il fournit un support scientifique et technique à la commission et au parlement européen. Le principal objectif du JRC est de contribuer à la création d'une Europe plus propre, plus sûre, plus saine et plus compétitive.

Le JRC travaille en étroite collaboration avec les laboratoires, les centres de recherches et les industries des pays membres de l'Union Européenne (UE) tout en restant indépendant.

Le JRC joue un rôle important dans l'établissement d'une aire de recherche européenne (ERA) et participe, dès aujourd'hui, à l'intégration des pays candidats à l'entrée dans l'UE en travaillant en étroite collaboration avec eux afin de les aider dans la compréhension des principales lois européennes. Le JRC supporte ainsi le processus d'élargissement de l'Europe.

Le JRC emploie environ 2000 personnes, il est subdivisé en 7 instituts de recherche :

- IRMM : The Institute for Reference Materials and Measurements.
- ITU : The Institute for Transuranium Elements.
- IPSC : The Institute for the Protection and the Security of the Citizen.
- IHCP : The Institute for Health and Consumer Protection.
- IES : The Institute for Environment and Sustainability.
- IE : The Institute for Energy.
- IPTS : The Institute for Prospective Technological Studies.

En plus du site de Bruxelles, regroupant la direction générale et la direction pour la stratégie scientifique, les différents instituts du JRC sont regroupés sur 5 sites :

- Geel (Belgique).
- Ispra (Italie).
- Karlsruhe (Allemagne).
- Petten (Pays-bas).
- Séville (Espagne).

J'ai effectué une importante partie de mon stage au sein du JRC, dans l'institut IES basée sur le site de Ispra en Italie. La figure suivante permet de visualiser l'emplacement des différents centres appartenant au JRC.

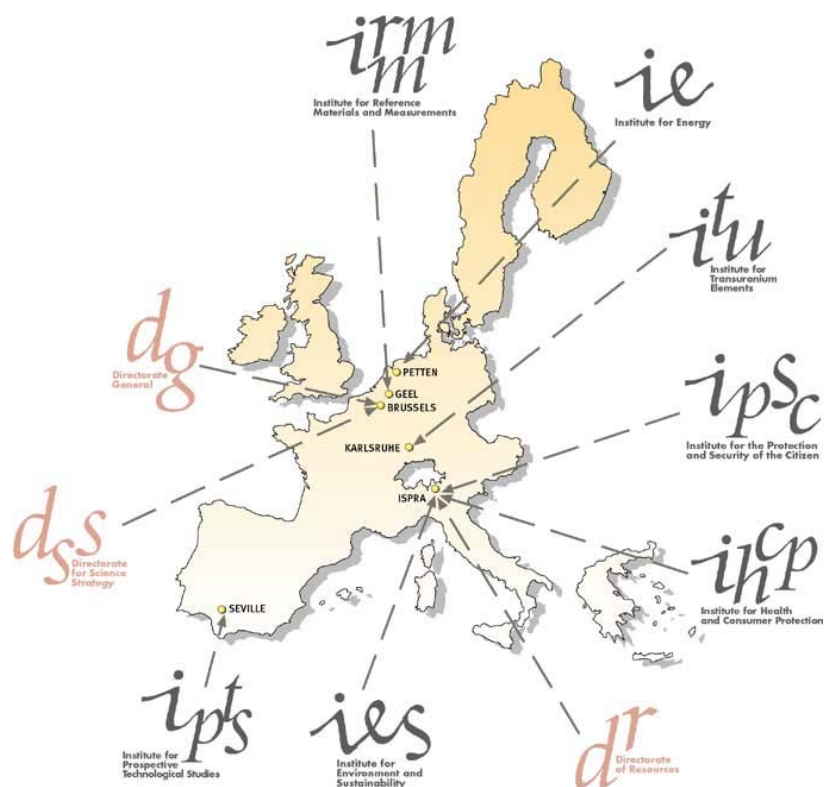


Fig. 1 : Localisation des différents instituts de recherche du JRC.

I.1.3 L'IES

Basé à Ispra, l'objectif de l'« Institute for Environment and Sustainability » est de fournir un support technique et scientifique à la stratégie de l'union européenne pour la protection de l'environnement et le développement durable.

L'IES travaille en étroite collaboration avec les laboratoires, les centres de recherches et les industries des membres de l'union européenne, créant un pont entre les institutions de l'union européenne et les citoyens européens. La combinaison de domaines complémentaires de connaissance tel que les sciences expérimentales, la modélisation ou encore les moyens de télédétection, placent l'IES dans une position forte dans la contribution à la création d'une véritable recherche européenne et dans la recherche d'un développement durable.

Parmi les principales activités de cet institut, on trouve :

- Etude des énergies renouvelables.
- Etude de la qualité de l'air.
- Etude des ressources en eau.
- Etude du changement climatique.
- Etude des ressources naturelles et terrestres.

Deux unités travaillent sur ce dernier point : Soil and Waste Unit (SWU) et Land Management Unit (LMU).

J'ai effectué mon stage dans l'unité LMU dans le cadre du projet « Natural Hazard ».

I.1.4 Le projet « Natural Hazard »

Le projet 'Natural Hazard' (risque naturel) est dirigé par l'unité LMU (Land and Management Unit) de l'IES.

Les activités liées à ce projet visent à fournir un support scientifique et technique pour la protection des citoyens contre les inondations et les feux de forêts. Deux équipes distinctes s'occupent de ces cas.

Le projet a également pour vocation de fournir des moyens d'amélioration des pratiques existantes en terme de management du risque naturel durant la phase de prévention (indicateurs de développement du risque, système de prévision des crues) mais également après la crise (images des régions sinistrées, brûlées ou inondées).

Ces objectifs sont remplis au moyen de l'intégration des informations dérivées de l'observation de la terre (image satellites) ou provenant d'autres sources.

L'équipe inondations :



Fig. 2 : Inondation du Po en 2000.

Lorsque le lit des rivières déborde et inonde les plaines, les conséquences peuvent être dramatiques. Des images comme celle présentée fig.2, prise durant l'inondation du Po en 2000, ne sont que trop familières.

Durant la dernière décennie, l'Europe a connu un nombre élevé de graves inondations dont les dernières en dates sont les inondations causées par le débordement de l'Elbe et du Danube en 2002 ou encore, celle causées par le débordement du Gard en septembre 2002.

Aucun pays en Europe n'échappe à ce fléau et les inondations semblent s'être intensifiées depuis ces dernières 10 années. Ces faits semblent supporter la thèse selon laquelle les inondations dans le Nord et le Nord-Ouest de l'Europe se feraient plus présentes.

C'est pourquoi le JRC a mis en place ce projet visant à compléter le travail des pays membre sur les inondations en terme de :

- **Prévention** : évaluation des stratégies de défense contre les inondations sur des bassins transnationaux à l'aide d'études de scénarii sur le changement d'occupation du sol, le changement climatique etc... (toutes ces études sont effectuées à l'aide du modèle hydrologique LISFLOOD).
- **Préparation** : Développement d'un système d'alerte européen des crues (EFAS), basé sur les prévisions de crues obtenues au JRC grâce au logiciel LISFLOOD, et permettant l'élaboration d'un system d'alerte des autorités locales.
- **Evaluation des dégâts** : analyse post-inondation basée sur les images satellites et la modélisation.

De plus, des études de faisabilité sur la modélisation des crues éclair régionales sont également en cours. C'est dans ce contexte que se situe mon sujet de stage que j'ai effectué, au sein de l'équipe inondation du JRC.

I.2 Problématiques posées par le sujet

Ce sujet s'inscrit dans la problématique d'études et de simulation des crues et, en particulier, des crues éclair.

L'objectif de ce stage est d'appréhender dans quelle mesure le modèle hydrologique LISFLOOD, conçu à Ispra et initialement développé pour des larges bassins transnationaux, est capable de simuler les débits des rivières dans une région plus petite et souvent soumise aux phénomènes de crues éclair : en l'occurrence la région Cévennes-Vivarais.

Dans cette partie nous allons présenter en détails les questions relatives à ce sujet : Qu'est ce exactement qu'une crue éclair ? Quels sont les phénomènes à l'origine de ces crues ? Pourquoi choisir la région Cévennes-Vivarais comme cadre de l'étude ?

I.2.1 Qu'est ce qu'une crue éclair ?

Les crues sont caractérisées par l'importance des précipitations qui sont à leurs origine. Il y a 2 façons d'obtenir des précipitations importantes :

- Une pluie moyenne pendant un temps très long, c'est le cas pour les crues étendues (plain floods) se développant sur de grands bassins.
- Une pluie très intense se développant sur un temps assez court, c'est le cas des crues éclair (flash floods) pour lesquelles sont observées des cumuls au sol de, typiquement, 200 mm en moins de 6H.

Ces crues éclair sont observées dans des bassins relativement petits ($<1000 \text{ km}^2$), pour des raisons que nous exposerons par la suite. Elles sont particulièrement impressionnantes car elles provoquent des débits très intenses en très peu de temps dans des

rivières ayant à l'origine des débits assez faibles, d'où les adjectifs employés de 'cataclysme' ou encore de 'déluge'.

Contrairement aux crues étendues pouvant mettre plusieurs jours à atteindre leurs côtes maximales, les crues éclairs se développent très rapidement et se dissipent tout aussi rapidement, ce qui les rendent plus dangereuses en termes de vies humaines.

Les images présentées fig.3 montrent clairement la différence entre les crues étendues et les crues éclairs :



Fig. 3 : Exemples de crue étendue et de crue éclair.

I.2.2 Quels sont les phénomènes à l'origine des crues éclairs ?

Une crue éclair est le résultat d'une combinaison entre un événement météorologique et une situation hydrologique particulière. Ainsi les phénomènes conduisant aux crues éclairs sont de 2 natures : météorologiques et hydrologique et il est impératif de tenir compte de ces 2 aspects si l'on veut comprendre la formation de ces crues.

a) Aspect météorologiques.

Afin de comprendre toute la complexité de l'étude et de la prédiction des crues éclairs, il a paru fondamental d'essayer de comprendre et d'expliquer les phénomènes météorologiques qui en sont l'origine.

Les crues éclairs sont caractérisées par des pluies très intenses. Or quasiment seuls les orages de nature convective sont capables de fournir de telles intensités. Le principe de formation de ces nuages convectifs est assez bien connu.

Il résulte, à la base, d'un échauffement du sol par le soleil qui communique sa chaleur à l'air situé au-dessus. Les parcelles d'air chaud, et donc plus légères, s'élèvent. Cette masse d'air continuera à s'élever tant que sa température restera supérieure à celle de l'air ambiant. Si cette situation persiste alors que l'air monte, les conditions sont dites instables. En revanche, si

la température d'une masse d'air atteint rapidement celle de l'air ambiant (et cesse donc de s'élever), les conditions sont dites stables :

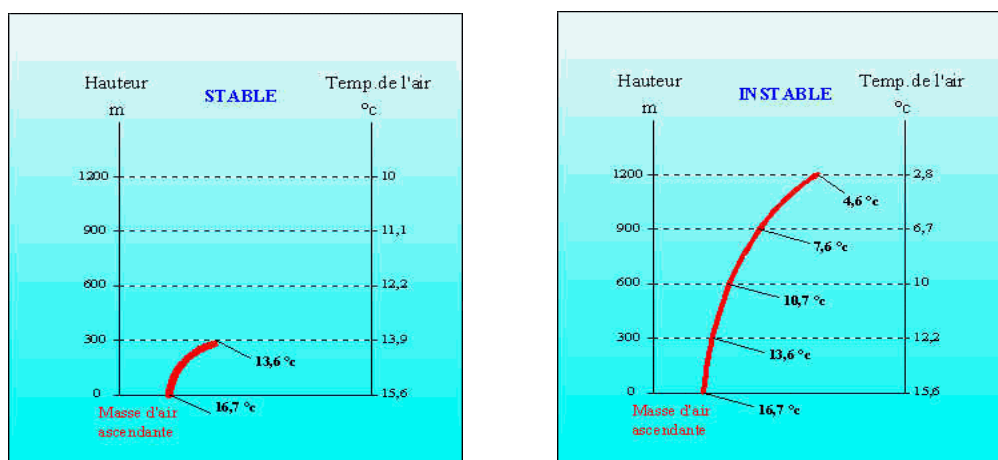


Fig. 4 : Principe de stabilité ou d'instabilité de l'atmosphère.

Une atmosphère instable est constituée en général d'une couche d'air de surface, humide et chaude, surmontée d'air froid plus sec. Ces deux couches sont souvent séparées par une zone d'inversion de température, c'est-à-dire une mince couche d'air où la température augmente avec l'altitude. Une masse d'air s'élevant à travers cette couche sera plus froide que l'air qui l'entoure et aura tendance à être repoussée vers le bas. L'inversion est donc très stable : elle empêche tout mouvement ascendant et rétablit l'équilibre.

La formation d'un orage convectif nécessite donc l'existence de phénomènes conduisant à l'élévation de ces parcelles d'air au dessus de cette couche d'inversion : présence de reliefs drainant l'air le long de ces flancs, rencontre d'une masse d'air chaud et froid etc...

Une fois cette couche d'inversion franchie et si les conditions restent instables, les parcelles d'air entament une longue ascension. Etant donné que plus elles montent plus elles se détendent et donc plus elles se refroidissent, il arrive un moment où ces parcelles d'air vont atteindre leur température de point de rosée et l'eau contenue sous forme de vapeur va alors se condenser.

Cette condensation libère de l'énergie et donc de la chaleur qui permet aux parcelles d'air de continuer leur ascension jusqu'à une couche de blocage comme par exemple une inversion de température : La condensation, source d'énergie, représente donc une des sources d'auto alimentation du nuage et il va de soit que plus l'air est humide, plus l'orage se développera.

Lorsque les gouttelettes formées par la condensation, deviennent par accumulation assez lourde contre le courant d'air formé par la convection, elles tombent et constituent les précipitations.

Ce courant d'air froid descendant a alors tendance à refroidir les parcelles d'air en aval entraînant un surplus de précipitations.

Ainsi, une fois les précipitations commencées, le courant d'air ascendant, qui déclenche la croissance du nuage, s'affaiblit sous le coup du courant d'air descendant. Ce distique de courant d'air ascendant-descendant constitue ce que l'on appelle une " cellule".

La plupart des orages se composent de plusieurs cellules qui se forment, survivent pendant environ une demi-heure, et ensuite disparaissent. De nouvelles cellules peuvent remplacer les anciennes, et il est possible que certains orages continuent pendant plusieurs heures : ces orages sont appelés multicellulaires. Dans certaines conditions météorologiques, ces orages multicellulaires s'organisent en des systèmes encore plus vastes nommés systèmes convectifs méso-échelle. Ce sont eux, principalement, qui sont à l'origine des crues éclairs. Ils peuvent atteindre 10000 à 12000 m de hauteur.

Ainsi, la formation d'orages convectifs multicellulaires produisant des pluies intenses nécessite :

- Un environnement instable.
- Un taux d'humidité suffisant permettant la formation de nuages importants.
- Un ou des processus conduisant à l'élévation de parcelles d'air.

Il est établi que la plupart des orages donnant lieu à des crues éclairs sont de nature convective car ce sont pratiquement les seuls capables de produire des précipitations aussi intenses.

Cependant, pour déclencher une crue éclair sur un bassin, les pluies doivent, en plus d'être intense, durer un certains temps (plusieurs heures), ce qui permet de proposer une seconde caractéristique de ces orages convectifs à l'origine de crues éclairs : ils doivent être quasi stationnaires (déplacement lent) afin de déverser le maximum de leurs pluies sur le même bassin.

En résumé, les orages principalement responsables des crues éclairs sont des orages convectifs de méso-échelle quasi-stationnaire : ils fournissent des pluies très intenses mais également très localisées.

La complexité des phénomènes régissant la formation, l'expansion et la décroissance de tels orages ainsi que leur forte sensibilité aux conditions initiales telles que l'humidité, en font des événements météorologiques particulièrement difficiles à prévoir.

b) Aspect hydrologique.

L'influence de l'état hydrologique des bassins sur la formation des crues éclairs est, bien qu'établie, difficile à quantifier. Il est certain que le taux d'humidité du sol, la topologie ou encore le pourcentage d'urbanisation d'un bassin va avoir une grande influence sur l'avènement ou non de crues éclairs et sur l'importance des débits observés. Cependant il n'existe pas vraiment, à l'heure actuelle, de données quantitatives permettant de bien saisir l'influence de chacun de ces paramètres hydrologiques.

La taille des bassins soumis aux précipitations est également déterminante. En effet, comme nous l'avons vu dans le précédent paragraphe, les orages convectifs quasi-stationnaire produisent des pluies localisées, la surface touchée par ces précipitations n'est donc pas très grande. Ainsi, si une quantité de pluie conséquente tombe sur un petit bassin, le risque de crue sera important alors que si cette même quantité tombe sur un bassin plus grand, le risque de crue sera quasi nul. C'est pourquoi les crues éclairs sont généralement observées sur des petits bassins.

I.2.3 Pourquoi ces crues éclairs sont-elles si difficiles à prévoir et à simuler ?

La simulation des crues éclairs, tels qu'entendue dans cette étude, consiste à reproduire sur plusieurs mois, avec le logiciel hydrologique (LISFLOOD), le débit des rivières à partir de situations pluvieuses. Ces situations sont reconstituées à partir de mesures réalisées durant ces périodes. Il est donc impératif d'avoir des mesures de pluies précises puisqu'elles conditionnent entièrement les simulations.

A long terme, la prévision de ces crues à partir de la conjugaison des prévisions météorologiques et des logiciels hydrologiques, est envisagée.

Les difficultés rencontrées sont nombreuses que ce soit en terme de simulation (objectif de mon stage), ou en terme de prévision :

- **Les orages convectifs sont difficiles à prévoir** de part leur dépendance aux conditions initiales, tels que l'humidité, qui sont très difficiles à évaluer et la complexité des phénomènes qui les régissent. Certains sont même quasiment impossible à prévoir avant les prémices de la formation orageuse. Cette difficulté se répercute sur la prévision des crues éclairs puisque ces orages sont principalement responsables de ces crues.
- **L'état hydrologique du sol** n'est jamais vraiment bien connu si bien que la réponse du sol ne peut être simulée de façon complètement satisfaisante, ce qui nécessite, entre autre, un calibrage des modèles hydrologiques.
- La simulation à partir des mesures de précipitation sur le terrain nécessite que **le réseau de mesures soit suffisamment dense** pour capturer correctement la distribution spatiale des précipitations. En effet, étant donné que les précipitations à l'origine des crues éclairs sont généralement très localisées, un réseau peu dense ne permettra pas de reconstituer correctement ces précipitations.
- **La violence de ces crues** empêche souvent de bonnes mesures du débit dans les rivières touchées. Les appareils de mesures tels que les limnimètres sont souvent cassés lors du passage de la crue et les appareils radars sont souvent déréglés. Il est donc très difficile d'obtenir de bonnes mesures en temps de crue et donc difficile d'évaluer la pertinence des simulations de crues.

I.2.4 Pourquoi la région Cévennes-Vivarais et pourquoi uniquement la période automnale ?

La région Cévennes-Vivarais a été choisie comme région d'étude des crues éclair pour 2 raisons : c'est une région particulièrement propice aux crues éclair et nombre d'entre elles ont été répertoriées depuis des années, et c'est une région particulièrement bien fournie en moyens de mesures (voir paragraphe II.2.1.b).

Dans cette région, la plupart des événements pluvieux se déroulent durant l'automne ce qui justifie que l'on se concentre uniquement sur cette période.

a) La région Cévennes-Vivarais : un terrain favorable aux crues-éclair.

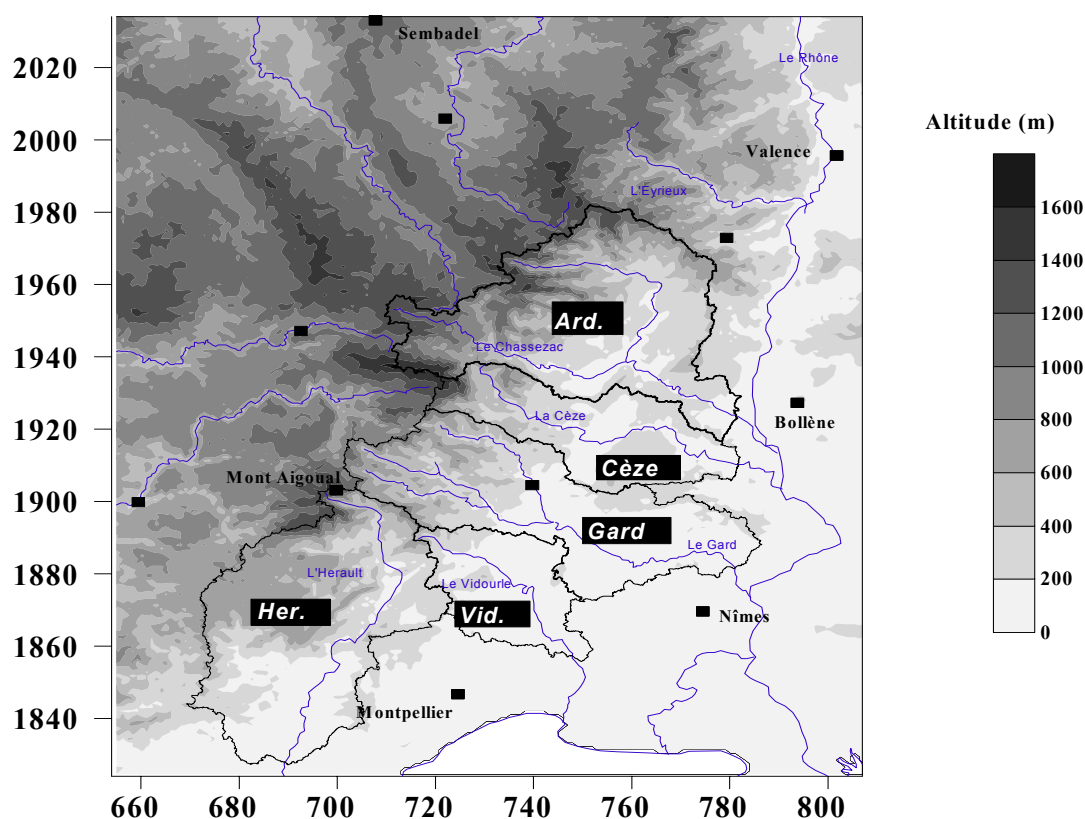


Fig. 5 : Topologie de la région Cévennes-Vivarais. Coordonnées en Lambert II étendus (km).

