



**HAL**  
open science

# Comparaison des méthodes d'avertissement de crues en France et au Brésil - Application en France

A. Caseri

► **To cite this version:**

A. Caseri. Comparaison des méthodes d'avertissement de crues en France et au Brésil - Application en France. Sciences de l'environnement. 2012. hal-02606052

**HAL Id: hal-02606052**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02606052>**

Submitted on 16 May 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Rapport de stage de la spécialisation génie de  
l'environnement



Comparaison des méthodes  
d'avertissement de crues en France  
et au Brésil -  
Application en France

06 JUILLET 2012  
CASERI ANGELICA

Maîtres de Stage : **Pierre Javelle**  
**Marie Hélène Ramos**

Irstea  
Aix-en-Provence

Centre d'Aix-en-Provence  
Tel: +33 (0)4 42 66 99 10  
3275 Route de Cézanne  
CS 40061  
13182 Aix-en-Provence Cedex 5



## Remerciements

En premier lieu, je tiens donc à remercier mes encadrants de stage M. Pierre Javelle et Mme Maria Helena Ramos pour leur gentillesse et disponibilité, leur conseils encourageants. Je voudrais leur témoigner toute ma reconnaissance pour m'avoir proposé ce sujet de stage qui m'a permis de découvrir le monde de l'hydrologie. Je remercie, particulièrement, à Mme. Ramos pour m'avoir donné la chance de participer à un projet de collaboration entre la France et le Brésil.

Je remercie, également, à M. Dimitri Defrance pour la qualité et la pertinence de ses remarques et enseignements, sans oublier sa patience.

J'adresse, aussi, mes remerciements à mes collègues du groupe de recherche en hydrologie (RHAX), grâce auxquels le déroulement de ce stage a été très agréable et enrichissant.

Par ailleurs, je voudrais remercier les enseignants de l'INPT de m'avoir accueillir et encourager dans la réalisation du double diplôme. Étant trop nombreuses pour être toutes énumérées ici, je me contenterai de citer: Mme. Anne Bernadac, M. Michel Kaemmerer, M. Eric Pinelli, M. Philippe Behra, M. Denis Dartus.

Enfin, je voudrais témoigner mon gratitude à ma famille et à Douglas qui m'ont apporté le soutien dont j'avais besoin. Je les remercie d'avoir toujours cru en moi. Je leur dois tout et en suis immensément reconnaissante.

## **Résumé**

Les inondations sont responsables d'une grande partie des catastrophes naturelles entraînant des pertes humaines et dégâts matériels importants. Les systèmes de prévision aux crues sont donc fondamentaux pour anticiper assez tôt l'arrivée de ces événements et, ainsi, mitiger leurs impacts.

L'Irstea et Météo-France ont développé la méthode AIGA (Adaptation d'Information Géographique pour l'Alerte en crue) qui modélise les crues en transformant la pluie en débit. La méthode a été développée uniquement pour la zone méditerranéenne.

Ce travail propose l'application de l'AIGA dans des régions où les hydro-climats sont différents. Par la suite, la méthode sera testée au Brésil, une étude préliminaire a été réalisée en comparant les modèles hydrologiques du Brésil et de la France.

En pratique, la méthode a été testée au niveau de l'ensemble du territoire français. Pour cela des données d'entrée du modèle ont été créées. La modélisation a été initialisée avec trois différentes règles, la règle actuellement utilisée (sud-est), la règle sud-est avec un débit de base et la règle calée localement. Les résultats de performance ont été plus satisfaisants en utilisant les deux dernières règles. Il conviendra cependant d'optimiser la méthode afin d'améliorer la qualité des résultats obtenues.

## **Abstract**

The floods are responsible for the majority of natural disasters, causing life loss and many damages. The flood forecasting systems are fundamental to anticipate the arrival of these events, thus mitigate the impacts.

The Irstea and Météo-France has developed the method AIGA (Adaptation of Geographic Information for the alert in flood), that models the raw transforming rainfall into runoff. The method was developed for the Mediterranean area.

This work proposes the AIGA application in areas where hydro-climates are different. Thereafter, the method will be tested in Brazil; a preliminary study was conducted by comparing the hydrological models from Brazil and France.

In practice, the method was tested in French territory. For this the model data were created. The model was initialized with three different rules, the rule currently used (southeast), the rule southeast with a base flow and the rule locally calibrated. The performance results were more satisfactory using the last two rules. However, require an optimized method to improve the quality of results obtained.

## Avant-propos

Ce rapport est l'aboutissement d'un stage de cinq mois réalisé à l'Irstea (Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture) à Aix-en-Provence dans le cadre du projet de fin d'étude de la spécialisation génie de l'environnement de l'Ensat (INPT). Ce stage s'est déroulé dans le groupe de recherche en hydrologie (RHAX). Cette équipe s'intéresse à la prévision des débits de crue basée sur les données fournies par Météo-France et par la modélisation de la transformation des pluies en débit.

Irstea est un organisme de recherche en sciences de l'environnement et de l'agriculture de l'Etat. Il a pour mission répondre à des questions concrètes de la société dans le domaine de la gestion durable des eaux et des territoires. Les thématiques abordées sont rapportées aux ressources en eau de surface, les systèmes écologiques aquatiques et terrestres, les espaces à dominante rurale, les technologies pour l'eau et les agro systèmes. Il est composé de dix centres de recherche, neuf localisés en France Métropolitaine et un en Martinique. Les équipes pluridisciplinaires sont réparties en trois départements de recherche, eaux, écotecnologies et territoire.

L'équipe RHAX, dans laquelle j'ai réalisé mon stage, effectue des travaux de recherche orientés vers la détermination des débits d'étiage, la prédétermination des débits de crue et la prévision des débits. De plus, pour aider dans l'analyse des résultats des modèles utilisés, l'équipe est en charge d'un bassin versant instrumenté, le bassin du Réal Collobrier, dans le Var. La modélisation des crues est abordée par le développement de divers modèles qui contribuent à l'étude des relations pluie-débit, comme le modèle hydrologique GR3H et les modèles SHYREG et AIGA.

## Extended abstract

This project was carried out during a training period, at Irstea (National Research Institute of Science and Technology for Environment and Agriculture), Aix-en-Provence, in the Hydrology Research group. This group develops methods for predicting floods based on meteorological data provided by Météo-France and on rainfall-runoff modeling.

The purpose of this work is to investigate the adaptation of the method AIGA developed at Irstea to a variety of climates and hydrological regions, and thus contribute to improve the tool in its ability to produce flood forecasts and alerts. The method was tested in several catchments in France. Moreover, with a view to applying the method in Brazil, where the hydro-climate conditions are diverse and flood risks are common, a preliminary study was carried out comparing the existing flood alert systems in France and in Brazil, with a focus on their similarities and differences.

Disastrous events like floods are related to threats that can be natural or caused by human activities. In several regions, floods are in the first position among the most dangerous environmental risks. They are related to heavy rains, river flooding and soil sealing, among other factors. In the world, floods are responsible for more than 50% of the observed natural disasters (Ifen, 2008). In France and in Brazil, floods are becoming more frequent and societies are more vulnerable to such extreme events. In particular, flash floods events, associated with a rapid increase of water levels due to localized high-intensity precipitation falling over a short time period have been responsible for human and economic losses in both countries.

Flood warning systems are essential to prevent these extreme events and, therefore, reduce their impact. The purpose of these systems is to inform the public and the civil defense agencies about the possibility of occurrence of a flood event, so there is sufficient time to evacuate the region forecast to be touched by the event.

Irstea, in partnership with Météo-France, has developed a computational tool for predicting flash floods in the Mediterranean region, called AIGA (Adaptation of Geographic Information for Flood Alerts), which is a hydrological distributed model. The present model runs on an event-based mode, on 1-km<sup>2</sup> cells, and at an hourly time resolution.

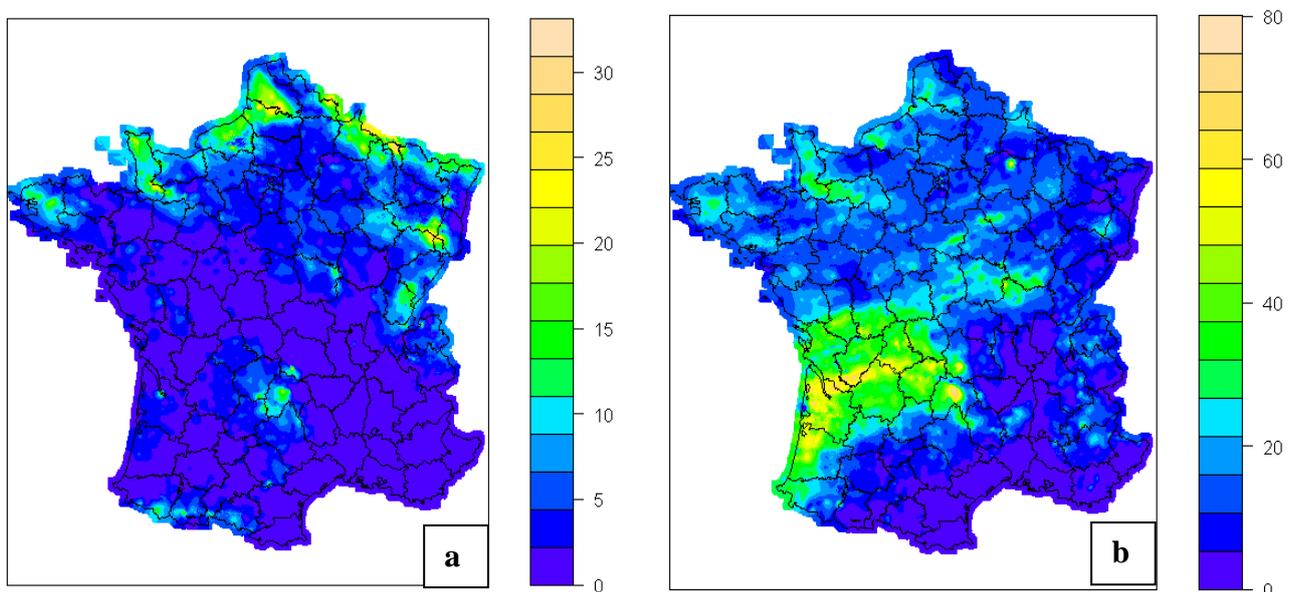
The flow calculation is made from a model characterized by two reservoirs, the GR3S. The first reservoir receives the precipitation and computes a unit hydrograph. A parameter called "fill factor" considers the total water amount and the reservoir size. The portion of the water drained from this first reservoir is transmitted to the second one, the "routing reservoir", which computes the flow. It is then determined if a threshold is exceeded or not, considering a return period of two years.