La région Cévennes-Vivarais est principalement constituée de 5 bassins relativement petits (fig.5):

- Le bassin de l'Ardèche (2252 km²).
- Le bassin de la Cèze (1113 km²).
- Le bassin du Gard (2014 km²).
- Le bassin du Vidourle (823 km²).
- Le bassin de l'Hérault. (2200 km²).

Elle est située en bordure de mer et est principalement constituée de larges plaines et d'une chaîne de montagnes : le massif des Cévennes qui culmine à 1700 m.

Une région favorable à la formation d'orages convectifs :

Comme nous l'avons vu, la formation d'orages convectifs multicellulaire nécessite :

- **Un taux d'humidité suffisant** : La région Cévennes-Vivarais est située en bordure de mer ce qui permet l'apport d'air chaud et humide lorsque les vents le ramène au niveau des Cévennes.
- **Des phénomènes permettant l'ascension des parcelles d'air** : La présence des montagnes favorise le phénomène de convection en forçant le vent, engouffré dans les plaines, à remonter le long de leurs flancs, entraînant avec lui les parcelles d'air chaudes : c'est ce que l'on appelle le forçage orographique. Ces massifs favorisent également la quasi-stationnarité des formations nuageuses en bloquant les nuages contre ses flancs.
- Quant à **l'instabilité de l'air**, elle est particulièrement importante en automne, lorsque l'air chaud et humide méditerranéen est ramené vers les côtes et qu'un air froid d'altitude d'origine arctique atteint les latitudes des Cévennes favorisant d'importants gradients thermiques.

Des bassins à risques :

La région est constituée de petits bassins, le plus grand mesurant 2252 km² avec des reliefs relativement escarpés favorisant l'engouffrement de l'eau vers les vallées.

b) Une région marquée par les sinistres dues aux crues éclair



Fig. 6 : Photos du pont de Russan pendant et après la crue de septembre 2002.

La région des Cévennes, et plus généralement la région méditerranéenne française, est particulièrement propice aux forts orages déclenchant des pluies diluviennes en un temps assez court. Un inventaire des pluies sur le sud est de la France (V.Jack, 1994) a révélé 144 épisodes ayant engendré plus de 190 mm de pluie (correspondant à 190 litres par mètre carré) en 24 heures.

Les épisodes les plus meurtriers sont les suivants :

- **3 et 4 octobre 1958** : cet épisode toucha les 4 bassins du Gard, de la Cèze, de l'Ardèche et du Vidourle. Le bilan fait état de 36 morts, 6900 sinistrés et plus de 5 milliards de francs de dégâts (Fontaine et Portela, 1959).
- **3 octobre 1988** : cette fois-ci, la crue toucha principalement la ville de Nîmes. Les dégâts furent très importants : l'hôpital et le centre de communication furent détruits et 10 morts furent à déplorer.
- **22 septembre 1992** : Vaison-la-romaine fut principalement touchée : 6 heures de montée en eau à raison d'un mètre toutes les dix minutes. La catastrophe fit 46 morts.
- **8 et 9 septembre 2002** : le Gard, le Vaucluse et l'Hérault subissent de graves inondations. Bilan : 21 morts, 12 disparus, environ 300 communes touchées et plus de 10 milliards d'euros de dégâts.

II. Présentation du modèle LISFLOOD et des simulations

II.1 Le modèle hydrologique LISFLOOD.

LISFLOOD a été développé par l'équipe inondations du Joint Research Center (JRC) de la commission européenne dans le but de fournir à la communauté scientifique européenne un outil de simulation des processus hydrologiques à l'échelle européenne et pour des échelles de temps variables.

C'est un modèle hydrologique distribué de pluie-débit à base physique, programmé dans un langage dynamique GIS (Geographic Information System).

LISFLOOD a été conçu pour être utilisé sur des larges bassins transnationaux et pour des applications variées telles que l'analyse des conséquences des changements d'occupation du sol sur les inondations ou la prévision de crues.

Depuis le début de l'année 2003, l'équipe inondation développe, à l'aide de LISFLOOD, un système d'alerte des crues à l'échelle européenne (EFAS). Le modèle est lancé 2 fois par jour avec comme données d'entrée les prévisions météorologiques pour toute l'Europe issues du service météorologique allemand DWD.

II.1.1 LISFLOOD : Présentation

LISFLOOD est constitué de 3 modules :

- **LISFLOOD-WB** : Water-Balance model.
Ce module simule les processus hydrologiques avec un pas de temps d'une journée, il nécessite donc des données d'entrée journalières.
Il est typiquement utilisé pour des simulations de plus d'un an, en particulier pour des scénarios d'évaluation des conséquences à long terme de changement sur un bassin (déforestation etc...).
- **LISFLOOD-FS** : Flood Simulation model.
Ce module simule les mêmes processus que le Water-Balance model mais avec un pas de temps d'une heure. Il est utilisé pour simuler des inondations sur des périodes de plusieurs jours ou plusieurs semaines. Il est généralement initialisé avec les données issues de la simulation journalière (WB simulation) et nécessite des données d'entrée météorologiques horaires.
- **LISFLOOD-FP** : FloodPlain inondation model.
Ce module utilise quant à lui un pas de temps de l'ordre de la seconde et est conçu pour simuler la dynamique d'inondation d'une zone inondable. Il nécessite des données topographiques plus précises que les 2 modules précédents et est initialisé à partir des données issues du module FS.

Dans la suite, nous nous focaliserons uniquement sur les modules WB et FS, le modèle FP n'étant pas adapté au cadre de cette étude.

Chacun des 2 modules nécessite :

Des données d'entrées :

- Topographie et informations sur les rivières.
- Informations sur l'occupation des sols.
- Données sols (profondeurs, texture).
- Données météorologiques (précipitation, température, évaporation).

Des conditions initiales qui peuvent être estimées ou dérivées d'une simulation précédente.

- Humidité initiale du sol.
- Quantité initiale d'eau dans le sous-sol.
- Débit initial dans les rivières etc....

LISFLOOD est programmé dans un langage adapté GIS : PCRaster. GIS est l'environnement principalement utilisé par le LMU (Land and Management Unit), il permet un traitement des données sous forme de cartes parfaitement adaptées aux différents projets coordonnés par le LMU. Ainsi la plupart des données disponible pour toute l'Europe au JRC telles que la topographie, le réseau de rivières, le type des sols etc... sont sous forme de cartes GIS.

Il était donc logique de créer un modèle hydrologique permettant d'utiliser et de fournir des données sous format GIS. Ceci a été rendu possible par l'utilisation du langage PCRaster.

Chacune des données d'entrée nécessaire au fonctionnement de LISFLOOD doit donc être sous forme de cartes GIS.

Il est très facile de créer une carte GIS à partir de données ponctuelles en utilisant une interpolation déjà programmée dans PCRaster.

Les données en sorties de LISFLOOD sont, soit dérivées des données d'entrées, soit calculées par le modèle et se présentent sous la forme de :

- Carte PCRaster, comme par exemple une carte de l'évaporation ou de l'infiltration totale durant la période de simulation.
- 'Time series' pour des points prédéfinis par l'utilisateur, comme par exemple le débit dans les rivières.

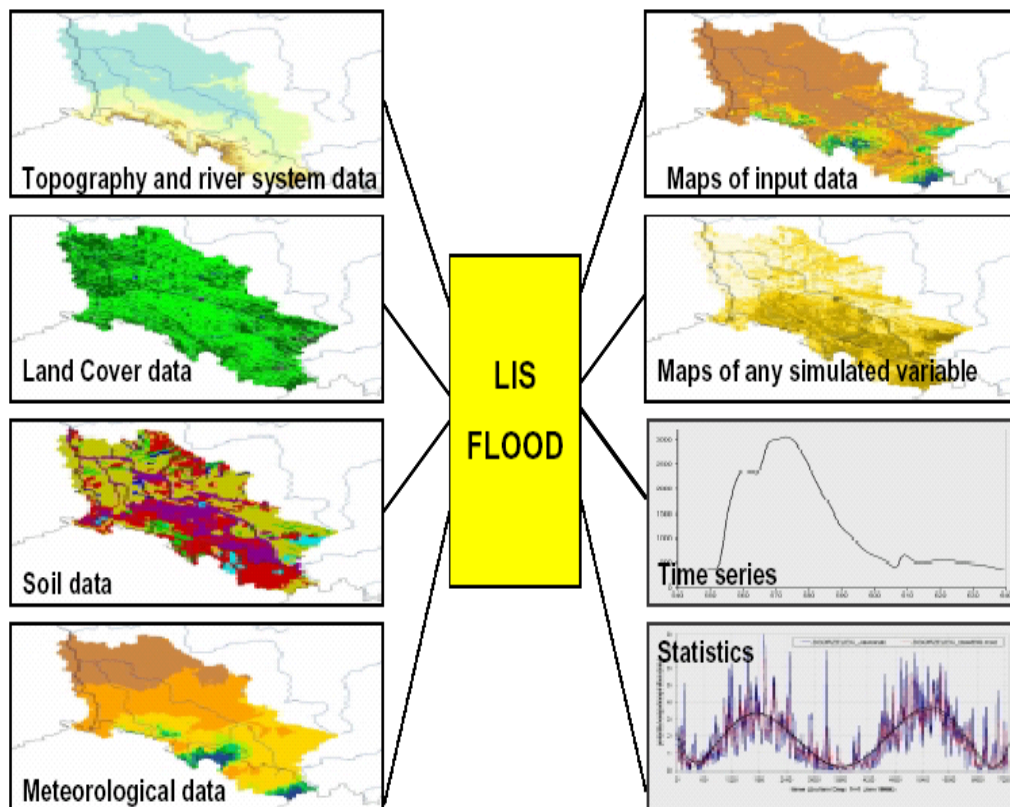


Fig. 7 : Illustration des données d'entrées et de sorties de LISFLOOD.

II.1.2 LISFLOOD: Fonctionnement

LISFLOOD est un modèle numérique qui simule les processus hydrologiques d'un bassin versant à des échelles de temps différentes.

C'est un modèle distribué qui simule les processus pris en compte pour chaque point d'une grille régulière.

Tous les processus physiques (fig.8) permettant la transformation de l'eau contenue dans les nuages, à l'eau dans les rivières sont pris en compte par le modèle, on parle alors de modèle à base physique.

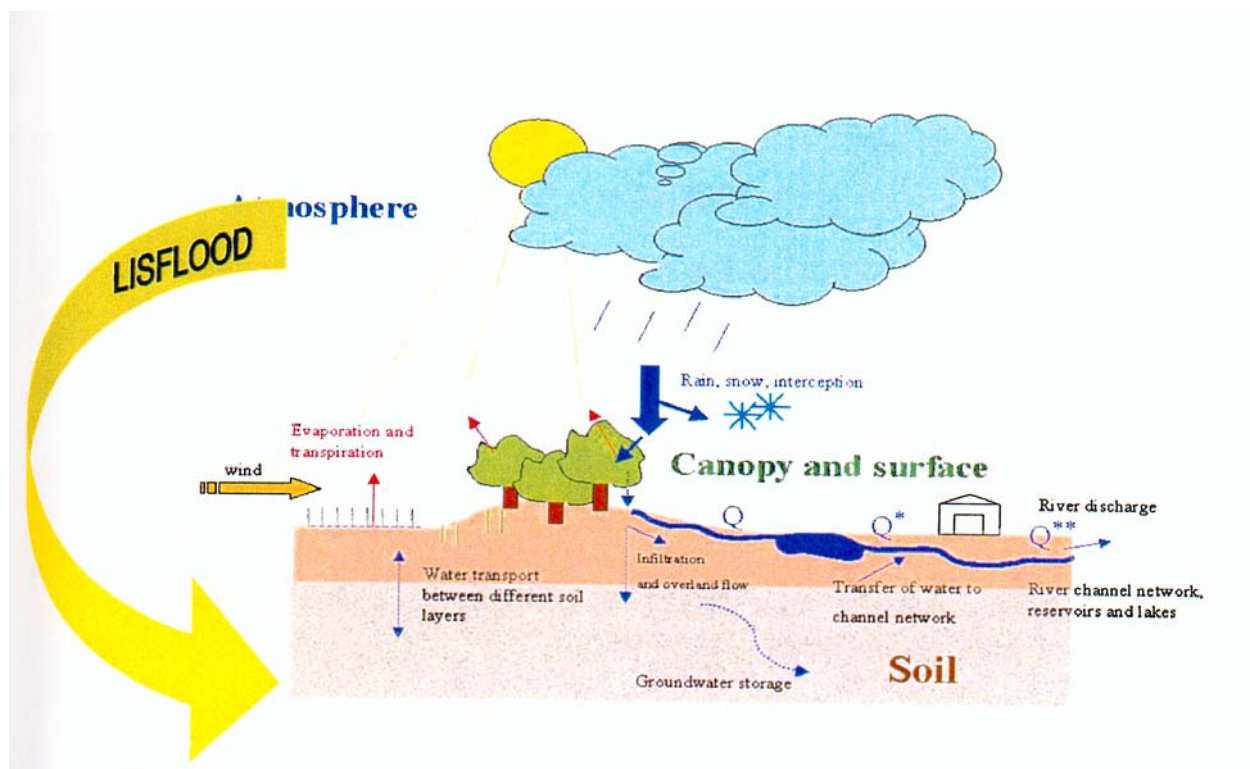


Fig. 8 : Illustration du cycle de l'eau modélisé par LISFLOOD.

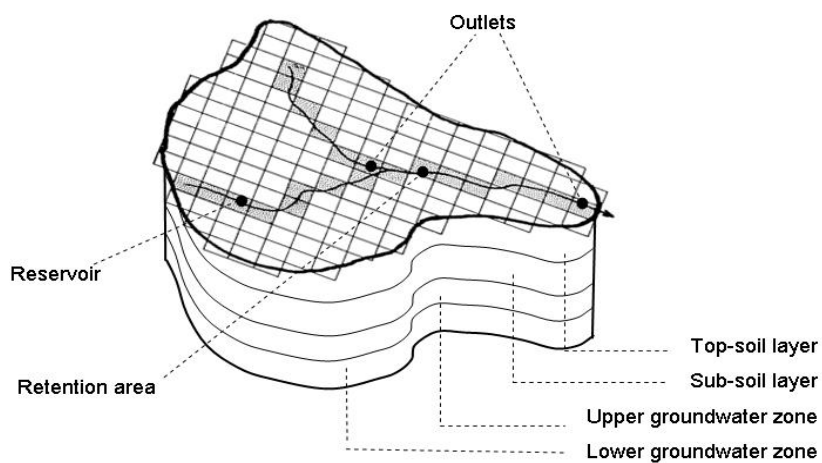


Fig. 9 : Illustration schématique de la représentation d'un bassin dans le model LISFLOOD.

A chaque pas de temps, LISFLOOD calcule d'abord les processus ayant lieu au dessus de la surface:

- Division des précipitations en eau et neige.
- Interception des précipitations par la végétation.
- Transpiration, évapotranspiration.
- Fonte des neiges.

Ensuite il calcule la quantité d'eau infiltrée dans le sol et la quantité transporté comme eau de surface tombant directement dans une rivière ou rejoignant une rivière.

Enfin, le sol est représenté comme la superposition de 4 couches dont 2 représentent les nappes souterraines. Dans chacune de ces couches, aussi bien le transport vertical qu'horizontal est représenté incluant percolation, remontée capillaire et drainage dans le sous-sol. Le diagramme suivant (fig.10) représente le cycle de l'eau tel qu'il est simulé dans LISFLOOD.

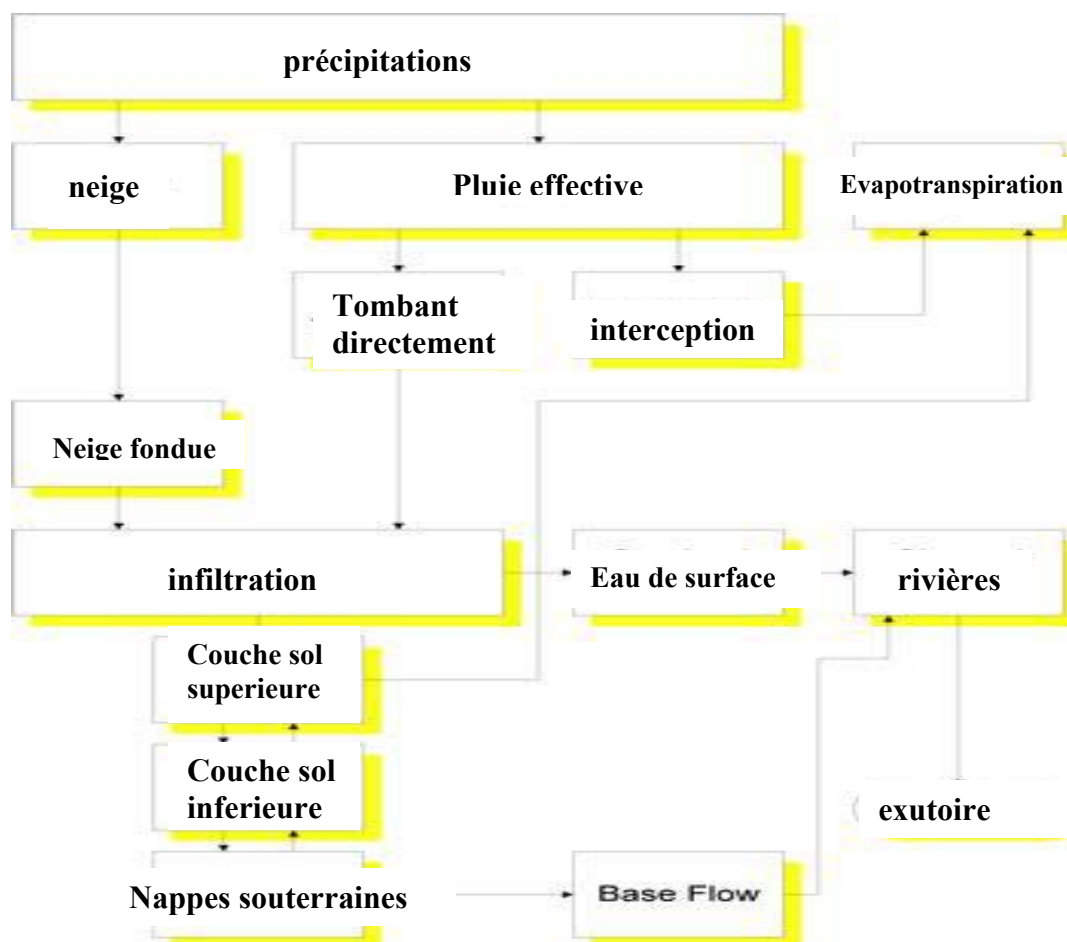


Fig. 10 :organisation de la simulation du cycle de l'eau dans LISFLOOD.

Il est également possible de simuler grace à LISFLOOD des lacs ou des réservoirs.

Les rivières peuvent être simulées sous forme rectangulaire ou trapéziiale et chaque rivière se voit associer un lit de rivière fonctionnant comme suit:

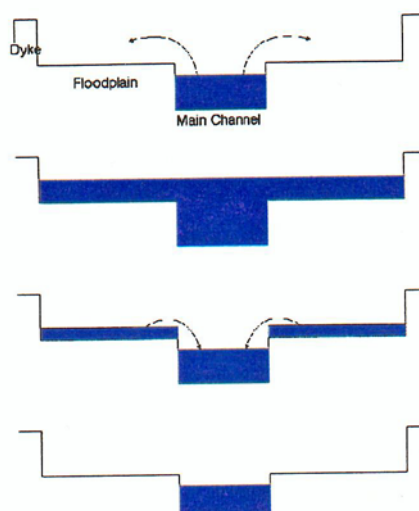


Fig. 11 : Modélisation d'un lit de rivière par LISFLOOD.

Lorsque la hauteur d'eau contenue dans la rivière atteint la profondeur de celle ci, l'eau s'écoule dans le lit de la rivière. Elle est alors temporairement stockée dans ce lit jusqu'à ce que la hauteur d'eau dans la rivière redescende en dessous de la profondeur de celle ci.

II.2 Source des données d'entrée et déroulement des simulations.

II.2.1 Sources des données d'entrée

a) Données 'physiologiques'

Toutes les données physiologiques utilisées pour cette étude sont issues de bases de données disponibles au JRC.

Topographie et informations sur les rivières :

Ces données sont issues de la base de données du CIS-JRC (Catchment-based Information System). Les données sont disponibles avec une résolution de 1km×1km.

Couverture des sols (Land Cover) :

Ces données sont issues de la base de données CORINE, disponible à Ispra, qui répertorie les différents types de couverture des sols (végétation etc...) sur toute l'Europe en 48 classes. Ces données sont disponibles avec une résolution de 1km×1km.

Type de sols :

Ces données sont issues de l'European Soil Database-JRC et sont disponibles avec une résolution de 1km×1km.

b) Données météorologiques :

2 bases de données météorologiques ont été utilisées pour cette étude :

- JRC – MARS.
- OHM-CV.