The model has only two parameters, the capacity of each of the two reservoirs. They are established for each pixel of the watershed analyzed. The capacity of the first reservoir (parameter

A) can be estimated as equal to the daily rainfall amount. In applications in France, it can be defined from the method SHYREG (which provide estimates of intensities for return periods of 2, 10 or 50 years). The lower limit is fixed to 200 mm (Javelle, 2009). The parameter of the second reservoir (parameter B) was introduced to optimize the simulation for small watersheds (Fouchier, 2010).

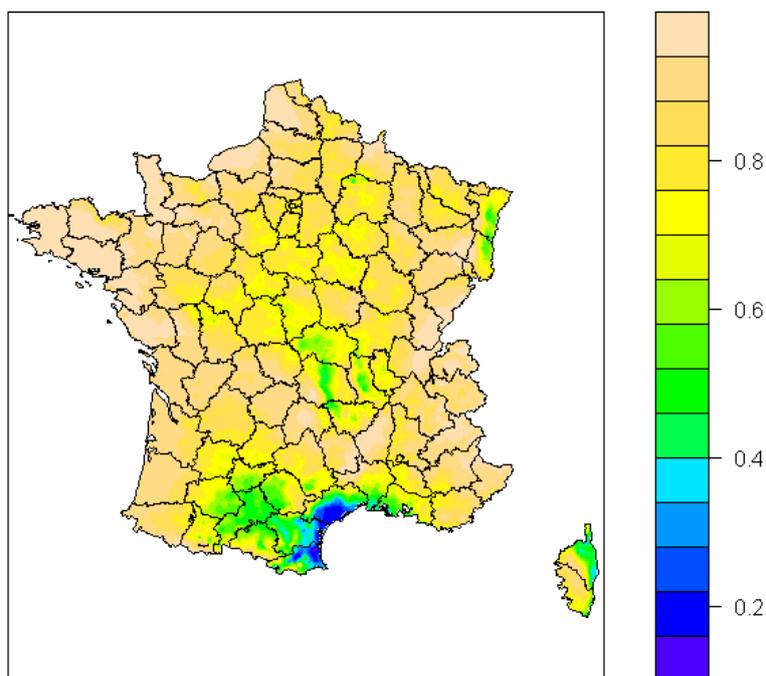
In this project, the AIGA method was applied to a large data set of catchments in France. The model works based on the creation of events. It is reset every day, unless if, for the pixel in question, the daily rainfall exceeded 10 mm. Daily rainfall data, evapotranspiration rate and the index of soil moisture are required to initialize the model.

The first step in this project consisted of reading and formatting the data, so they can be ready to be used by the model. The rain hourly and rain daily grids were generated for the period of 1997-2007. Figure 1 shows examples of rainfall daily grids.



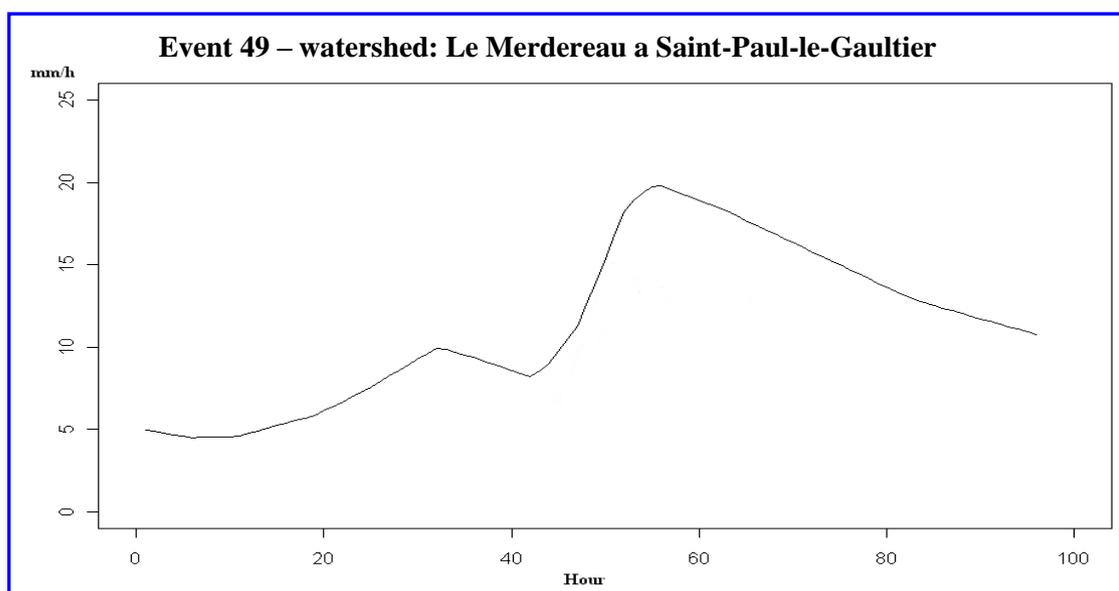
**Figure 1.** Examples of daily rainfall maps (a: 11/02/1997, b: 20/10/2000).