La base de données JRC-MARS.

Elle fournit des données journalières telles que la température, l'humidité relative et les précipitations.

Cependant, sur la région Cévennes-Vivarais, ces données sont fournies par seulement 5 stations synoptiques et sont disponibles uniquement sur une grille de 50km×50km. Ainsi la région complète n'est couverte que par 12 mailles, les données issues de cette base de données sont donc très basiques, d'où la nécessité de disposer d'une base de données plus précise, avec une plus haute résolution.

Une solution envisagée a été d'interpoler à nouveau ces données sur une grille plus fine de 1 km×1km afin d'introduire plus de variabilité dans ces données.

La base de données OHM-CV.

Cette base de données, pilotée par le laboratoire LTHE, est le fruit d'une collaboration entre 8 laboratoires français et 4 services à vocation opérationnelle (Météo France, Direction de l'équipement, Direction de l'environnement, EDF). Elle fournit des données de haute résolution pour la région Cévennes-Vivarais en terme de précipitations et de débits.

Les moyens d'observation opérationnels disponibles dans la région Cévennes-Vivarais comprennent :

- Les radars météorologiques du réseau ARAMIS de Météo France de Nîmes, Bollène et Sembadel, fournissant des données toutes les 5 minutes.

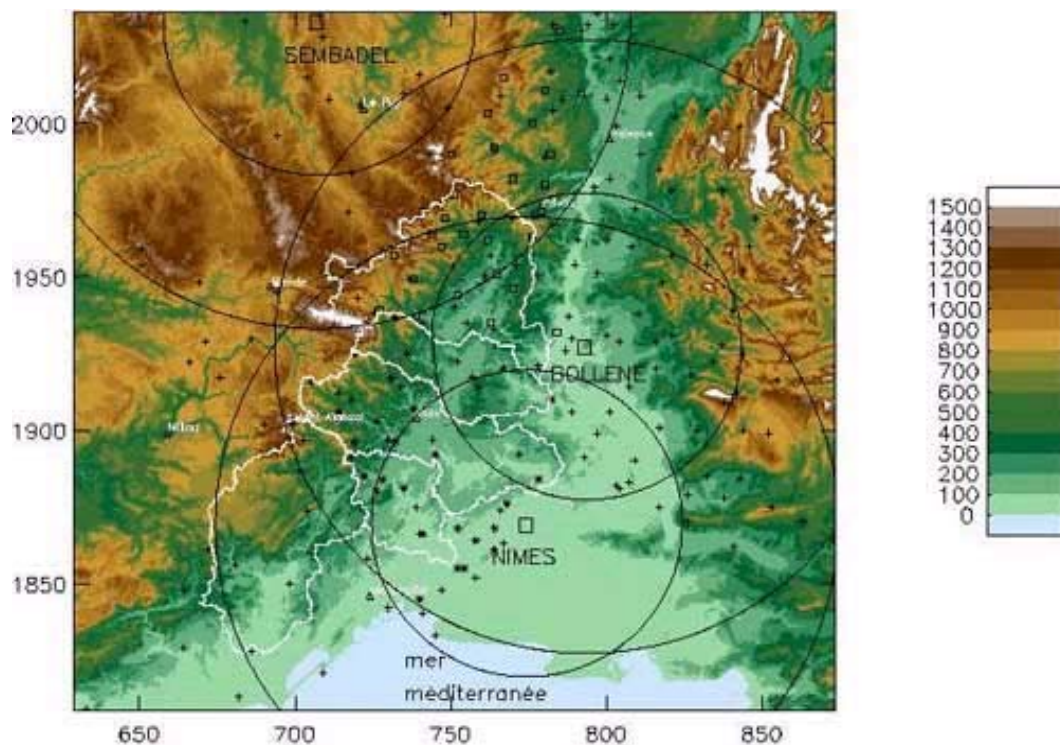


Fig. 12 : Localisation et portée des radars.

- Un réseau d'environ 200 pluviomètres et 50 points de contrôle des débits des rivières fournissant des données horaires.

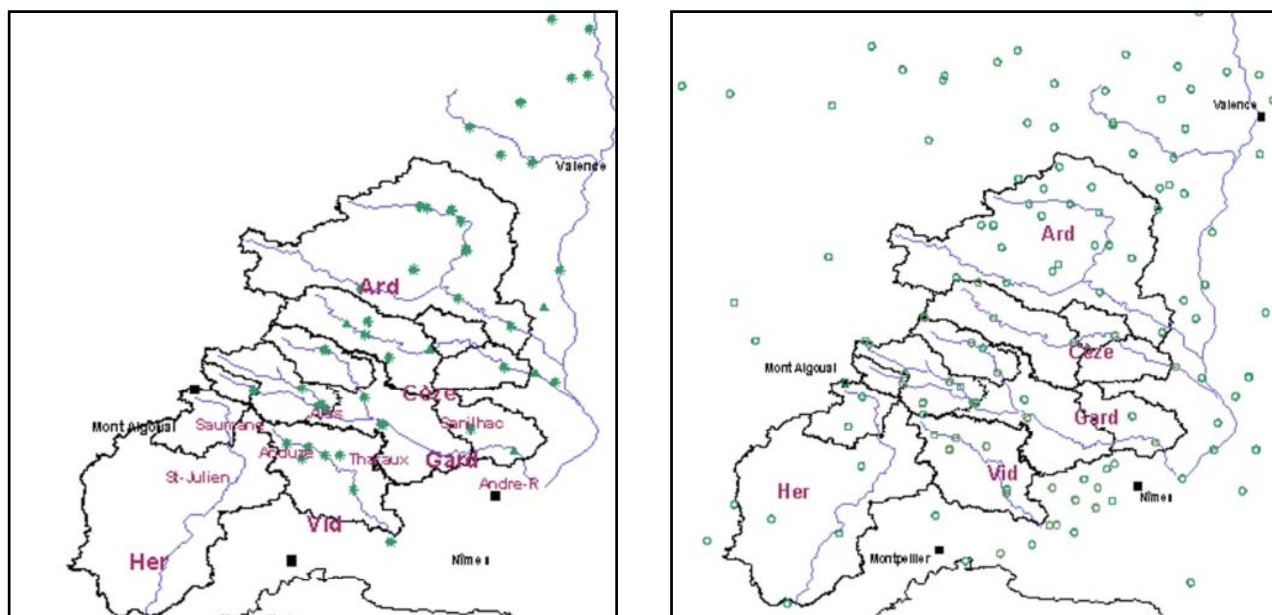


Fig. 13 : Réseaux OHM-CV de limnimètres (gauche) et de pluviomètres (droite).

Cependant, seules les données pour les automnes 2000, 2001 et 2002 sont à ce jour disponible dans la base de données OHM-CV.

En terme de précipitations, nous avons donc 3 types de données d'entrée différentes

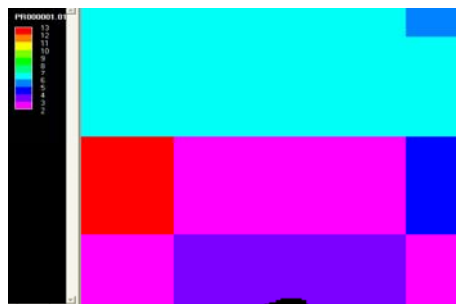


Fig. 14 : Données de pluie MARS initiales (résolution $50 \times 50 \text{ km}^2$).

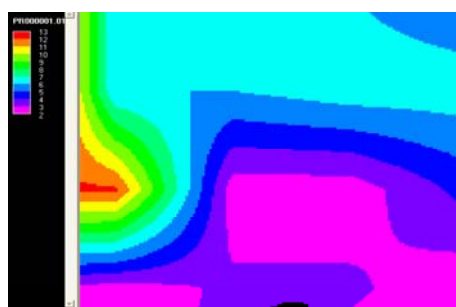


Fig. 15 : Données de pluie MARS interpolées sur une grille de $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$.

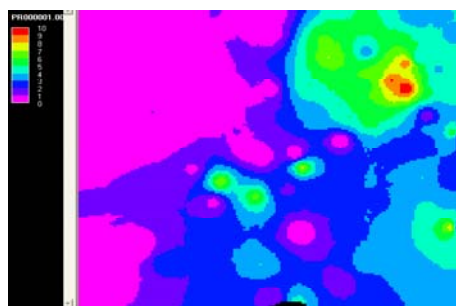


Fig. 16 : Données OHM-CV issus des pluviomètres et interpolées par distance inverse.

Comme le montre ces cartes, les données OHM-CV ont une résolution bien plus fine d'un point de vue spatial que celles issues de MARS. La résolution temporelle est également meilleure pour les données OHM-CV (données horaires pour OHM-CV contre journalières pour MARS).

II.2.2 Déroulement des simulations

a) Evénements pluvieux étudiés

Pour cette étude, il a été décidé de s'intéresser principalement aux périodes automnales 2000 et 2001 pour lesquelles on dispose de données complètes (pluie et débit), ainsi qu'à l'événement du 8/9 septembre 2002 pour lequel seules les données de pluies sont disponibles, la violence de la crue ayant mis en défaut les mesures de débit.

Les tableaux suivants résument les différents événements pluvieux pour les années 2000 et 2001. Pour chaque événement, on donne le cumul de pluie maximum relevé en mm (un cumul de 1 mm correspondant à 1 litres d'eau par mètres carrée) et non la moyenne des précipitations sur la région.

N° de l'évènement	Dates de l'évènement	Durée cumulée de l'évènements	Cumul max horaire cumulé (en mm)
1	19 sept de 5 à 24 h 20 sept de 4 à 21 h	35 h	130
2	28 sept de 5 à 24 h 29 sept de 0 à 24 h	41 h	230
3	12 oct de 10 à 24 h 13 oct de 0 à 24 h	36 h	191
4	5 nov de 18 à 24 h 6 nov de 0 à 20 h	25 h	100
5	12 nov de 0 à 24 h 13 nov de 0 à 24 h	46 h	243
6	23 nov de 0 à 19 h	19 h	123
7	1 dec de 19 à 24 h 2 dec de 0 à 18 h	23 h	152
8	7 dec de 5 à 24h 8 dec de 0 à 12 h	37 h	225
9	24 dec de 0 à 24 h 25 dec de 0 à 6 h	30 h	152

Tab. 1 : Relevé des événements pluvieux de l'automne 2000.

N° de l'évènement	Date de l'évènement	Durée cumulée de l'évènement	Cumul max horaire cumulé (mm)
1	6 oct de 16 à 24 h 7 oct de 0 à 7 h	15 h	350
2	9 oct de 0 à 24 h	24 h	115
3	18 oct de 7 à 18 h	11h	121
4	20 oct de 7 à 20 h	13 h	121

Tab. 2. : Relevé des événements pluvieux de l'automne 2001.

Parmi tous ces événements, le seul qui provoqua vraiment une crue fut celui du 6/7 octobre 2001 pour lequel le Vidourle déborda de son lit.

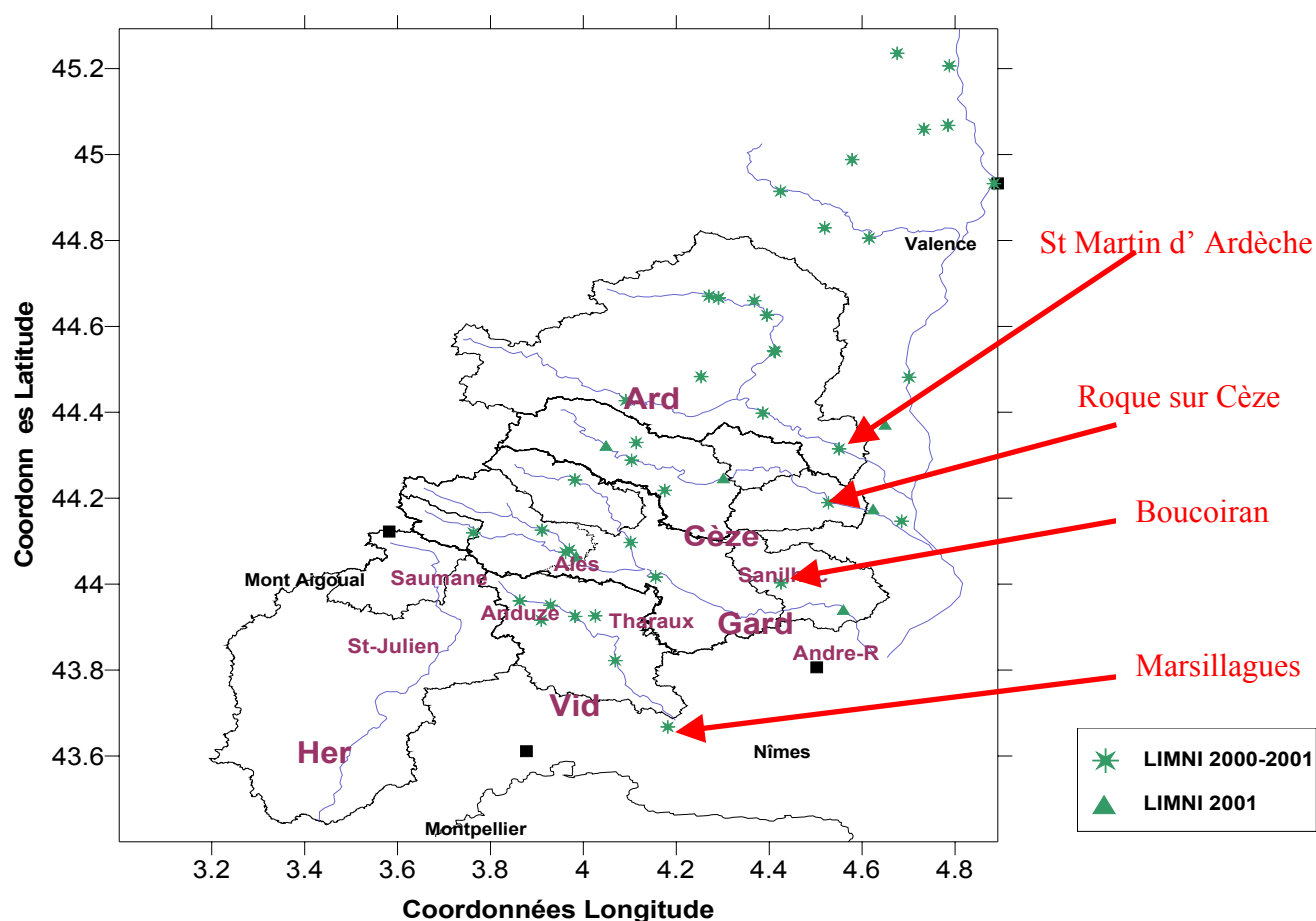
N° de l'évènement	Date de l'évènement	Durée cumulée de l'évènement	Cumul max horaire cumulé (mm)
1	8 et 9 septembre 2002	7 h	680

Tab. 3 : Événement pluvieux du 8/9 septembre 2002

Il est difficile de savoir de quelle nature sont les phénomènes météorologiques donnant lieu à ces événements pluvieux. Cependant, durant la période automnale et compte tenu de la situation cévenole, ils sont pour la plupart de nature convective sans pour autant donner lieu à des crues éclairs, ceci dépendant de la situation météorologique et hydrologique.

b) Localisation des stations choisies pour comparer mesures et simulations.

Les mesures de débit, pour la région d'étude, ne sont disponibles que pour les années 2000 et 2001. Nous avons donc, dans un premier temps, décidé de concentrer nos simulations sur ces 2 périodes et de comparer les débits simulés à ceux observés pour les 4 exutoires (c'est à dire les stations situées en sortie de bassins) des bassins instrumentés : St martin d'Ardèche (Ardèche), Roque sur Cèze (Cèze), Boucoiran (Gard), Marsillagues (Vidourle) :



Puis, une fois ces simulations et le calibrage du modèle effectués, l'événement du 8/9 septembre a été simulé.

c) Déroulement des simulations pour les années 2000 et 2001.

Bien que les périodes intéressantes pour la simulation soient les périodes automnales, le modèle LISFLOOD a besoin d'être 'initialisé' car un certain nombre de paramètres ne sont pas connus à priori comme par exemple l'humidité dans le sol ou le débit initial dans les rivières. Il faut donc commencer les simulations avant les périodes automnales. Il a donc été décidé de commencer les simulations journalières le 1^{er} janvier 1998 (Water-Balance simulation) afin d'obtenir de bonnes conditions initiales pour les 2 périodes automnales.

Ceci implique l'utilisation, dans tous les cas, des données MARS de janvier 1998 à septembre 2000, de janvier à septembre 2001 et de janvier 2002 à septembre 2002, périodes pour lesquelles les données OHM-CV ne sont pas disponibles.

Les simulations d'automne 2000 et 2001 ont été effectuées avec un pas de temps d'une journée mais également d'une heure alors que la simulation de l'événement du 8/9 septembre est exclusivement horaire.

Ci dessous est résumé 'l'organisation' des quatre principales simulations pour 2000 et 2001 :

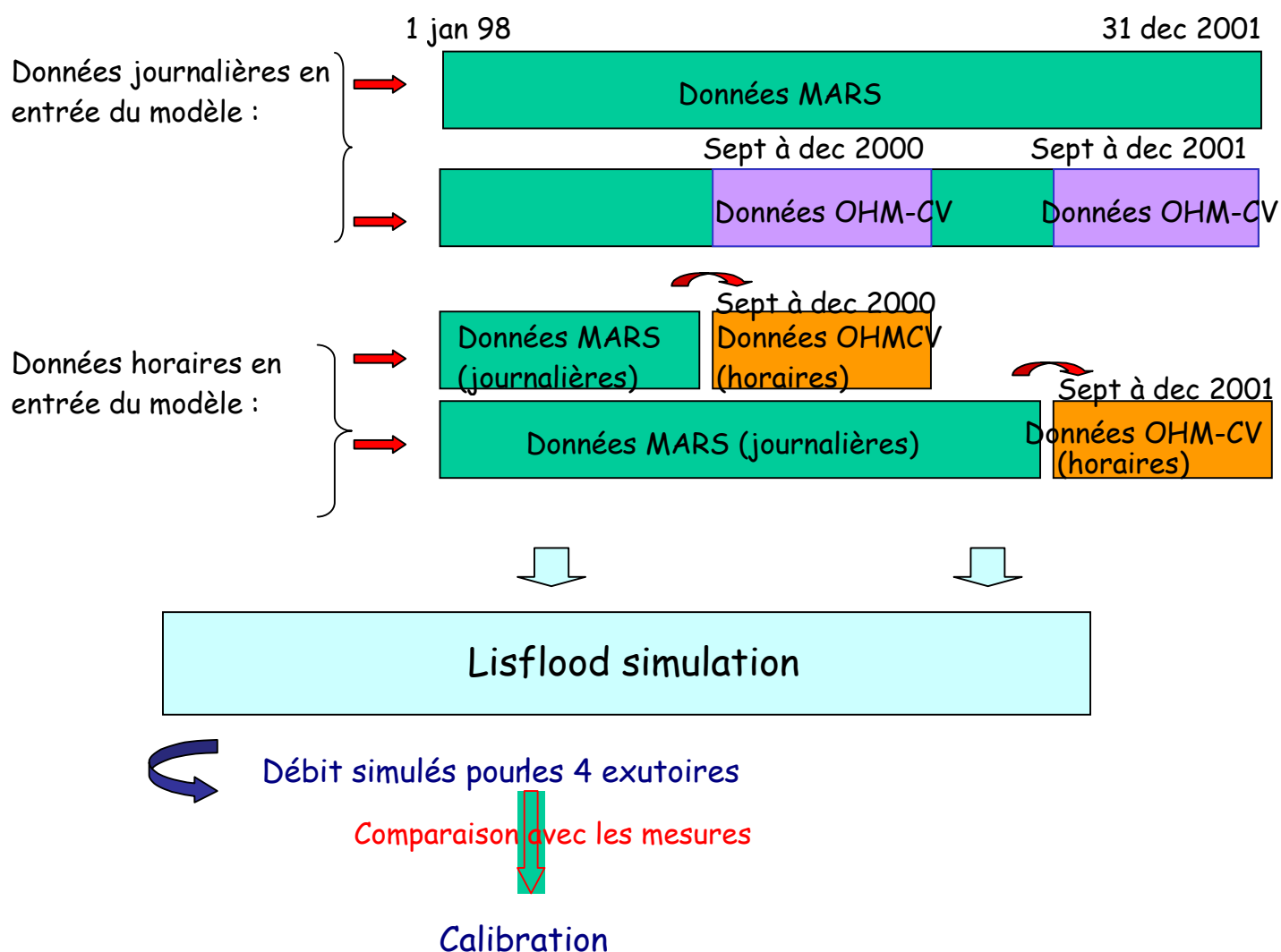


Fig. 17 : Organigramme représentant le déroulement des simulations.

Comme le montre l'organigramme Fig.17, quatre principales simulations ont été effectuées, chacune se différenciant des autres par ses données d'entrées pluie qui peuvent être journalières ou horaires et provenir de la base OHM-CV ou MARS. Une fois la simulation terminée, les débits simulés pour les quatre exutoires sont comparés avec les débits mesurés. Suivant les résultats, on procède à la phase de calibrage consistant à réévaluer certains paramètres afin d'obtenir de meilleurs résultats.

Il est à noter que la base OHM-CV ne dispose pas d'informations sur la température ou encore l'humidité relative, les données MARS seront donc toujours utilisées pour ces données d'entrées.

La simulation de l'événement du 8/9 septembre 2002 s'est déroulée de la même manière que les simulations horaires 2000 et 2001. Les données MARS ont été utilisées de janvier à septembre 2002 pour obtenir les conditions initiales au 1^{er} septembre 2002, et la simulation horaire a alors pu être lancée en utilisant les données OHM-CV.

Pour cette simulation, le modèle n'a pas été recalibré en fonction des résultats pour cette période étant donné que les mesures de débits ne sont pas disponibles, mais l'on s'est servi des valeurs de calibrage choisies pour les années 2000 et 2001.

La partie suivante présente les résultats obtenus sur les simulations des événements 2000, 2001 et 2002.

III. Résultats et analyses

III.1 Test des différentes bases de données météorologiques.

III.1.1 Simulations avec les données de précipitation issues de la base MARS.

Les résultats obtenus pour l'année 2000 et 2001 sont présentés sur la fig.18 pour les 4 exutoires, en utilisant les données précipitations de la base MARS, interpolées sur une grille de 50km×50km :

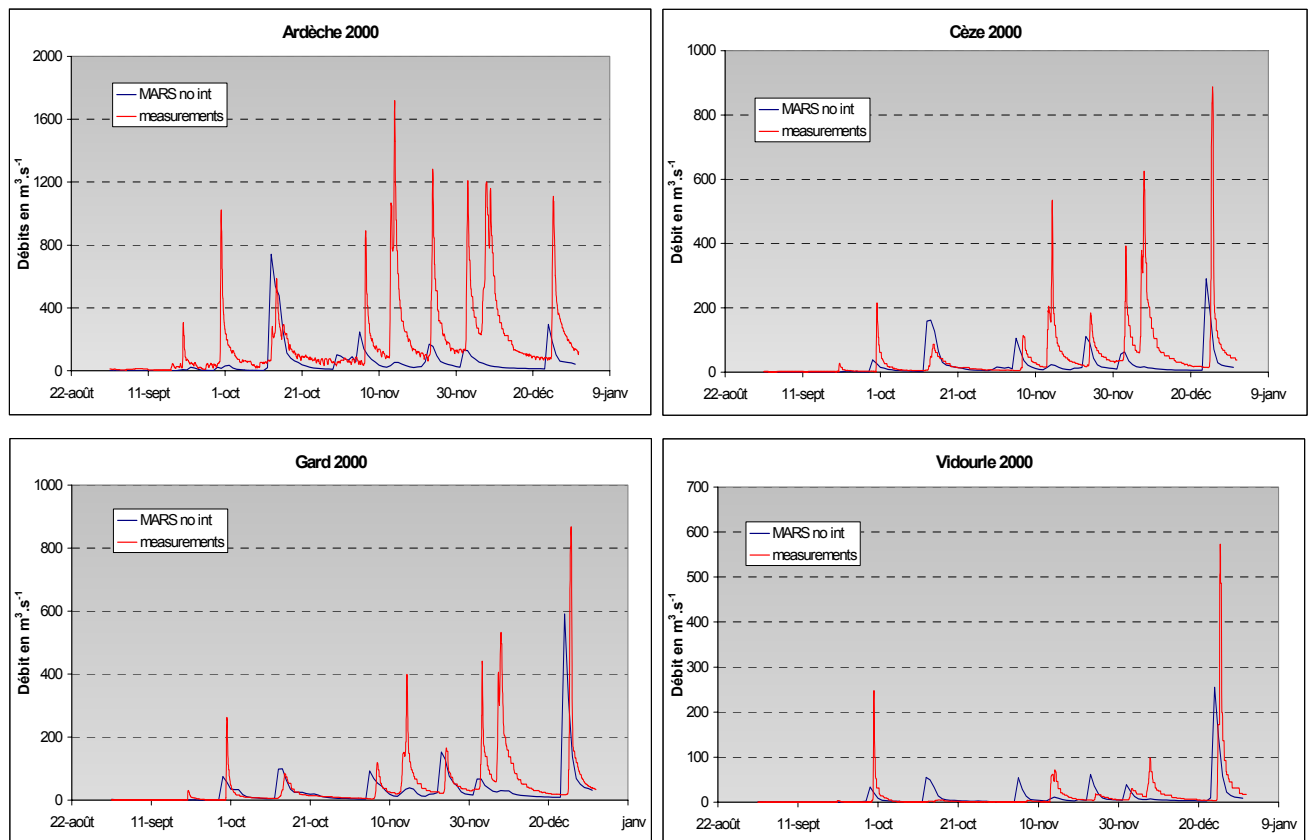


Fig. 18 : Débit mesurés et simulés avec les données MARS pour l'année 2000 pour les quatre exutoires.

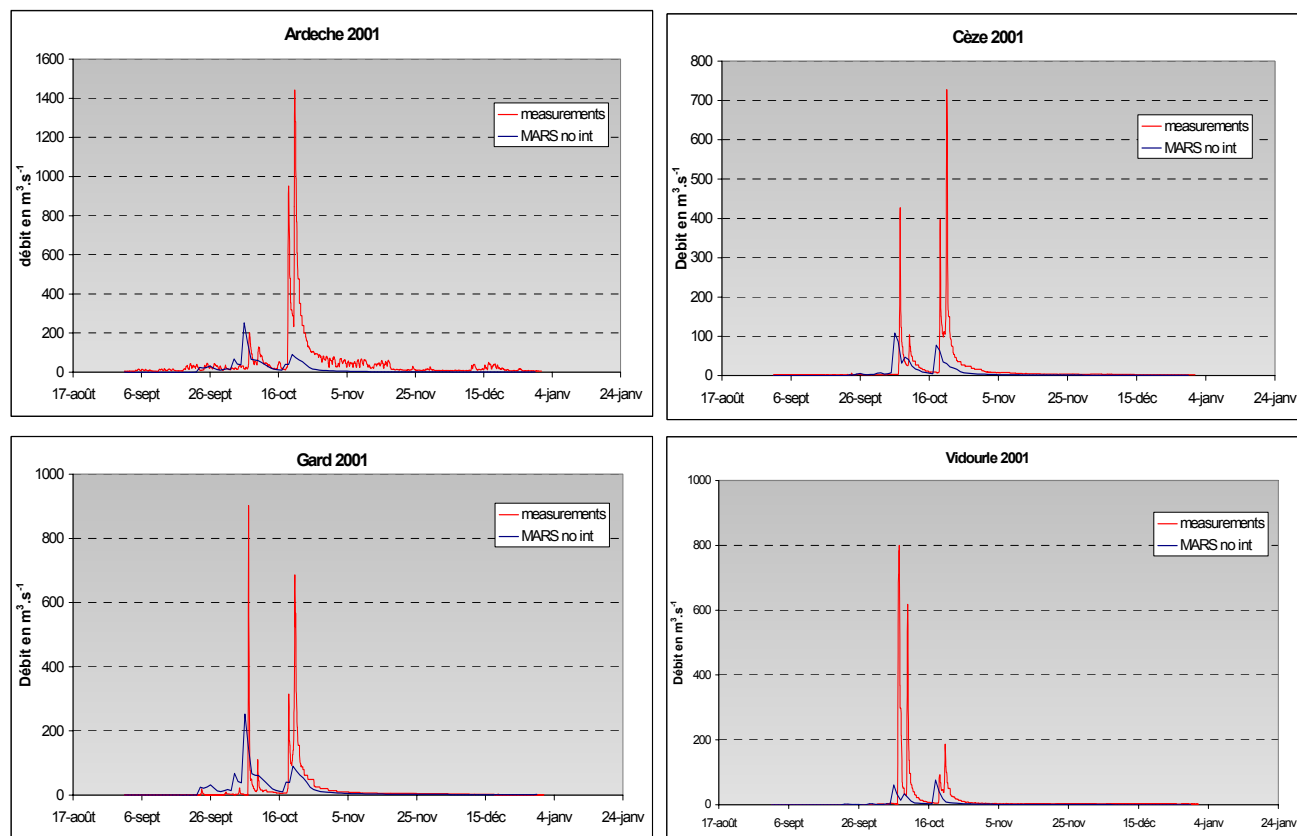


Fig. 19 : Débit mesurés et simulés avec les données MARS pour l'année 2001 pour les quatre exutoires.

Les résultats de ces simulations sont peu satisfaisants. Le débit simulé est très largement sous estimé par rapport au débit mesuré que ce soit en valeur moyenne ou en hauteur de pic. Cependant le modèle fournit tout de même une réponse à la plupart des événements même si cette réponse est faible et intervient en avance.

Cette sous estimation provient du fait que les données MARS pour la région Cévennes-Vivarais sont produites par seulement 5 stations synoptiques et sont interpolées sur une grille très grossière compte tenu des dimensions de la région observée. Ainsi, le réseau de mesures n'est pas assez dense pour saisir un événement pluvieux localisé ce qui est souvent le cas dans la région Cévennes-Vivarais. De plus la faible résolution des mailles de la grille d'interpolation ne permet pas de redistribuer correctement la pluie sur les différents bassins. Un événement diffère cependant des autres : l'événement du 14/15 octobre 2000 pour lequel le modèle estime relativement bien et même surestime le débit observé. Ceci peut être le fait d'une pluie localisée sur une station synoptique et donc relativement bien évaluée.

Afin de donner plus de variabilité spatiale aux données MARS, une nouvelle interpolation sur une grille de $1\text{km} \times 1\text{km}$ a été effectuée.

Les résultats obtenus sont assez décevants comme le montre la fig.20 représentant les débits mesurés et simulés avec ou sans interpolation additionnelle à l'exutoire du bassin de l'Ardèche pour l'année 2000 :

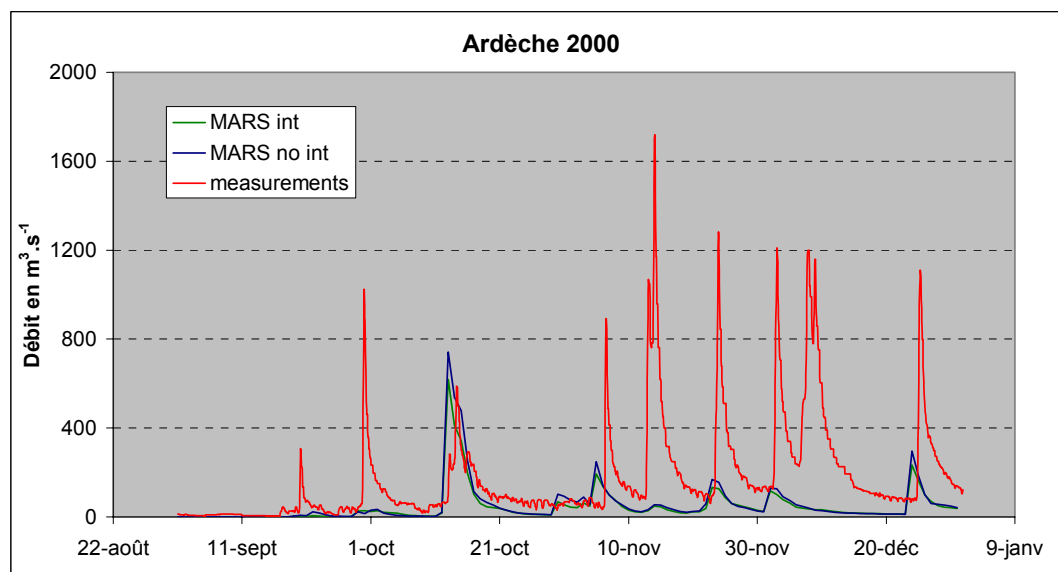


Fig. 20 : Débits observés et simulés avec ou sans interpolation additionnelle à l'exutoire du bassin de l'Ardèche pour l'année 2000

Contrairement à ce que l'on pourrait penser les données interpolées ne reproduisent pas forcément mieux le comportement du débit des rivières (certains événements sont mieux reproduit, d'autre non). Il faut dire que ces données MARS appliquées à la région des Cévennes sont tellement tronquées, et représentent tellement mal la distribution effective de pluie que l'interpolation additionnelle ne peut pas introduire de meilleure visibilité des pluies.

L'utilisation d'une base de données plus précise est donc la seule solution pour espérer reproduire de façon correcte les débits mesurés dans les rivières.

III.1.2 Simulations avec les données de précipitation issues des pluviomètres de la base OHM-CV.

a) Simulations journalières

Une nouvelle simulation a été effectuée en remplaçant, pour la période automnale, les données pluie de la base MARS par celles de la base OHM-CV contenant environ 40 fois plus de stations de mesures de pluies.

Les résultats obtenus sont radicalement différents comme le montre la fig.21:

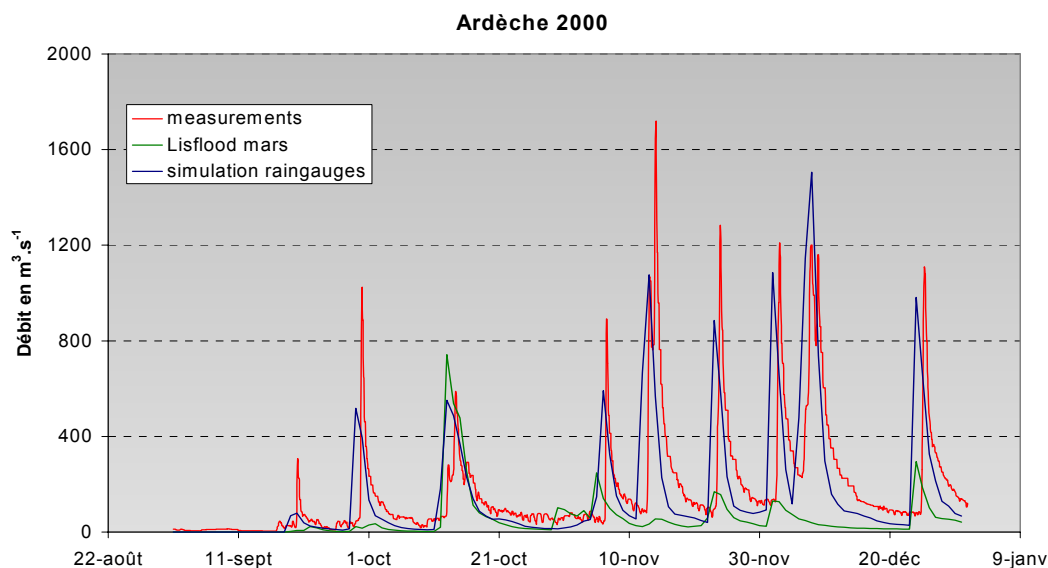


Fig. 21 : Débit journalier observé et simulés avec les bases de données MARS et OHM-CV à l'exutoire du bassin de la Cèze pour l'année 2000.

La chronique de débit simulée est maintenant beaucoup plus proche de celle observées en terme de hauteur de pic et de débit de base, c'est à dire le débit de la rivière lorsque aucun événement pluvieux ne vient la grossir. Ces constatations s'appliquent pour les événements 2000 et 2001.

Ainsi, un réseau dense d'au moins 200 pluviomètres semble être requis afin d'observer une réponse en débit correcte.

Cependant, bien que satisfaisante en comparaison de celles obtenues avec les données pluie MARS, cette simulation est loin d'être parfaite :

- On observe toujours un décalage temporel, le modèle répond trop rapidement à la sollicitation de pluie.
- Bien que tous les événements soient bien marqués, le modèle sous-estime généralement de manière assez importante le débit pour les 2 années et les 4 bassins.

b) Simulations horaires

Les phénomènes à l'origine des pluies sont généralement à l'échelle de l'heure. Aussi il paraît crucial d'effectuer les simulations non pas à l'échelle journalière mais horaire. Ceci nécessite de disposer de données d'entrée météorologiques horaires et, particulièrement, de données de pluie horaires.

Etant donné que la base de données MARS ne contient que des données journalières, nous n'utiliserons que les données pluies de la base OHM-CV.

Cependant, pour les autres données météorologiques tels que la température ou l'humidité, nous ne disposons que des données journalières MARS, elles seront donc utilisées en tant que données horaires (dans une journée, la même température est reproduite 24 fois). Cette approximation n'a cependant pas de grande influence pour la modélisation des débits en période de crues car, dans ce cas, des phénomènes liés à la température et à l'humidité (tels que l'évaporation qui peut jouer un rôle à l'échelle d'une année), ne modifient guère la chronique de débits.

Ces simulations horaires n'ont été effectuées que pour les 2 périodes d'automne 2000 et 2001 car nous ne disposons de données horaires que pour ces 2 périodes, cependant il eût été inutile de traiter des années entières en simulation horaire car la seule période subissant des crues importantes sur ces 2 années est la période d'automne. Les simulations horaires ne sont utiles qu'en période de crues pour saisir la variabilité temporelle des événements pluies déclenchant des crues.

Les conditions initiales utilisées pour ces simulations horaires sont extraites des simulations journalières précédant la période choisie.

Voici un exemple de résultats obtenus avec la simulation horaire :

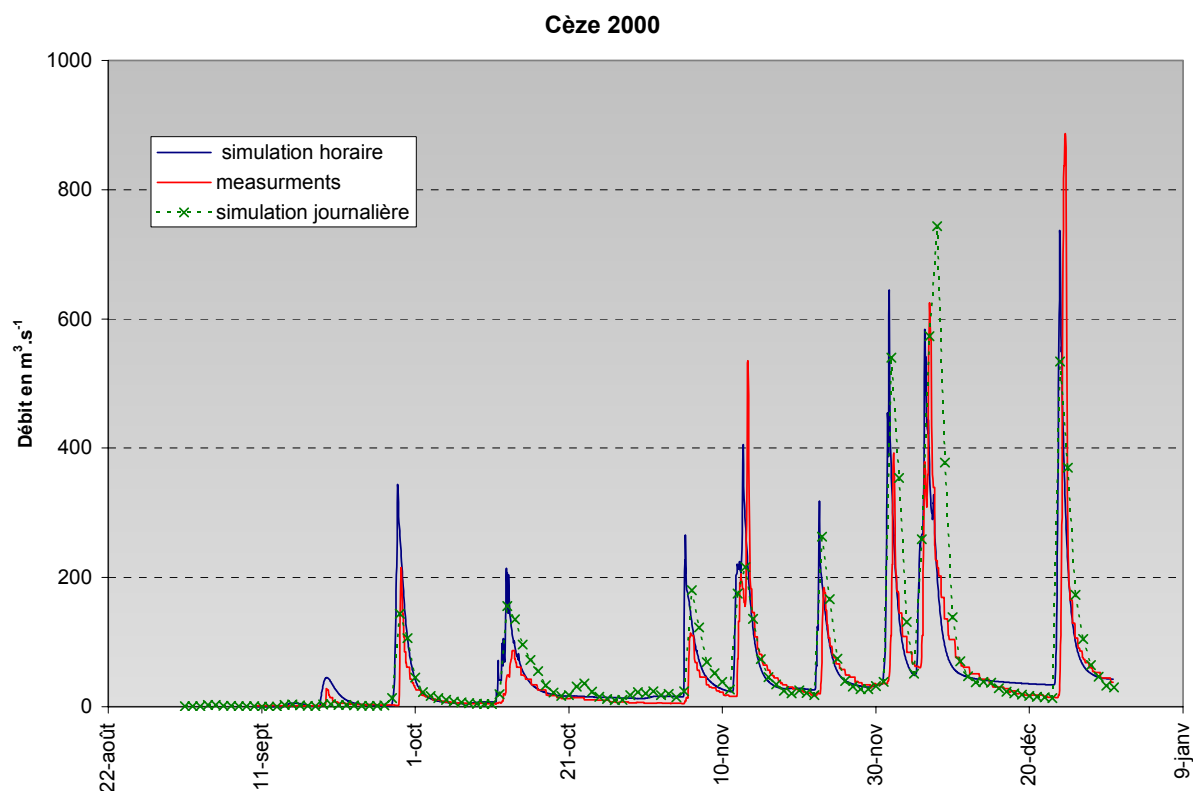


Fig. 22 : Débits observé et simulé à partir des données OHM-CV horaire et journalières à l'exutoire du bassin de la Cèze pour l'année 2000.

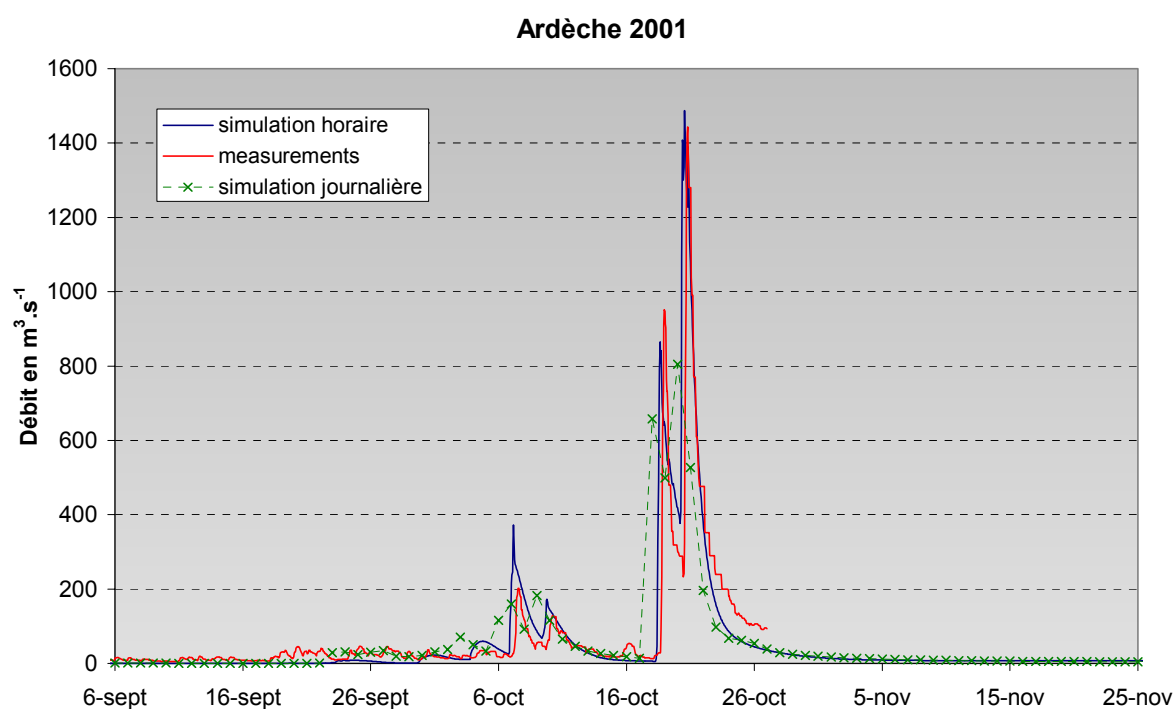


Fig. 23 : Débits observé et simulé à partir des données OHM-CV horaire et journalières à l'exutoire du bassin de la Cèze pour l'année 2001.