The second task was to generate the moisture index grids (SAJ). For this, the daily rainfall grids created were used, together with evapotranspiration grids. Figure 2 shows an example of SAJ grids.



**Figure 2.** SAJ index example (17/12/2000- wet period).

The last step before launching the model calculations is the selection of events. For this, 181 watersheds were selected in France. For each watershed, the events were established on the basis of a threshold of rain. At the end of the procedure, 3305 rainfall-runoff events were selected. Figure 3 shows an example of an event for one of the watershed studied.



**Figure 3.** Hydrographic event example (event 497, watershed: Le Merdereau a Saint Paul le Gaultier).

After the creation of all the necessary data, the AIGA model was run. For this, three types of initialization were used, defining three different rules:

- The first initialization rule was based on multiple regression arithmetic. This rule is used operationally in south-eastern France. For this rule, the rainfall and the the moisture index are considered; the volume of the previous day\_is not considered.

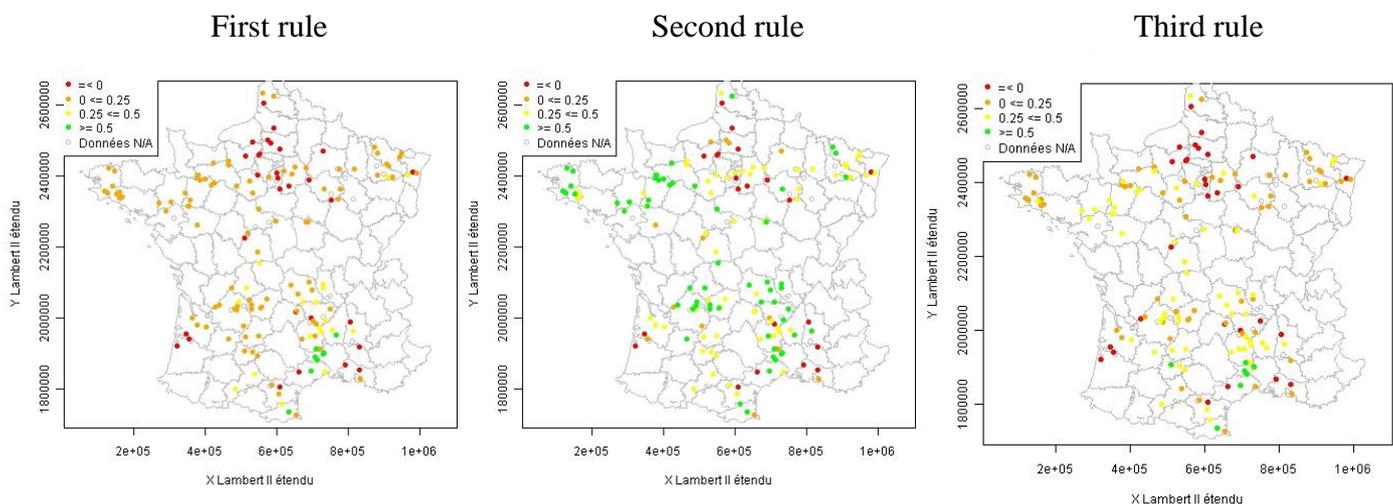
- The second initialization rule used was also based on multiple regression arithmetic, as in the first rule. However, here the previous day flow is additionally considered in the regression;

- Finally, the third rule is characterized by an optimal coefficient of filling rate (first reservoir) for each catchment. This rule is based on a sensitivity test: the best suited coefficient for each catchment was selected by optimizing the performance of the model.

Each rule was analysed checking the quality of the results obtained when applying the rule. To judge the quality of the results obtained by the method AIGA, the simulated flows were compared with the observed flows. The criterion used was the Nash criterion (Nash & Sutcliffe, 1970).

The Nash criterion is often used to analyse the performance of hydrological models. It proposes to evaluate the level of agreement between the simulated and the observed hydrographs. Nash values vary from infinity to 1. The closer it is to 1, the better is the quality of the results obtained.

Figure 4 shows the performance results for each initialize rule over the catchments studied in France.



**Figure 4.** Performance analysis for the three rules types.

From the results, it can be seen that the second and the third rules give more satisfactory results than the first rule. The second rule shows the best results (higher Nash values), especially for the regions southeast and northwest. For the three rules, it can be observed that the model is not suitable for the catchments in the Paris region, where negative values of Nash are obtained.

To examine the robustness of the model, a procedure of calibration - control (Klemes, 1986) was carried out on the entire set of catchments and considering only the third rule. This procedure (calibration/control) is characterized by the assessment of the results of the model in two sub-periods. The model is calibrated over a period and analyzed over a second independent period, the validation period (or control period). The results obtained confirmed the previous ones.

In general, this study showed that the AIGA methods robust and can be adaptable to a large range of climate conditions in France. However, there are optimizations that need to be done to improve the performance of the model locally.

As a continuation of this work, it would be interesting to test the AIGA method in other regions of the world. From the analysis carried out in this project concerning a preliminary assessment of data and methods currently available in Brazil, applications in this country, characterized by a wide variety of hydro-climates, offer numerous perspectives in terms of testing the robustness of the method. By increasing the range of applications of the method, its strengths and weaknesses can be better assessed and understood..