Ces simulations horaires sont manifestement meilleures que les journalières. Les principaux changements sont les mêmes quelque soit l'année ou le bassin étudié :

- La hauteur des pics de débit augmente lors du passage de la simulation journalière à horaire permettant de reproduire plus fidèlement les forts événements.
- La chronologie se fait plus précise
- la dynamique en descente et montée de débit est plus fidèle aux mesures.

On peut noter que, d'une manière générale, la simulation horaire surestime les petits pics de débit et sous-estime, tout de même, les grands.

Ainsi, la simulation avec les données horaires permet de reproduire plus fidèlement les chroniques de débit et, plus particulièrement, les pics de débits que la simulation journalière. En effet, plus de 90 % des événements pluvieux dans la région des Cévennes se développent sur moins d'une journée, la simulation journalière a donc tendance à les lisser et une pluie très intense pendant 3H est vu comme une pluie d'intensité moyenne sur la journée.

La bonne prise en compte de la variabilité temporelle des pluies caractéristiques des Cévennes est donc cruciale pour reproduire de façon correcte les débits mesurés.

III.2 Calibrage du modèle

LISFLOOD est un modèle de simulation à base physique : le comportement du sol est simulé en se basant sur des principes physiques.

Cependant, ce fonctionnement implique la connaissance de paramètres décrivant le comportement du sol tels que, par exemple, la conductivité hydraulique décrivant la vitesse de déplacement de l'eau dans le sol.

Dans le modèle, ces paramètres sont initialisés à l'aide de considérations géographiques. Ils sont évalués, assez grossièrement, suivant le type de sol, le type de végétation etc...

Mais, étant donné la faible résolution de l'échelle des données géographiques disponibles, et surtout la difficulté d'évaluer les paramètres pédologiques car il n'existe pas de base de données à cette échelle (il est nécessaire de les ajuster en se basant sur les résultats d'une analyse de sensibilité).

Les principaux paramètres à ajuster décrits sur la fig.24 sont :

- La quantité d'eau pouvant infiltrer les eaux souterraines par percolation. :GwPerc.
- La conductivité hydraulique des deux zones constituant le système de rétention des eaux souterraines : GwKUz et GWKLz.
- La conductivité à saturation de la couche sol supérieure : Ksat.

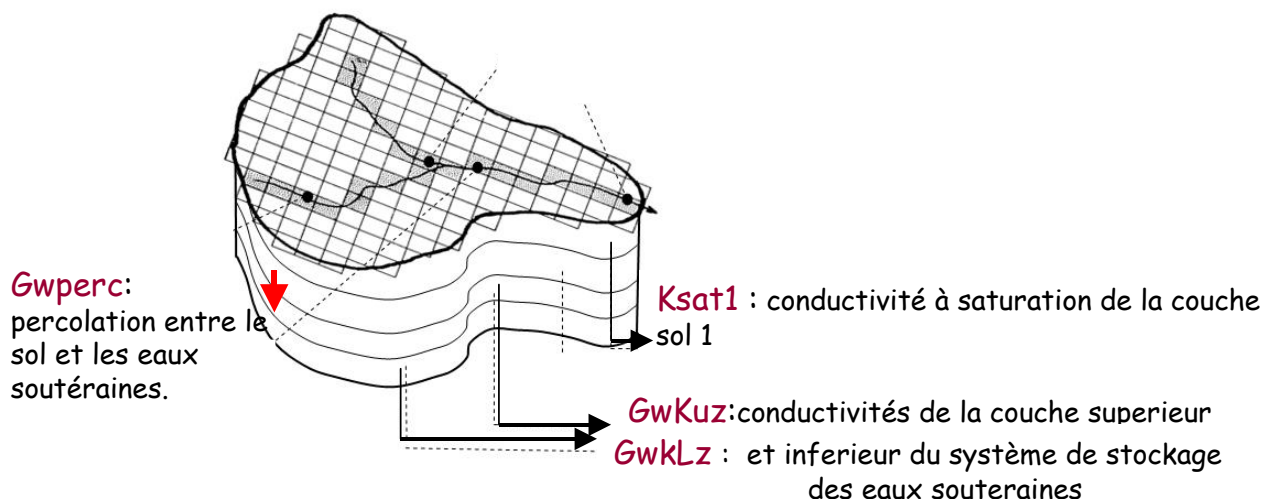


Fig. 24 : Paramètres utilisés par LISFLOOD pour caractériser le sol.

Pour cette étude, ils ont été évalués en prenant principalement en compte :

- Le débit de base.
- La hauteur des pics de débits.
- La dynamique de la courbe en montée de débit et en récession.

Ils ont été ajustés différemment pour chacun des 4 bassins, reflétant leurs singularités.

III.2.1 Influence des paramètres sur le débit simulé

Avant de développer les choix faits dans la valeur des paramètres pour chaque bassin, il est intéressant de se pencher sur l'influence de chaque paramètre sur le débit simulé.

a) Influence de la conductivité à saturation de la couche sol 1

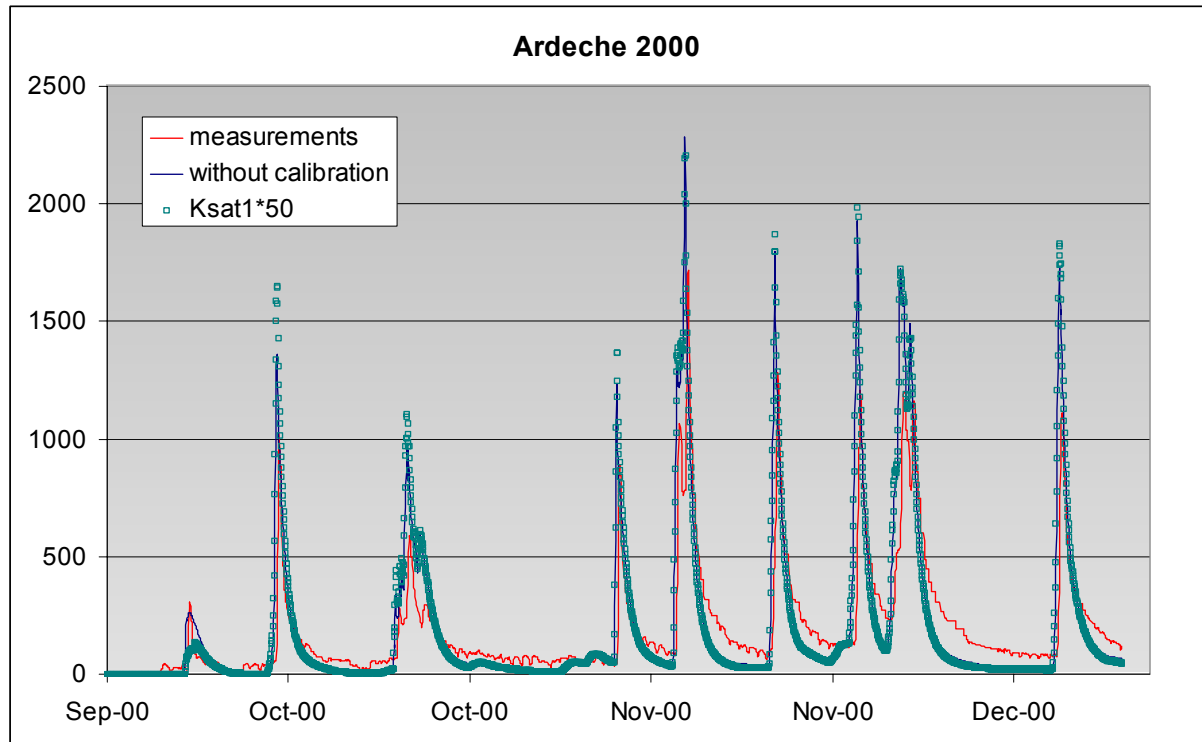


Fig. 25 : Influence de la conductivité à saturation de la couche sol 1 sur le débit simulé à l'exutoire du bassin de l'Ardèche pour l'année 2000.

D'une manière générale l'augmentation de la conductivité à saturation de la couche sol 1, fait augmenter la hauteur des pics de débit. En effet, plus cette conductivité est importante, plus le sol répond rapidement à la sollicitation représentée par la pluie. L'eau dans le sol va donc être transférée plus rapidement vers la rivière, ce qui va principalement augmenter les pics de débits.

Cependant cette influence n'est relativement importante que sur le plus grand bassin : l'Ardèche.

b) Influence de la limite d'eau infiltrant les eaux souterraines par percolation

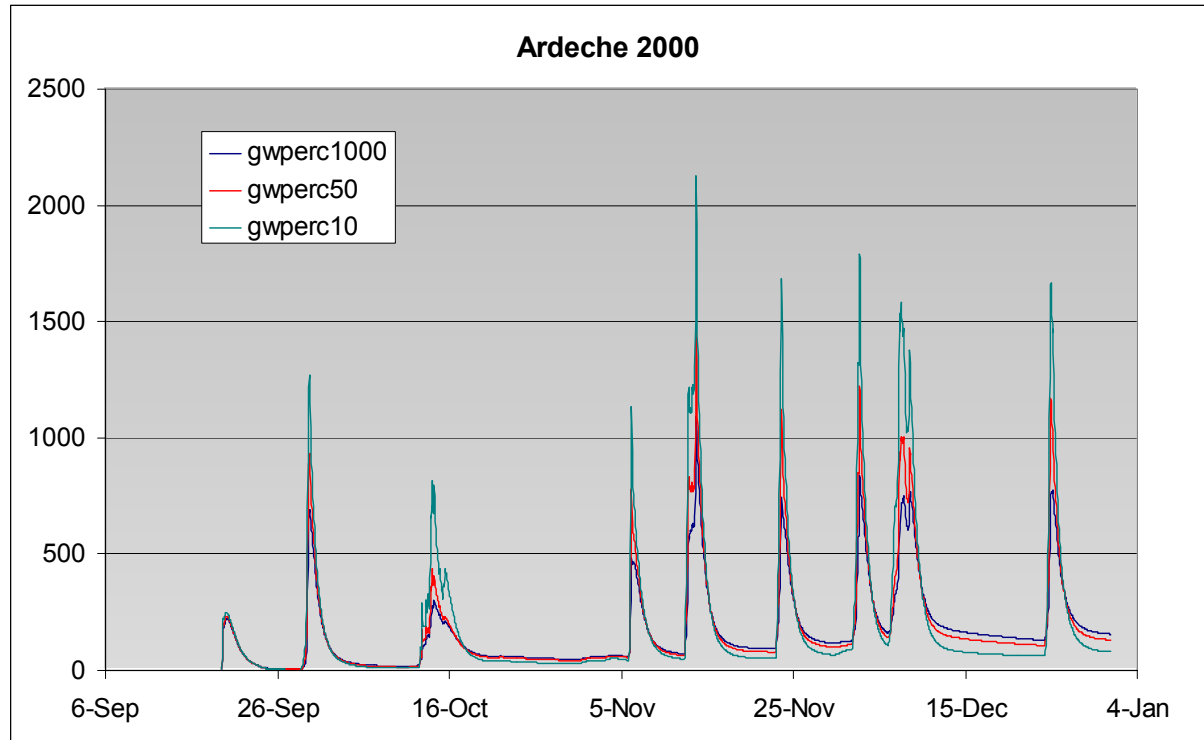


Fig. 26 : Influence de la limite d'eau infiltrant les eaux souterraines par percolation sur le débit simulé à l'exutoire du bassin de l'Ardèche pour l'année 2000.

Plus cette limite est importante, plus les pics de débits sont faibles et plus important est le débit 'moyen'. En effet, l'augmentation de cette limite a pour effet d'augmenter la quantité d'eau disponible dans les eaux souterraines et par conséquent de diminuer celle disponible dans le sol.

Or le débit moyen, c'est à dire le débit d'une rivière lorsqu'il ne pleut pas notablement, est principalement dépendant des eaux souterraines, il est donc logique d'augmenter ce débit moyen par l'augmentation de la quantité d'eaux souterraines. De plus, l'eau contenue dans le sol rejoint plus vite l'eau des rivières que celle des eaux souterraines, ainsi, alors que le sol réagira relativement vite à une forte pluie et viendra rapidement augmenter le débit des rivières, les eaux souterraines ont une réponse plus lente ce qui explique que les pics soient moins importants lorsque l'on transfère plus d'eau dans les eaux souterraines.

c) Influence de la conductivité de la zone supérieure de stockage des eaux souterraines.

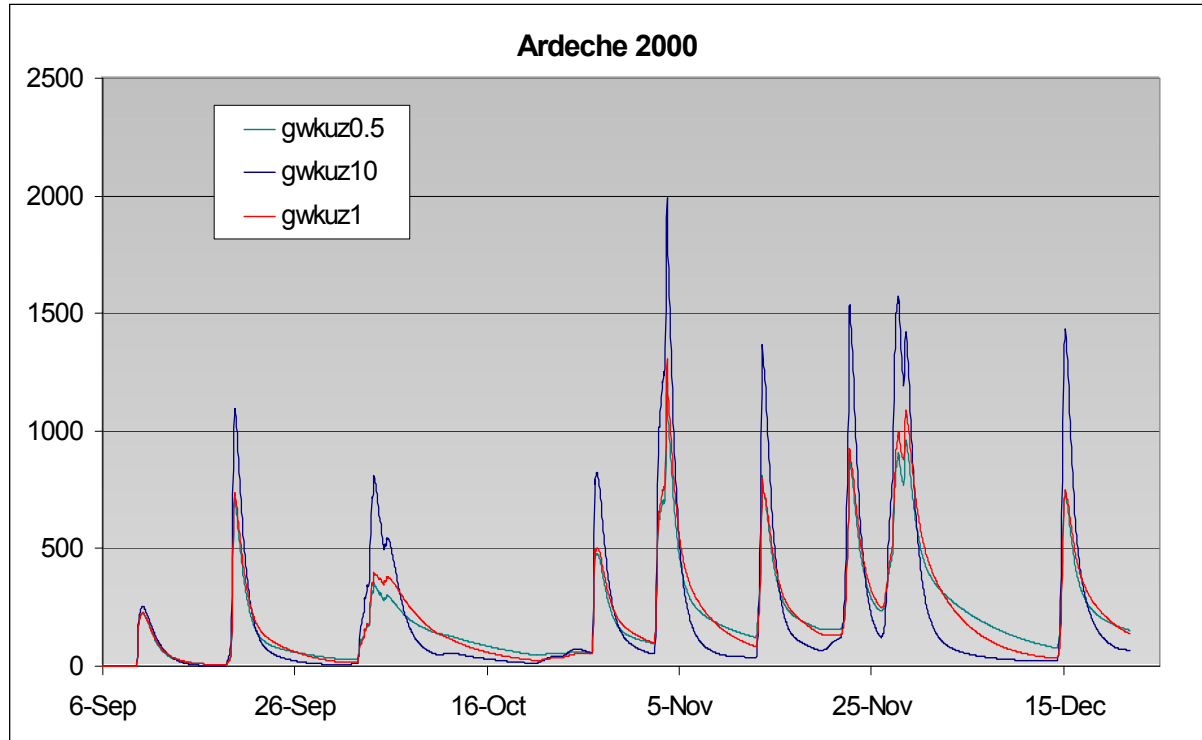


Fig. 27 : Influence de la conductivité de la zone supérieure de stockage des eaux souterraines sur le débit simulé à l'exutoire du bassin de l'Ardeche pour l'année 2000.

Plus cette conductivité est importante, plus le débit de base est faible et plus les pics de débits sont importants. En effet, l'augmentation de cette conductivité provoque une réponse rapide de la zone de stockage des eaux souterraines vers les rivières. La réserve en eau que représentent ces nappes souterraines va donc s'amenuiser au profit d'une réponse rapide en débit dans les rivières et donc de pics de débit plus importants.

Dans cette étude, la conductivité de la zone inférieure de stockage des eaux souterraines n'a quasiment pas d'influence sur le débit.

III.2.2 Calibrage choisi pour chaque bassin

Pour chaque bassin, différentes combinaisons de paramètres ont été testées, pour finalement choisir celle pour laquelle le débit simulé se rapprocherait le mieux du débit mesuré.

Les paramètres choisis sont récapitulés dans le tableau suivant :

	Ksat1	Gwkuz	Gwperc
Ardèche	×50	2	0.5
Gard	×1	4	50
Cèze	×50	100	25
Vidourle	×1	100	10

Tab. 4 : Paramètres choisis pour chaque bassin.

Dans le choix de ces paramètres de calibrage, il a fallu faire des compromis ne pouvant satisfaire à la fois une simulation fidèle des débits moyen, des hauteurs de pics et de la dynamique de montée et descente en débit.

Les paramètres choisis se révèlent, pour certain, avoir un sens physique. Ainsi le bassin du Gard dont le sol est plutôt calcaire et donc 'retient' l'eau, est caractérisé par une percolation importante et une conductivité de la zone de rétention des eaux souterraines très faible : une masse importante d'eau est transférée aux nappes souterraines et retenue dans la zone de rétention de part sa faible conductivité.

Le bassin de l'Ardèche semble quant à lui caractérisé par un écoulement important dans le sol. La quantité d'eau transférée aux nappes souterraines est faible de part la faible valeur de percolation.

Cependant, ce calibrage est difficile à effectuer car la tendance générale de la simulation ne se retrouve pas sur chaque événement d'une période. La simulation peut, pour un même bassin et pour une même année, sous-estimer un événement et en surestimer d'autres. Le calibrage se fait donc sur les tendances générales de la simulation mais il est certain qu'il faudrait disposer de plus d'années pour pouvoir réellement trouver un calibrage bien adaptée.

Les courbes ci-dessous présentent quelques simulations obtenus après calibrage :

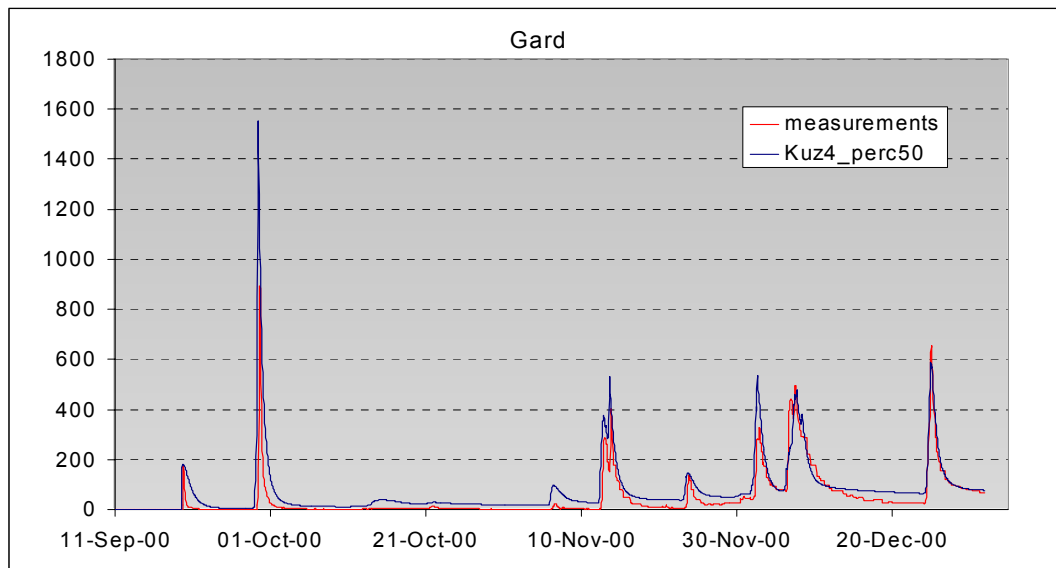


Fig. 28 : Débit observé et simulé après calibrage à l'exutoire du bassin du Gard pour l'année 2000.

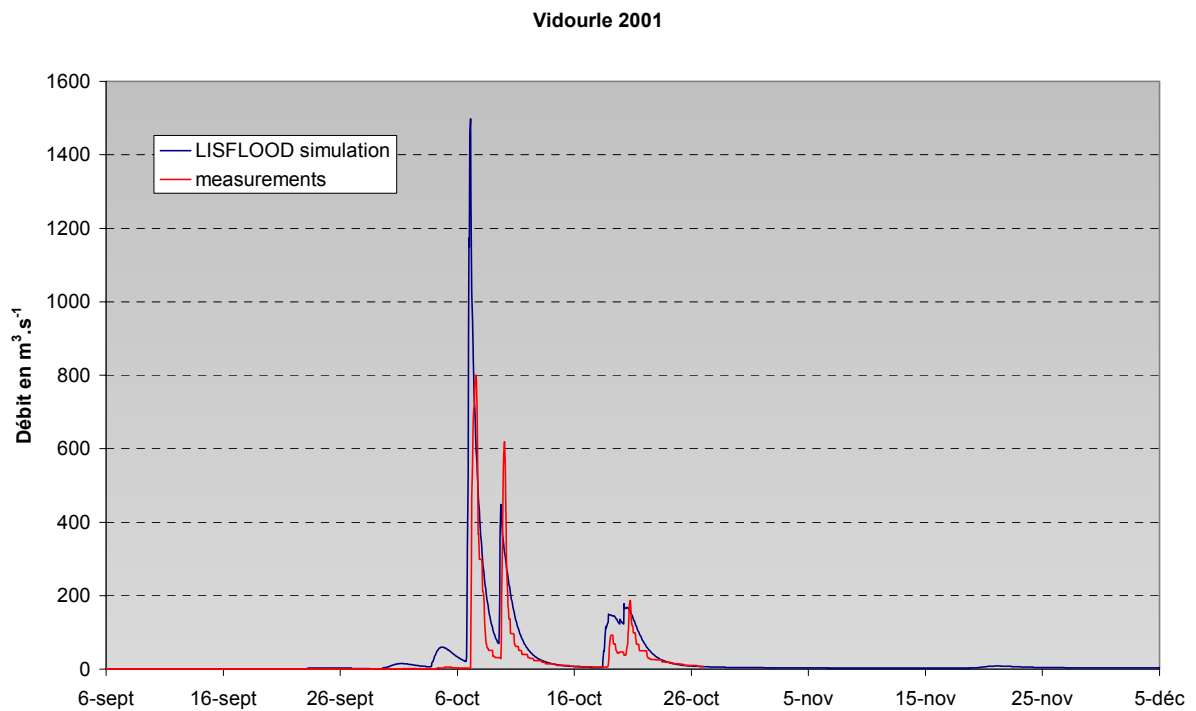


Fig. 29

Le calibrage est une phase indispensable de la modélisation car son influence sur les débits est importante et permet d'obtenir des débits simulés plus proche de ceux observés.

III.3 Analyse des résultats après calibrage.

III.3.1 Résultats obtenus sur les événements 2000 et 2001

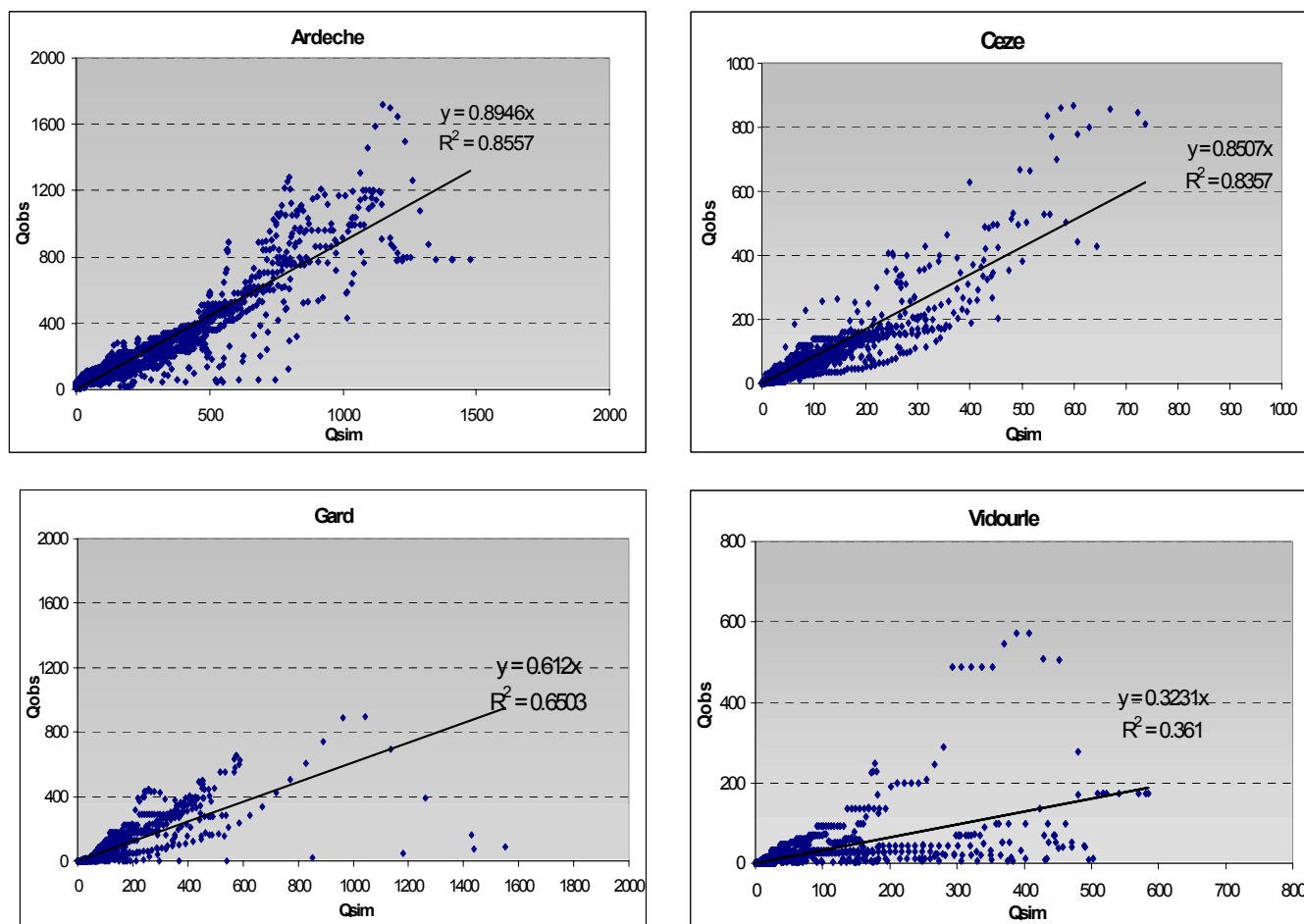


Fig. 30 : Comparaison des débits simulés et observés pour chaque bassin.

Sur ces graphiques sont représentés pour chaque heure, le débit observé en fonction de celui simulé pour l'année 2000. La simulation idéale aurait une pente de 1. Dans tous les cas le modèle a une tendance à la surestimation que l'on peut globalement estimer à 20 %.

On constate également que les meilleurs résultats sont logiquement obtenus pour le plus grand bassin et les moins bons pour le plus petit.

Dans le cas de l'Ardèche et de la Cèze, les coefficients de régression sont de l'ordre de 0.85 et 0.89, ce qui est déjà très bon pour un modèle hydrologique mais d'autant plus étonnant pour un modèle initialement adapté aux grands bassins et utilisé sur des petits.

On peut noter également un décalage quasi systématique entre simulation et mesure sur certains bassins pouvant aller jusqu'à 8H.

Ainsi les résultats sont finalement relativement bons, surtout pour les plus grands bassins. Cependant il reste quand même de grosses différences entre simulation et observation pour certains événements.

Ces erreurs peuvent être le fait de :

- LISFLOOD lui-même qui peut ne pas être adapté au cas des petits bassins soumis à des pluies principalement issus de phénomènes convectifs.
- La résolution spatiale trop faible des données d'entrée du modèle tels que les précipitations, les propriétés du sol etc...

Le principal problème provient du fait que, ne disposant pas de données plus fines, on ne peut statuer sur la part d'erreur provenant du modèle ou des données d'entrée. Il serait donc impératif de disposer en entrée du modèle de données plus fines, au moins pour les précipitations qui représentent le forçage le plus important du modèle.

Des données radar sont disponibles au LTHE mais ne sont pas encore transformées au format requis pour LISFLOOD. Elles permettraient de tester la réponse de LISFLOOD pour des données de variabilité, spatiales et temporelles, plus fine.

III.3.2 Résultats obtenus sur l'événement du 8/9 septembre 2002

Comme il a déjà été expliqué, aucune donnée en terme de mesures de débit n'est disponible pour cet événement pour les régions touchées. Cependant devant l'ampleur de l'événement, il était intéressant de voir le comportement du modèle vis à vis d'un cas extrême de crues éclair.

La simulation a donc été effectuée avec les paramètres de calibrage adoptés au vu des résultats obtenus pour les années 2000 et 2001. Seul le mois de septembre a été simulé.

Le résultat obtenu pour le débit simulé à l'exutoire du bassin du Gard est le suivant :

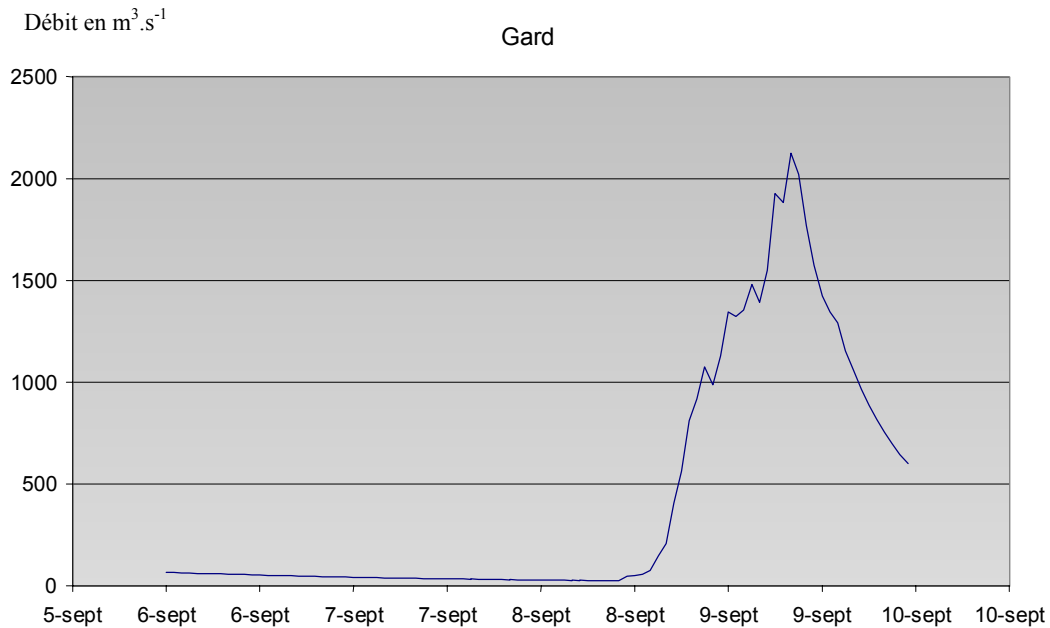


Fig. 31 : Débit simulé à l'exutoire du Gard pour l'événement du 8/9 septembre 2002

Le débit maximum simulé se situe vers 4h le matin du 9 septembre pour un débit d'environ $2100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Aucune mesure de débit n'a pu être effectuée pour cet événement, cependant le débit simulé est supérieur à tous ceux obtenus précédemment sur les événements 2000 et 2001. Ce résultat est cohérent étant donné que l'événement du 8/9 septembre 2002 est parmi les plus importants jamais survenus dans le Gard.

IV. Conclusion

Le travail effectué au LTHE et au JRC-Ispra durant ces 5 mois, m'ont permis de tester le modèle hydrologique LISFLOOD sur des événements survenus dans le sud de la France entre les années 2000 et 2002. L'objectif de ce travail étant d'étudier une région particulièrement propice aux crues éclairs : la région Cévennes-Vivarais.

Pour simuler de façon satisfaisante une crue éclair, la résolution spatiale et temporelle des données météorologiques utilisées doit être très précise. Dans le cadre de notre étude nous disposons de données horaires et d'un réseau de mesures d'une densité d'environ 1 pluviomètre tout les 16 km².

Le modèle LISFLOOD n'étant pas initialement prévu pour la modélisation de petits bassins, le calibrage du modèle joue un rôle essentiel, permettant de compenser le manque d'informations des données d'entrée physiologiques.

Au vu des résultats obtenus, de telles résolutions spatiales et temporelles sont nécessaires mais peut être pas toujours suffisantes. Les simulations de débits effectuées par LISFLOOD se révèlent en effet proches de ceux mesurés pour les bassins les plus larges, mais font défaut pour le plus petit bassin étudié : le bassin du Vidourle pour lequel il serait peut être nécessaire de disposer de données plus précises.

Les résultats obtenus pour le bassin du Gard se révèlent, quant à eux, assez fidèles aux mesures pour les années 2000 et 2001. Il semble donc judicieux d'utiliser la simulation de l'événement du 8/9 septembre 2002 par LISFLOOD afin d'estimer les débits de crue atteints durant cet événement, débits qui ne sont pas connus actuellement car n'ont pu être mesurés.

La principale interrogation demeurant après cette étude est de savoir si les résultats non satisfaisants obtenus lors de cette étude, proviennent du modèle LISFLOOD lui même qui ne serait pas adapté pour la modélisation des crues éclairs ou bien d'une résolution trop faible des données météorologiques et physiologiques.

Dans ce sens, l'utilisation des données radar de pluie disponibles au LTHE avec un pas de temps de cinq minutes, permettraient peut être de statuer sur les possibilités d'adaptation du modèle LISFLOOD à la modélisation de crues éclairs.

Ce stage restera pour moi une expérience très enrichissante sur le plan humain. J'ai pu y découvrir le fonctionnement d'un important organisme de recherche européen.

Si la prise en main de mon sujet s'est avérée délicate dans les premières semaines, j'ai ensuite pu m'y consacrer pleinement en jouissant d'une appréciable liberté d'action et d'une réelle autonomie dans mon travail. Il s'agissait en effet d'un sujet nouveau pour moi où tout restait à faire, et mon travail n'en était que plus motivant.

V. Annexes

1. Index des figures
2. Présentation de quelques événements pluvieux.
3. Résultats des simulations journalières.
4. Résultats des simulations horaires calibrées

1. Index des figures

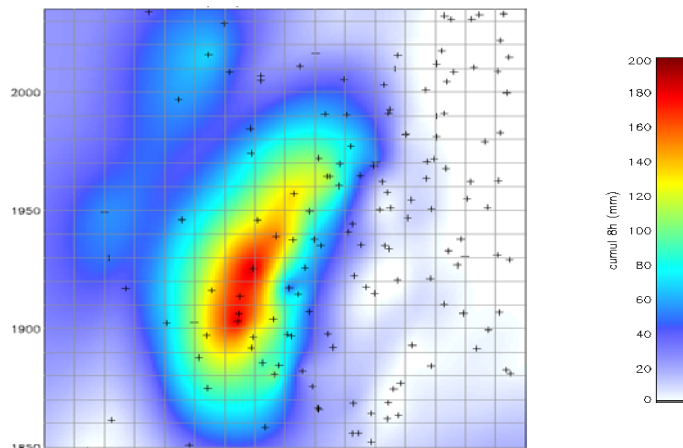
Fig. 1 : Localisation des différents instituts de recherche du JRC.....	5
Fig. 2 : Inondation du Po en 2000.....	6
Fig. 3 : Exemples de crue étendue et de crue éclair.....	8
Fig. 4 : Principe de stabilité ou d'instabilité de l'atmosphère.....	9
Fig. 5 : Topologie de la région Cévennes-Vivarais.....	12
Fig. 6 : Photos du pont de Russan pendant et après la crue de septembre 2002.....	13
Fig. 7 : Illustration des données d'entrées et de sorties de LISFLOOD.....	18
Fig. 8 : Illustration du cycle de l'eau modélisé par LISFLOOD.....	19
Fig. 9 : Illustration schématique de la représentation d'un bassin dans le model LISFLOOD.....	19
Fig. 10 : organisation de la simulation du cycle de l'eau dans LISFLOOD.....	20
Fig. 11 : Modélisation d'un lit de rivière par LISFLOOD.....	21
Fig. 12 : Localisation et portée des radars.....	23
Fig. 13 : Réseaux OHM-CV de débitmètres (gauche) et de pluviomètres (droite).....	24
Fig. 14 : Données de pluie MARS initiales.....	25
Fig. 15 : Données de pluie MARS interpolées sur une grille de 1km×1km.....	25
Fig. 16 : Données OHM-CV issus des pluviomètres et interpolées par distance inverse.....	25
Fig. 17 : Organigramme représentant le déroulement des simulations.....	29
Fig. 18 : Débit mesurés et simulés avec les données MARS pour l'année 2000 pour les quatre exutoires.....	32
Fig. 19 : Débit mesurés et simulés avec les données MARS pour l'année 2001 pour les quatre exutoires.....	33
Fig. 20 : Débit observé et simulés avec ou sans interpolation additionnelle à l'exutoire du bassin de l'Ardèche pour l'année 2000.....	34
Fig. 21 : Débit journalier observé et simulés avec les bases de données MARS et OHM-CV à l'exutoire du bassin de la Cèze pour l'année 2000.....	35
Fig. 22 : Débits observé et simulé à partir des données OHM-CV horaire et journalières à l'exutoire du bassin de la Cèze pour l'année 2000.....	36
Fig. 23 : Débits observé et simulé à partir des données OHM-CV horaire et journalières à l'exutoire du bassin de la Cèze pour l'année 2001.....	37
Fig. 24 : Paramètres utilisés par LISFLOOD pour caractérisé le sol.....	38
Fig. 25 : Influence de la conductivité à saturation de la couche sol1 sur le débit simulé à l'exutoire du bassin de l'Ardèche pour l'année 2000.....	39
Fig. 26 : Influence de la limite d'eau infiltrant les eaux souterraines par percolation sur le débit simulé à l'exutoire du bassin de l'Ardèche pour l'année 2000.....	40
Fig. 27 : Influence de la conductivité de la zone supérieur de stockage des eaux souterraines sur le débit simulé à l'exutoire du bassin de l'Ardèche pour l'année 2000.....	41
Fig. 28 : Débit observé et simulé après calibrage à l'exutoire du bassin du Gard pour l'année 2000.....	43
Fig. 29.....	43
Fig. 30 : Comparaison des débits simulés et observés pour chaque bassin.....	44
Fig. 31 : Débit simulé à l'exutoire du Gard pour l'événement du 8/9 septembre 2002.....	46

2. Présentation de quelques événements pluvieux

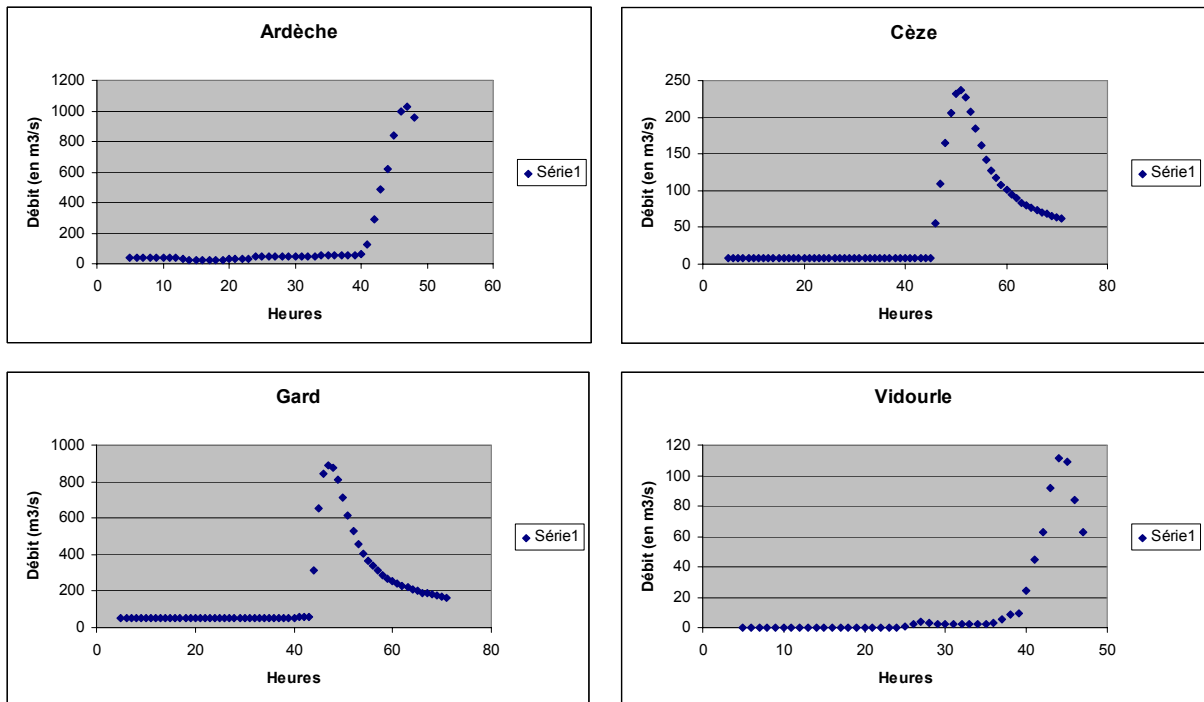
2.1 Année 2000

a) Episode du 28/09/2000 au 29/09/2000

Spatialisation de la pluie au sol : cumul du 29/09 de 5h à 13h



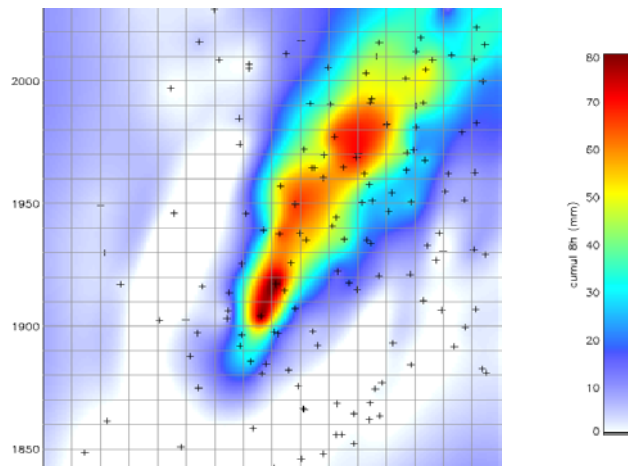
Chronique de débit débutant le 19/09 à 0h