## Sommaire

1. Introduction .....	12
1.1. Le contexte des inondations.....	12
1.2. Questions posées .....	13
1.3. Travail réalisé et organisation du rapport.....	14
PARTIE I : Analyse bibliographique sur les systèmes d'alerte aux crues brésilien et français .....	15
1. Le système de prévision de risque d'inondation.....	15
2. Les caractéristiques des régions d'étude.....	17
2.1. Les principales caractéristiques climatiques.....	17
2.1.1. Le climat en France.....	17
2.1.2. Le climat au Brésil.....	18
2.2. Acteurs nationaux dans le domaine de la prévision des crues .....	19
2.2.1. Les acteurs en France.....	20
2.2.2. Les acteurs au Brésil .....	21
2.3. Données utilisées par un système de prévision.....	22
2.3.1. Les données en France .....	22
2.3.2. Banque Météo - Climathèque .....	22
2.3.3. Banque HYDRO.....	23
2.3.4. Les radars météorologiques .....	23
2.3.5. Les données au Brésil.....	24
2.3.6. Les stations pluviométriques.....	24
2.3.7. Les stations hydrométriques .....	25
2.3.8. Les radars météorologiques .....	25
2.3.9. Plateforme de collecte de données (PCDs) .....	26
2.4. Méthodes utilisées et cas d'application/projets.....	26
2.4.1. France.....	27
2.4.2. Brésil.....	28
2.4.3. Le système d'alerte aux inondations du bassin versant du Rio Doce.....	28
2.4.4. Le système d'alerte aux inondations de la région de l'état de São Paulo (SAISP).....	28
2.4.5. Le « Signaleur Environnemental » .....	29
2.4.6. Le Système de Surveillance et des Alertes de Désastres Naturels- SISMADEN.....	29
3. Synthèse comparative .....	31
PARTIE II : AIGA dans un contexte hydro-climatique varié : robustesse et applicabilité étendue de la méthode .....	32
1. Contexte spécifique.....	32
2. Méthodologie.....	33
2.1. La méthode AIGA .....	33
2.1.1. Fonctionnement des réservoirs.....	33
2.1.2. Paramètres du modèle .....	34
2.1.3. Initialisation du modèle .....	34
2.1.4. L'indice d'humidité journalier (SAJ).....	35
2.2. Critère de performance .....	35
3. Préparation des jeux des données .....	37
3.1. Traitement des pluies de la réanalyse Météo-France.....	37
3.2. Calcul de l'indice d'humidité du seuil (SAJ).....	37
3.3. Constitution d'un jeu d'événements par bassin versant .....	39
4. Le modèle actuel : Règle Sud-est.....	41
4.1. Analyse de performance de l'initialisation régionale « Règle Sud-est ».....	41
4.2. Analyse sur deux exemples .....	42

5. Tests pour identifier les améliorations possibles.....	44
5.1. Objectif des tests.....	44
5.2. Test avec un débit de base.....	44
5.3. Optimisation du paramètre de production pour chaque bassin : règle calée localement.....	47
5.3.1. Méthode.....	47
5.3.2. Résultats.....	48
6. Conclusion.....	52
Références Bibliographiques.....	54
Liste des figures.....	58
Annexes.....	60

## 1. Introduction

### 1.1. *Le contexte des inondations*

Les catastrophes sont liées aux événements dangereux, des aléas qui peuvent être d'origine naturelle ou causés par les activités humaines. La notion de risque naturel est la rencontre entre un aléa d'origine naturelle et des enjeux humains, économiques ou environnementaux. Dans plusieurs régions du monde, les inondations se trouvent dans le premier rang des risques naturels. Elles sont liées aux fortes précipitations, aux débordements des rivières et à l'imperméabilisation des sols. Leurs impacts sont d'ordre environnemental et socioéconomique (Bastone *et al.*, 2011).

Dans le monde, les inondations sont à l'origine de plus de 50% des catastrophes naturelles (Ifen, 2008). En France et au Brésil les inondations sont responsables de la perte de vies humaines.