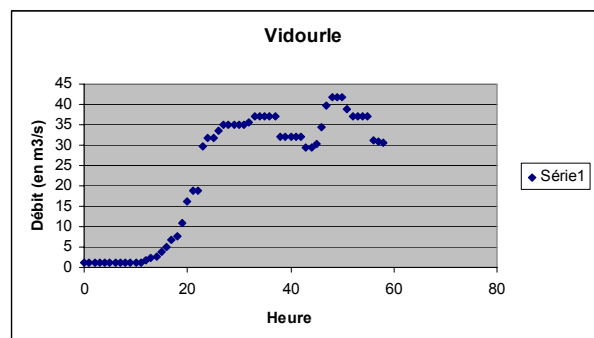
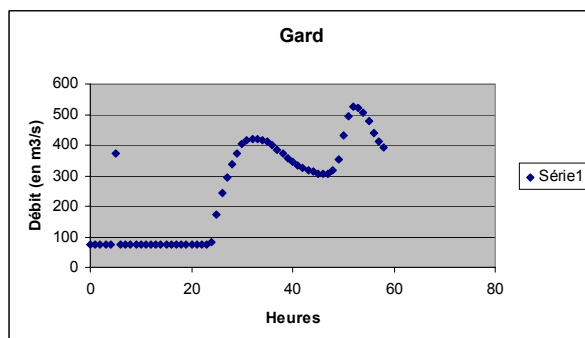
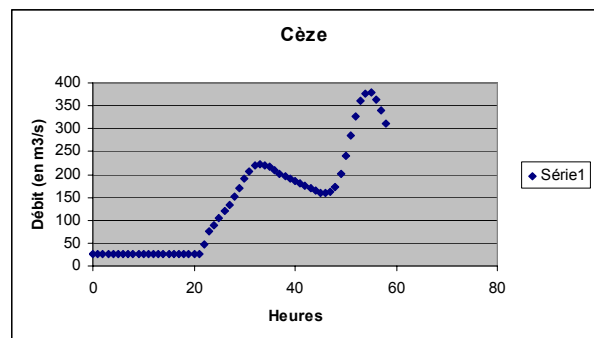
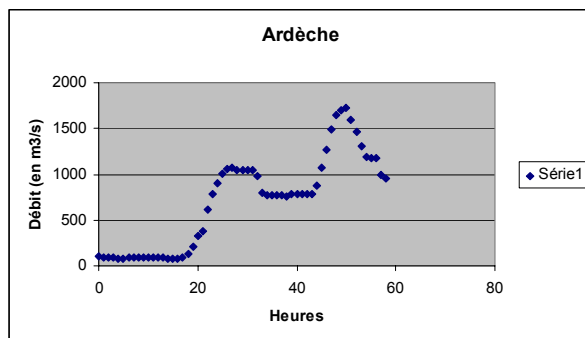
Cet événement pluvieux touche principalement les bassins du Gard et de l'Ardèche.

b) Episode du 12/11/2000 au 14/11/2000

Spatialisation de la pluie au sol : cumul du 13/11 de 13h à 21h



Chronique de débit débutant le 12/11 à 0h

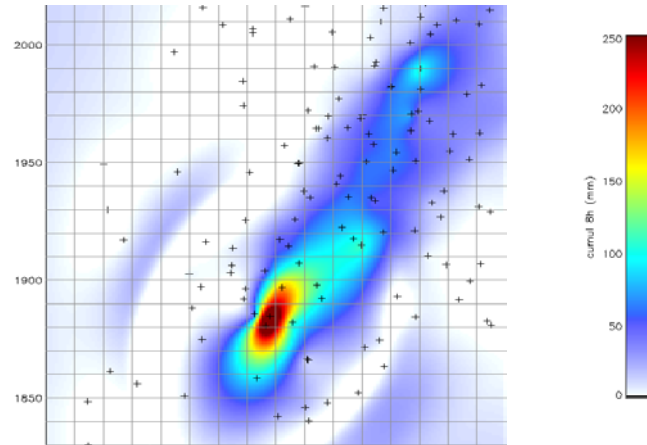


Cet événement pluvieux est particulièrement localisés sur le bassin de l'Ardèche

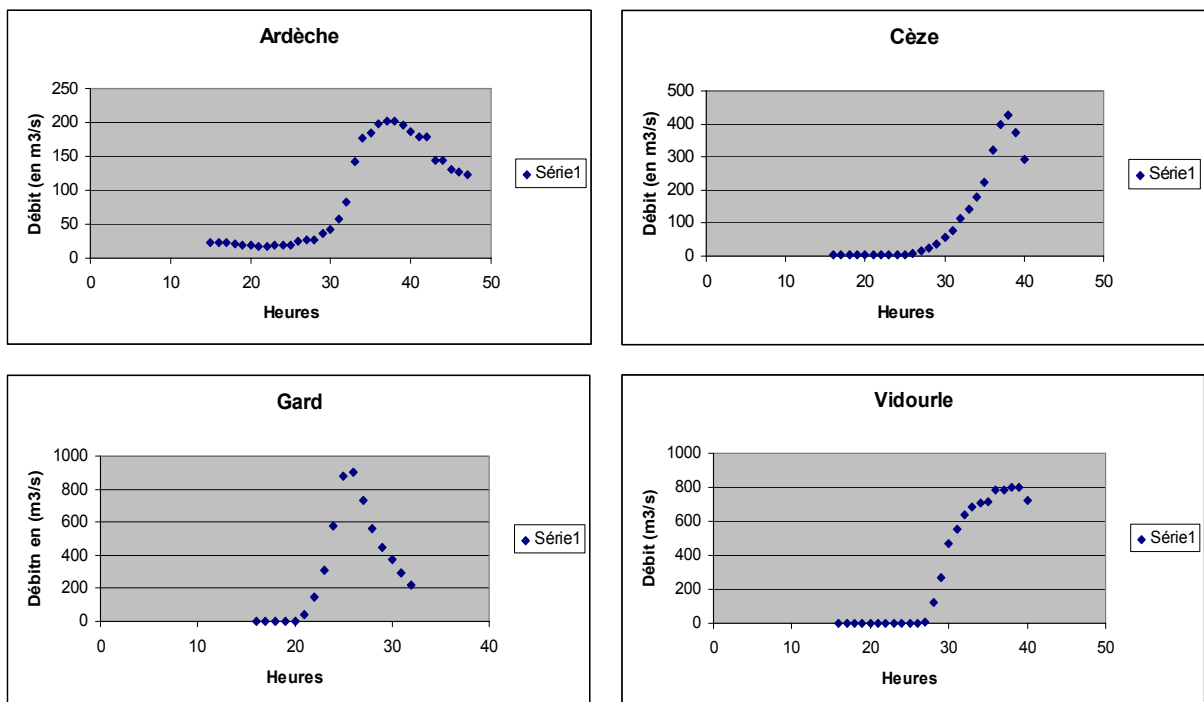
2.2 Année 2001

a) Épisode du 6/10/2001 au 7/10/2001

Spatialisation de la pluie au sol : cumul du 6/10 de 16h à 24h



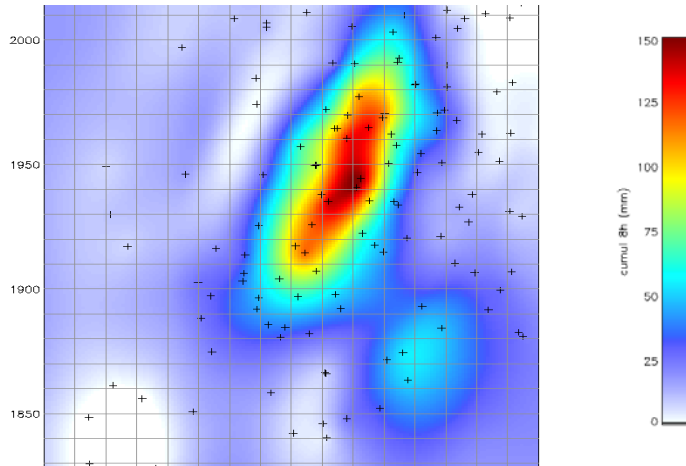
Chronique de débit débutant le 6/10 à 0h



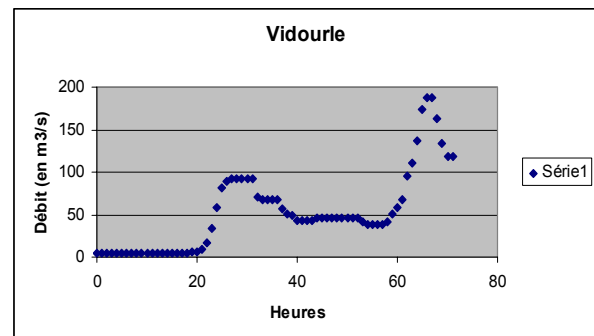
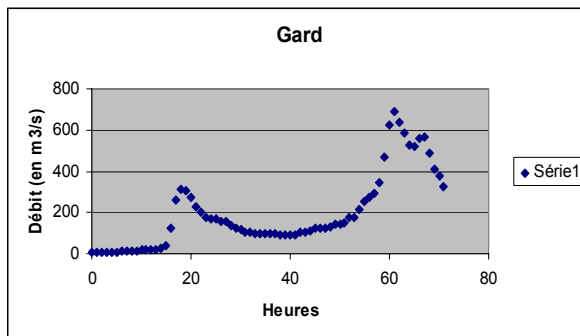
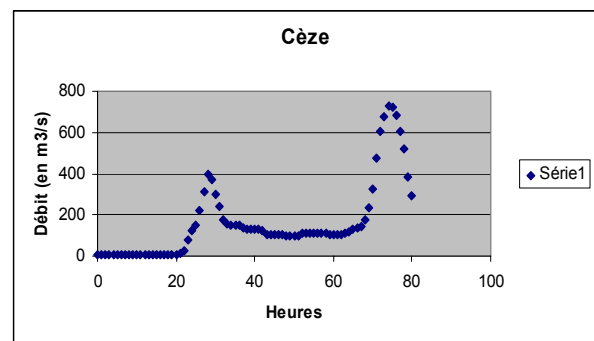
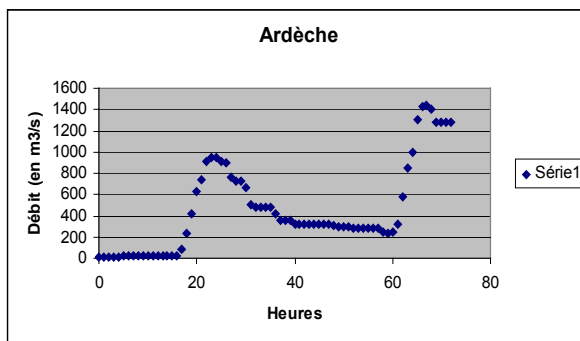
Cet événement pluvieux est très localisés sur le Gard et surtout le Vidourle.

b) Episode du 18/10/2001 et 20/10/2001

Spatialisation de la pluie au sol : cumul du 18/10 de 7h à 15h



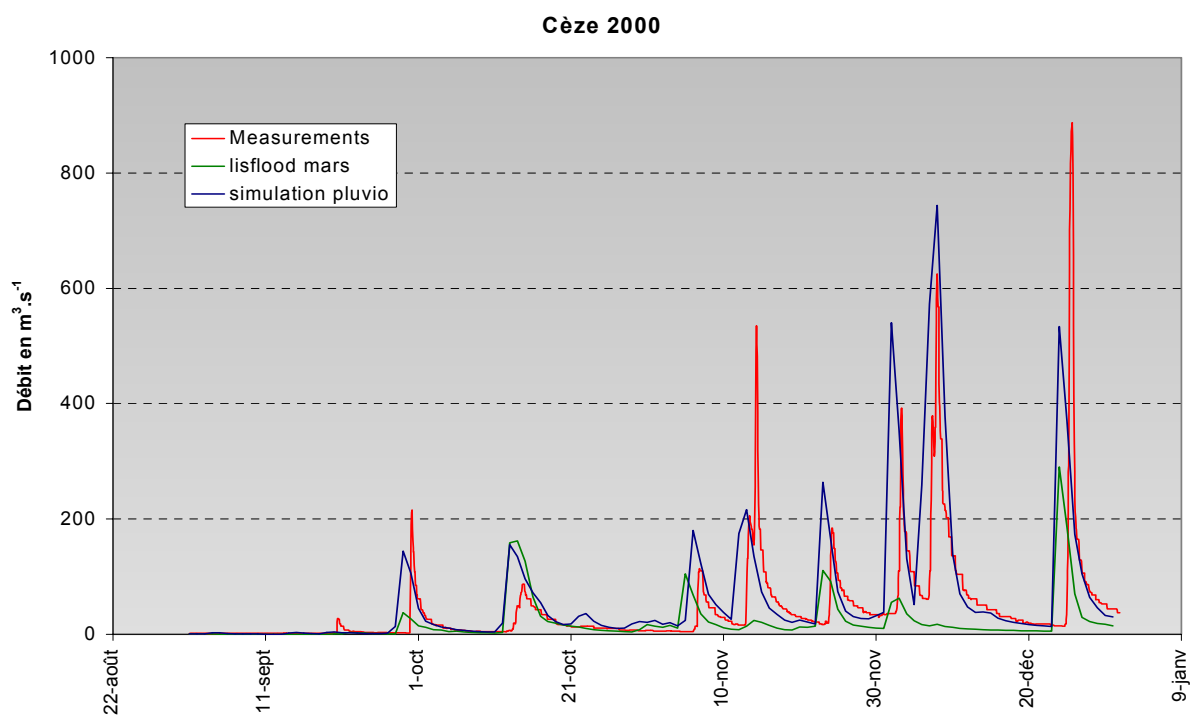
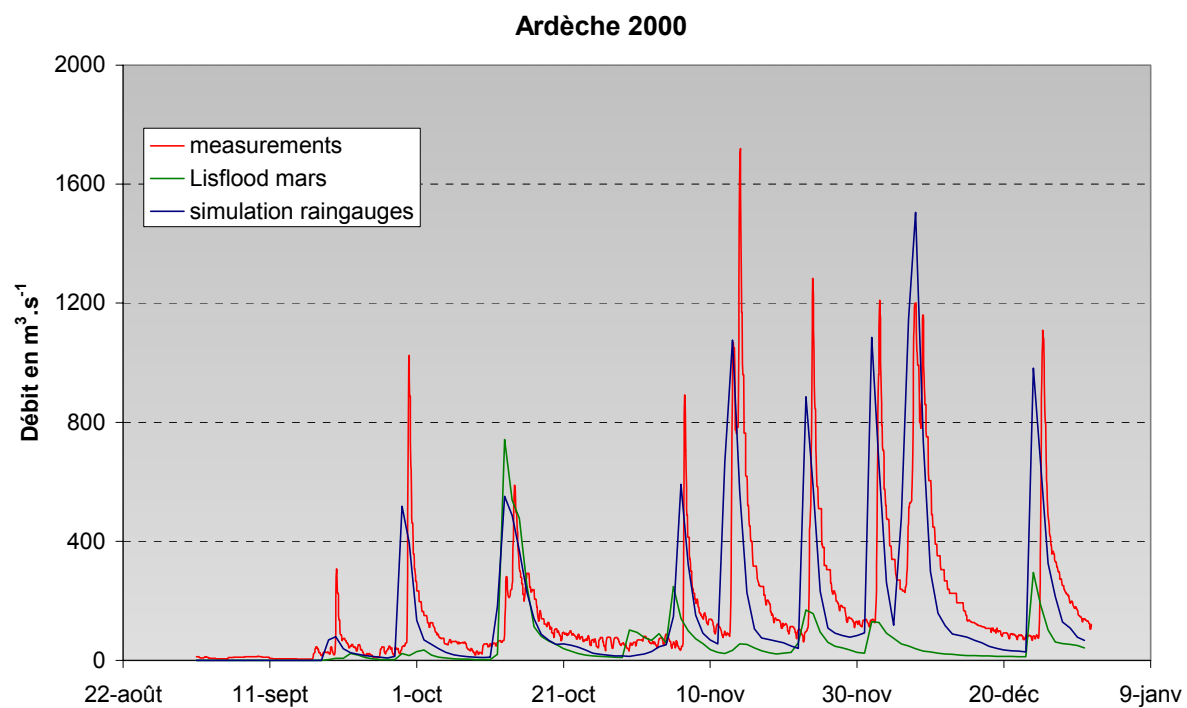
Chronique de débit débutant le 18/10 à 0h

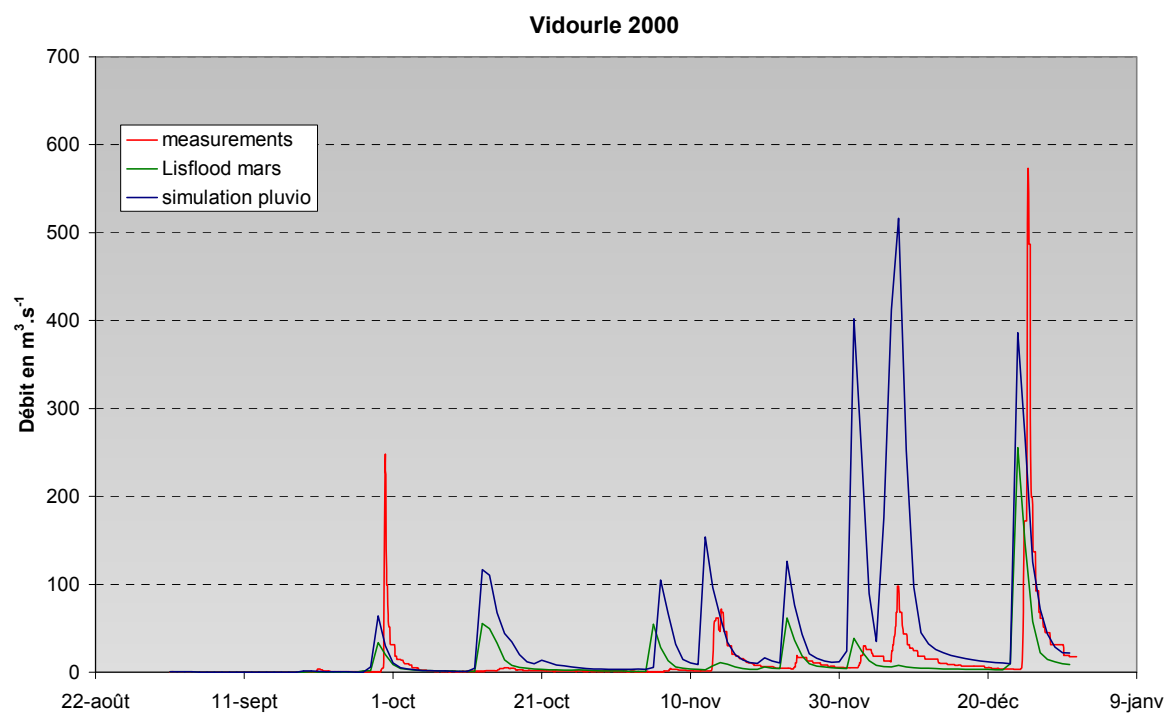
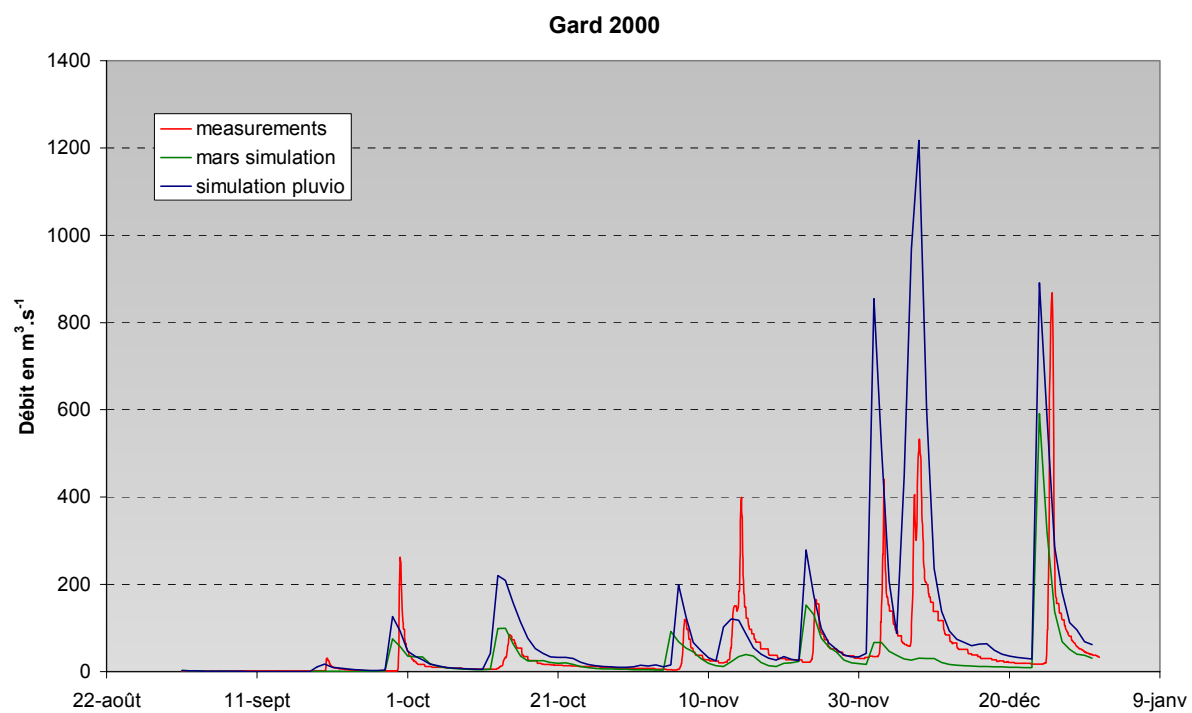


Cet épisode touche principalement les bassins du Gard et de la Cèze et tout particulièrement celui de l'Ardèche.

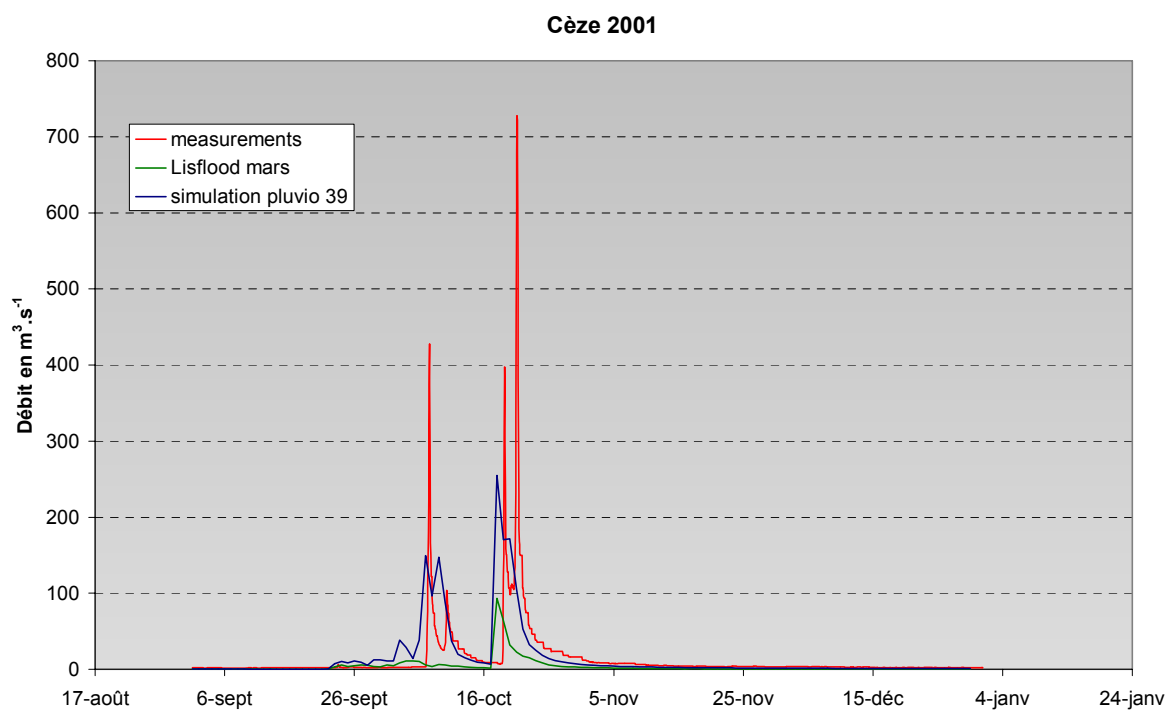
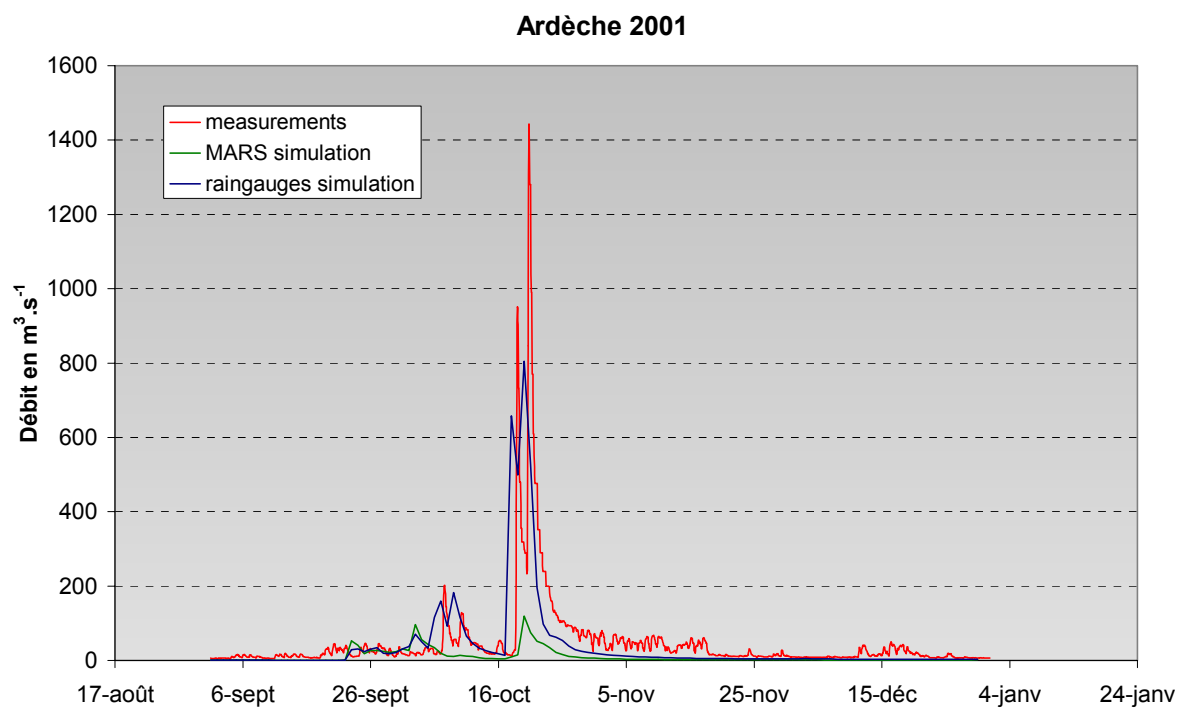
3. Résultats des simulations horaires.

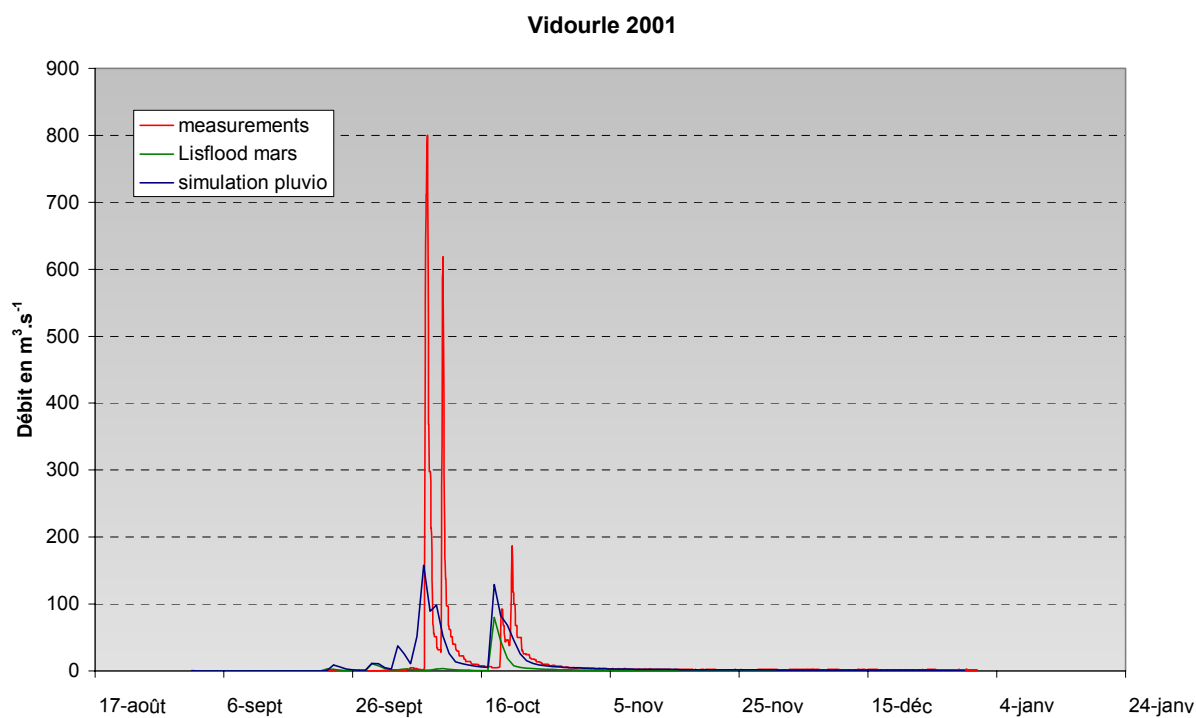
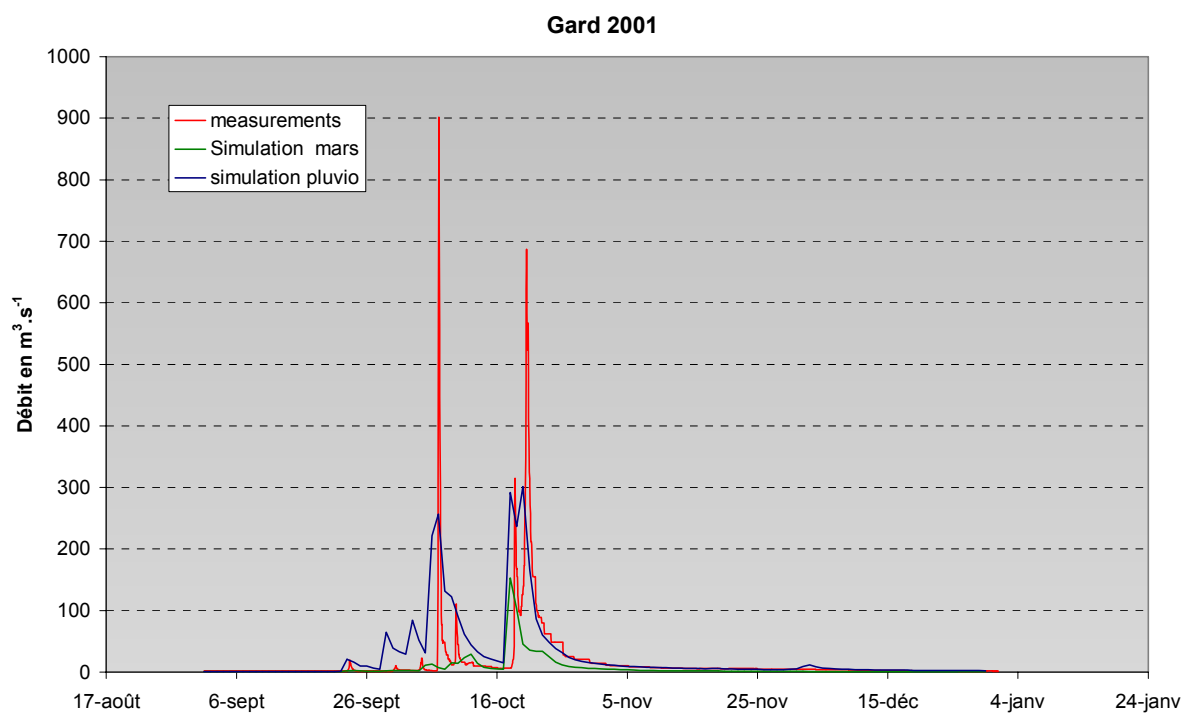
3.1 Année 2000





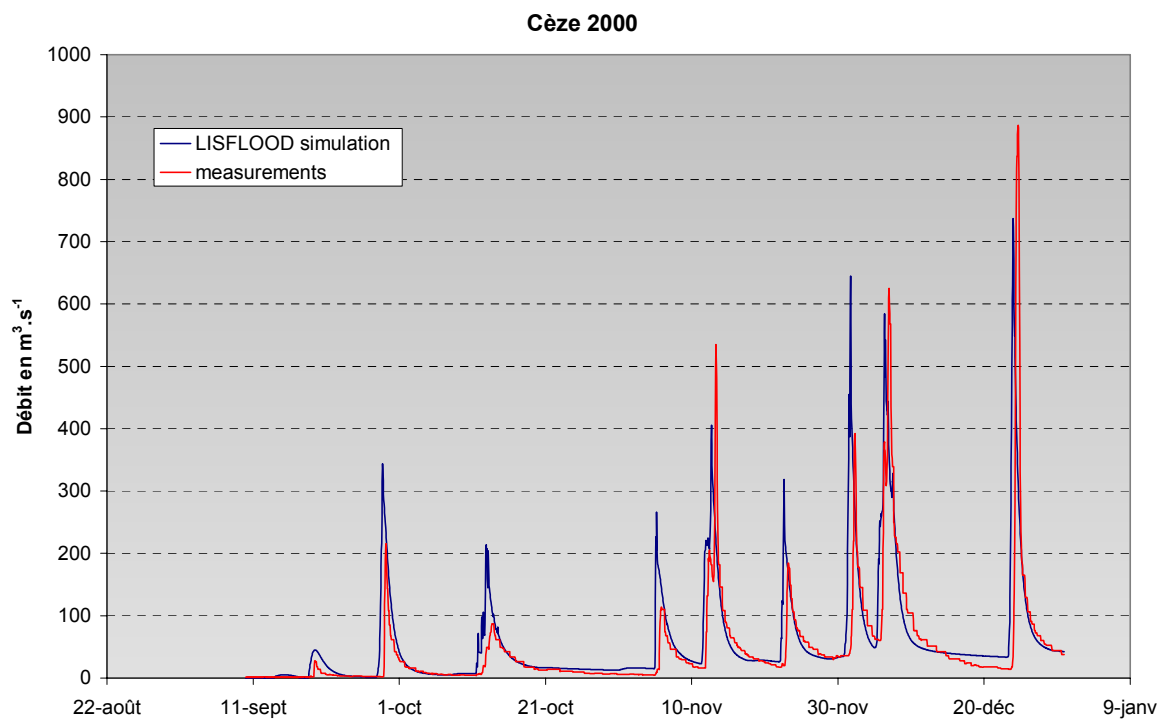
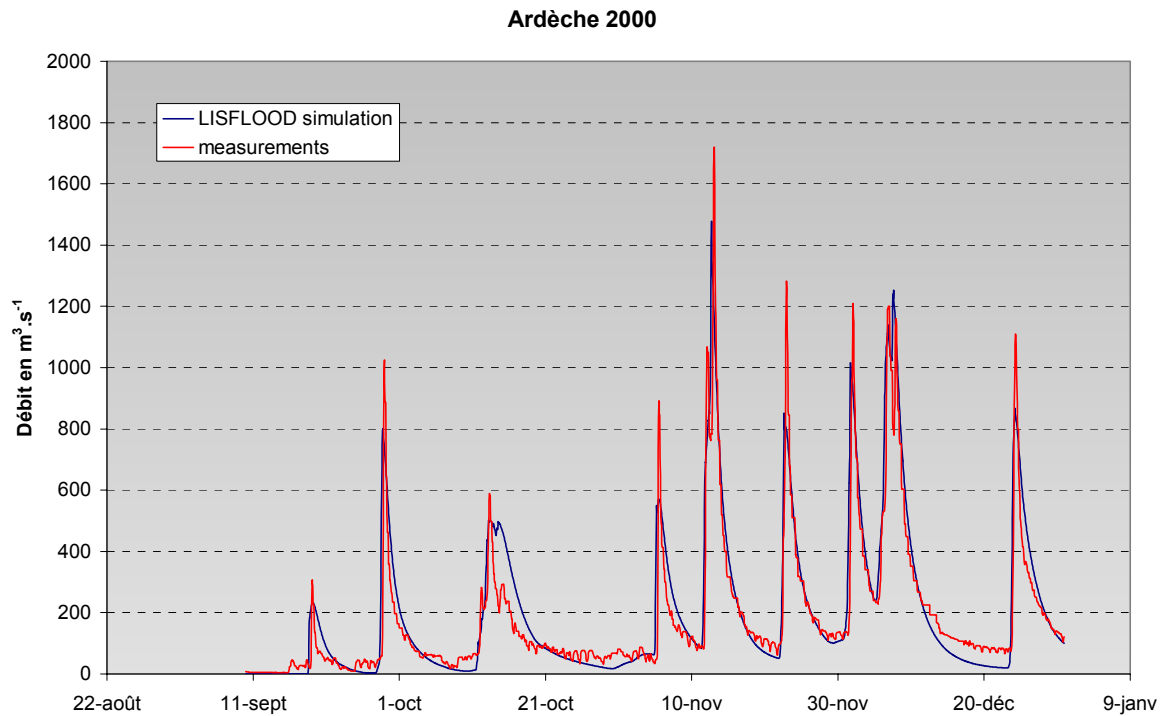
3.1 Année 2001

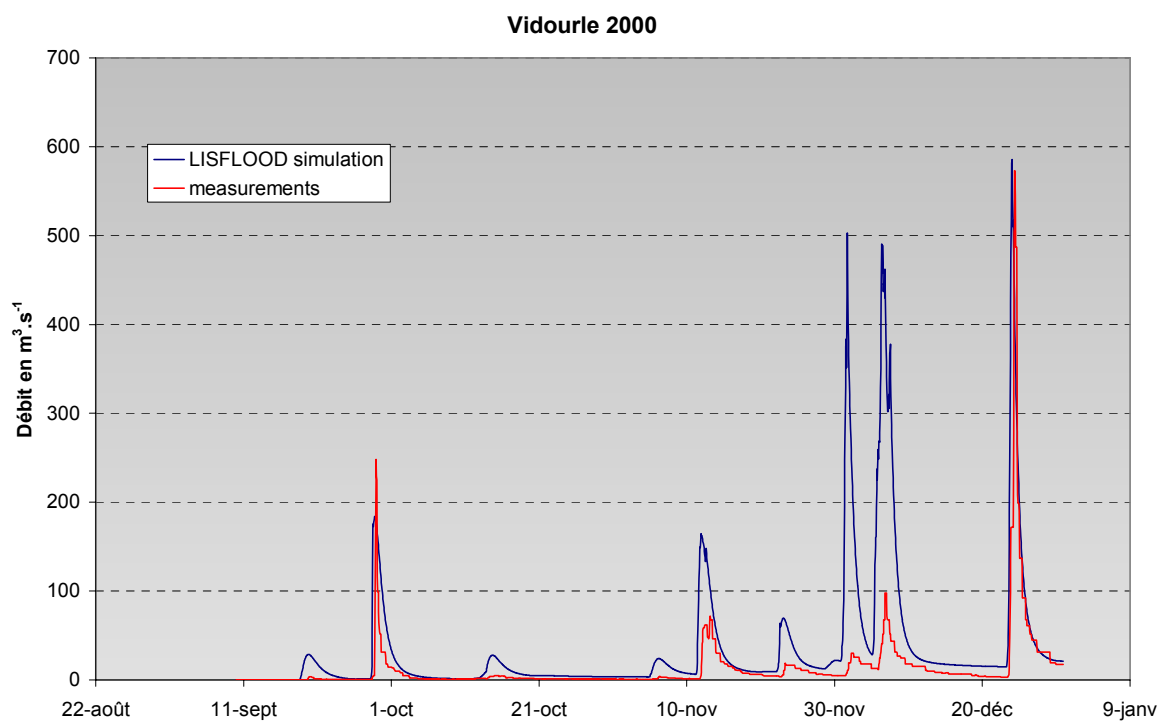
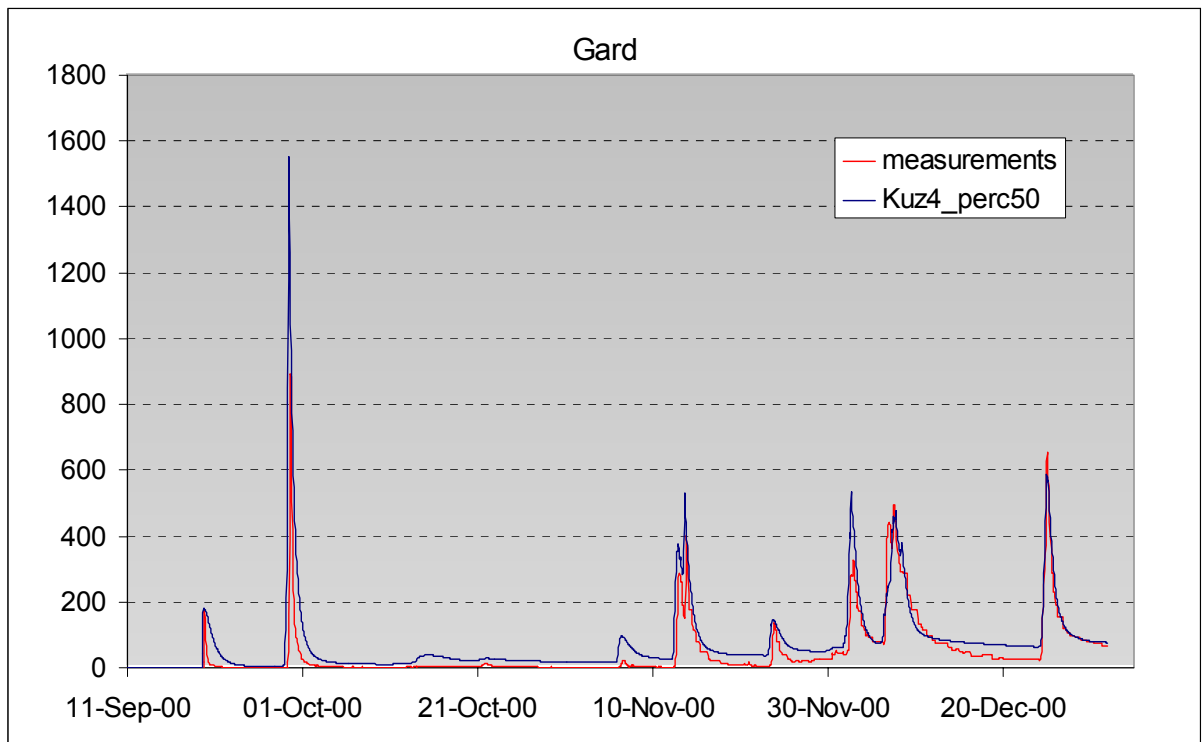




4. Résultats des simulations horaires calibrées

4.1 Année 2000





4.2 Année 2001