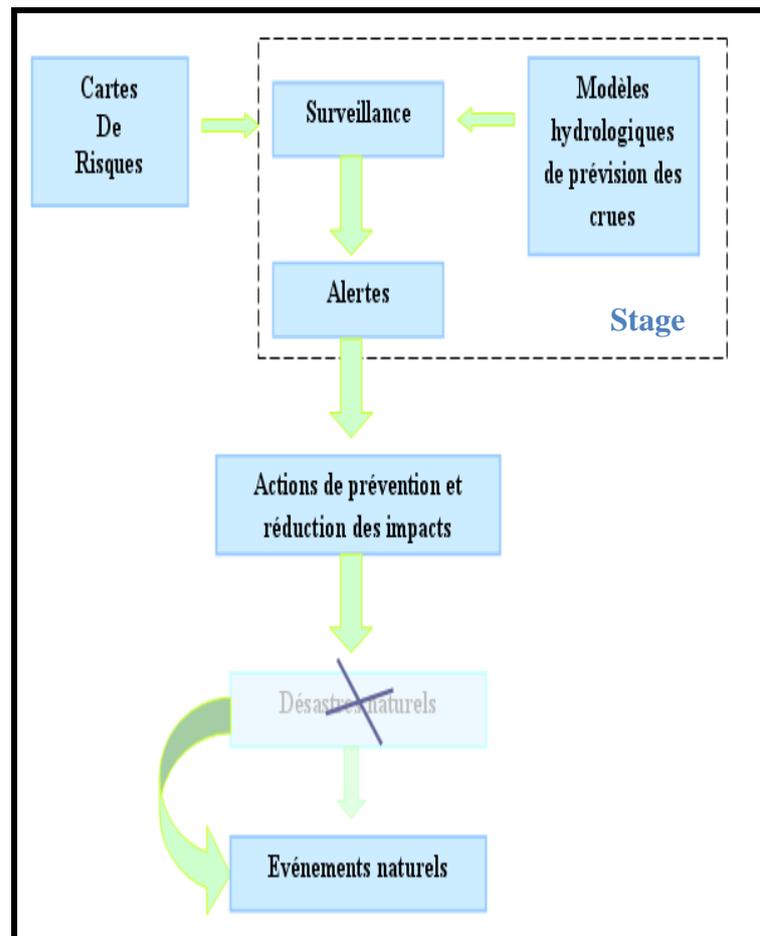
L'inondation du 15 juin 2010 dans le département du Var est un exemple de crue violente en France qui peuvent causer des graves conséquences. Sur l'ensemble de l'épisode, les cumuls pluviométriques ont dépassé 200 millimètres localement. Les valeurs les plus élevées observées ont été dans la région des Arcs-sur-Argens, 400 millimètres (Martin, 2010). Cet événement a causé la mort de 25 personnes et a coûté un milliard d'euros. Ce type d'événement se produit régulièrement dû au fait du climat méditerranéen, ainsi que les facteurs géographiques et géologiques favorisent leur apparition.

Selon l'ONU, pendant la période de 1997 à 2002, 240 inondations ont été enregistrées en Amérique du Sud. Concernant les pertes, les inondations sont responsables pour environ 50% du total de préjudices causés par ces désastres (Kron, 2003). Au Brésil, selon l'IBGE, entre 2000 et 2002, 2263 villes brésiliennes ont déclaré avoir des dégâts occasionnés par les désastres naturels : 16% des municipalités ont eu des glissements de terrain et 19% ont eu des inondations. Parmi les villes qui ont subi des inondations, la majorité est localisée dans la région sud-est (48%). Dans l'état de São Paulo, ces dernières années, plus de 30% des villes ont été affectées par les inondations, causant des dommages de multiples (IBGE, 2005).

Les systèmes d'alerte aux crues et inondations sont essentiels pour pouvoir prévenir ces événements extrêmes et, donc, réduire leurs impacts. L'objectif de ces systèmes est d'informer la population, ainsi que les agences de la défense civile, dès la présence d'un signal indiquant la possibilité d'un événement de crue à venir, de façon à ce qu'il y ait suffisamment de temps pour évacuer la zone. Principalement dans les secteurs urbains, il existe une intensification de l'utilisation du sol aux marges des fleuves, résultant une couverture du sol de plus en plus imperméabilisée et un temps de concentration réduit, avec, en conséquence, la formation rapide des débordements des rivières (*crues rapides*).

Comme l'illustre la figure 5, pour que les alertes soient efficaces, il faut disposer d'outils performants de prévision des crues, mais également avoir une bonne connaissance des risques et

enjeux de la zone, afin de définir avant la crise les actions adaptées aux alertes (évacuations de certains secteurs, mise à l'abri d'équipement, entre autres).



**Figure 5.** Schéma de réduction des impacts des inondations.

Dans ce contexte, ce stage focalise plus particulièrement sur les outils d'alerte aux crues. En particulier, nous nous intéresserons aux méthodes développées en France et au Brésil.

### 1.2. Questions posées

L'Irstea, en partenariat avec Météo-France, a développé un outil de calcul pour la prévision des crues rapides en région méditerranéenne, appelé AIGA (Adaptation d'Information Géographique pour l'Alerte en crue). Celui-ci modélise les crues à partir d'un modèle hydrologique de transformation de la pluie en débit. AIGA permet d'estimer le débit d'un cours d'eau à partir des données de pluie, issues des radars météorologiques et/ou des stations pluviométriques, tout en considérant l'humidité du seuil au moment où l'événement pluvieux a lieu sur le bassin versant (Javelle et al, 2010). Les débits calculés sont comparés à des débits de référence relatifs à différentes périodes de retour de 2, 10 ou 50 ans. La méthode permet de générer une carte qui présente les cours d'eau en couleurs différentes selon le degré de gravité de la crue estimée.

L'outil AIGA a initialement été développé pour fournir une information d'alerte aux crues rapides qui sont souvent observées en région méditerranéenne. La question posée par Irstea est de

savoir si cette méthode peut s'appliquer sur d'autres zones en France, voire à l'étranger, comme par exemple au Brésil. En effet, ce vaste pays offre de nombreuses possibilités et Irstea souhaite identifier d'éventuelles futures collaborations avec ce pays.

Pour aborder les prévisions dans des régions à climats différents, les questions suivantes se posent :

- Des contextes hydro-climatiques différents conduisent à des méthodologies de prévision différentes ?
- Quelles sont les similitudes et différences entre les systèmes d'alerte hydrologique utilisés dans des contextes hydro-climatiques différents ?
- Quelle est la robustesse d'adaptation de la méthode AIGA dans un contexte hydro-climatique divers en France ?
- Est-ce qu'une méthode comme AIGA serait applicable aux conditions hydro-climatiques rencontrées au Brésil ?

### ***1.3. Travail réalisé et organisation du rapport***

Afin de contribuer à répondre aux questions posées, le travail suivant a été réalisé. Celui-ci s'articule en deux parties distinctes.

D'une part, dans une perspective d'application d'AIGA au Brésil, où les hydro-climats sont divers et les risques d'inondation sont importants, une étude préliminaire sur les similitudes et différences entre les systèmes d'alerte en France et au Brésil a été menée. Nous envisageons de comparer les méthodes utilisées dans les deux pays pour mieux comprendre comment chaque pays aborde la thématique de risque de débordement des cours d'eau.

Dans un deuxième temps, ne disposant de données au Brésil pour appliquer la méthode AIGA, nous avons testé son application au niveau de l'ensemble du territoire Français, alors que la méthode a été développée pour la zone méditerranéenne. L'application d'AIGA au Brésil pourrait être une continuation de ce travail dans le cadre de futurs projets de collaboration.

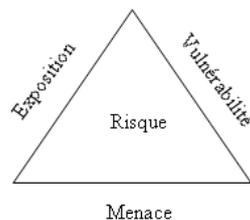
Le rapport est composé en deux parties :

- La première partie compare les systèmes d'alerte aux crues en France et au Brésil
- La deuxième partie traite de l'application d'AIGA au niveau Français.

# PARTIE I : Analyse bibliographique sur les systèmes d'alerte aux crues brésilien et français

## 1. Le système de prévision de risque d'inondation

Les désastres naturels sont des événements difficiles à éviter en totalité. Il est nécessaire de savoir les gérer et de vivre avec les possibles dommages qu'ils occasionnent. Leur gestion est un ensemble d'actions qui a comme objectif de réduire les effets indésirables des événements extrêmes. Pour comprendre ce qui peut être fait pour minimiser les dommages causés par les événements extrêmes, il faut d'abord comprendre le signifié du mot « risque ». Celui-ci est un facteur résultant du produit entre la menace, l'exposition et la vulnérabilité (Kron, 2003).



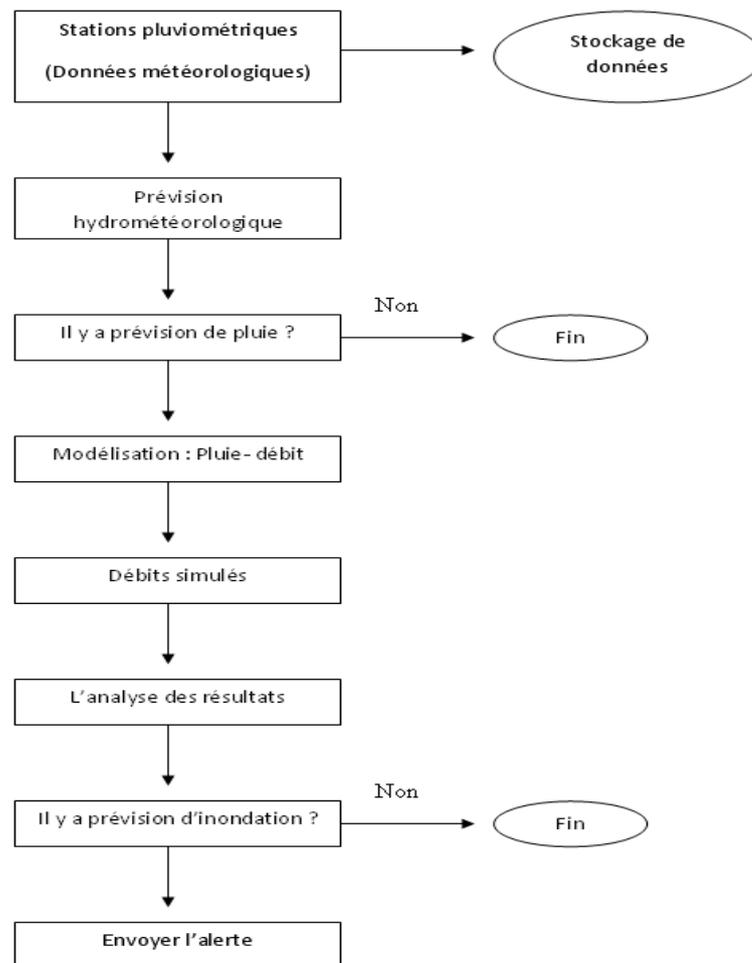
**Figure 6.** Triangle du risque (Crichton, 1999).

La menace (ou aléa) correspond au phénomène naturel qui atteint la région. L'exposition est rapportée à la quantité de personnes et de biens économiques placés dans le secteur susceptible d'être atteint par la menace. La vulnérabilité indique le degré de préparation de la région pour faire face à la menace. Des caractéristiques comme grandeur, probabilité de présence et possibilité de prévision, contribuent à l'évaluation du degré de risque d'une région. Les mesures de mitigation et les systèmes d'alerte aident à réduire le niveau de vulnérabilité.

Pour réaliser une gestion efficace des désastres naturels, l'Organisation Météorologique Mondiale recommande l'implémentation de plans nationaux qui envisagent les phases suivantes : préparation, réponse, récupération et mitigation (WMO, 2006).

Dans ce contexte, un système d'alerte capable d'anticiper l'arrivée d'un événement s'encadre dans les étapes de préparation, réponse et mitigation. Il comprend des actions de surveillance et de vigilance qui contribuent à la diminution de l'exposition à l'aléa (Maheshwari, 1997).

Les systèmes d'alerte ont comme principaux objectifs prévoir et informer la communauté de la possibilité d'occurrence d'un désastre naturel. Ces systèmes sont généralement basés sur trois éléments principaux : surveillance, prévision et décision (Krzysztofowicz et Davis, 1983). La figure ci-dessous présente la base du fonctionnement d'un système d'alerte.



**Figure 7.** Protocole générale d'un système d'alerte d'inondation (Andrade, 2006).

La surveillance des résultats concerne le traitement, le stockage et la distribution des données hydrométéorologiques. À partir de ces données, le calcul des crues peut être réalisé. Il existe plusieurs types de méthodes utilisées dans ce type d'étude. Les plus utilisées transforment la pluie en débit et utilisent les résultats pour vérifier s'il aura une inondation. Avant de mettre en place un système de prévision et alerte, les modèles hydrologiques sont d'abord testés et calés sur la région d'intérêt à partir de données historiques. Le but est de garantir une bonne simulation de la transformation pluie-débit avant d'utiliser le modèle pour la prévision en temps-réel (Andrade, 2006).

Une fois cette étape réalisée, il faut prendre une décision pour les actions qui doivent être réalisées face au risque d'inondation. Cette composante est représentée par une organisation de gestion d'urgence (défense civile ou préfecture municipale), par un gérant d'inondations ou par les habitants même de la région. En général, un système d'alerte n'envisage pas d'actions de récupération après les inondations ; cette étape doit faire plutôt partie d'un plan de gestion de risque (Mendiondo, 2005).

## 2. Les caractéristiques des régions d'étude

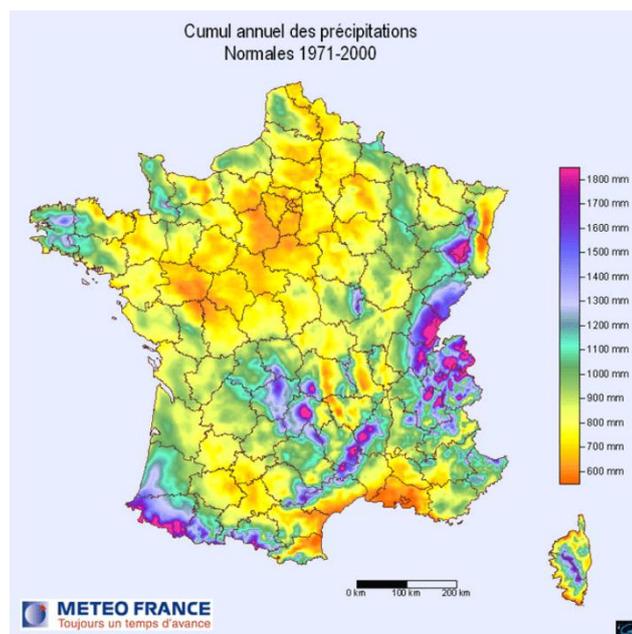
### 2.1. Les principales caractéristiques climatiques

Le climat est un système qui interagit avec des facteurs environnementaux, comme les oscillations de l'orbite terrestre, le rayonnement solaire et la température. Les climats sont répartis en grandes familles et distribués de façon zonale (Conseil Général Nord, 2011). Ils varient de façon importante dans le temps et dans l'espace.

#### 2.1.1. Le climat en France

De façon générale, le climat français est tempéré et le territoire est divisé en plusieurs régions climatiques différentes: climat océanique, dans laquelle s'inscrit le nord et nord-ouest de la France, climat semi-continental à l'intérieur du pays, climat méditerranéen au sud et climat de haute-montagne dans les Alpes, les Pyrénées, le Massif Central, le Jura et les Vosges. Les cartes suivantes présentent quelques indices climatiques qui illustrent ces différents climats français (*annexe 1*).

La variabilité de la précipitation annuelle moyenne en France est large (Figure 8). La moyenne peut être localement de moins de 600 mm, dans le delta du Rhône et la vallée de l'Aude, par exemple, jusqu'à plus de 2000 mm sur les monts du Cantal (Source : Météo-France). Dans la région nord-est on observe une pluviométrie de 800 à 1100 mm, tandis que dans le sud-ouest les précipitations atteignent 1500 mm au Pays Basque. Dans le Sud-est, la moyenne varie de 600 mm (delta du Rhône) à plus de 800 mm sur la Côte-d'Azur. Enfin, sur la Corse, les précipitations dépassent 1000 mm, principalement sur le centre de l'île.



**Figure 8.** Carte de cumul annuel des précipitations en France (Source : <http://www.meteopassion.com/cumul-annuel-des-precipitations.php>)

Toute la France est exposée aux pluies intenses, qui apportent un débit d'eau important pendant une durée de temps donnée. Cette quantité peut parfois s'égaliser à celle reçue en plusieurs mois. Les pluies torrentielles (orages localisés qui peuvent, sur de courts laps de temps et sur un périmètre limité, déverser d'énormes quantités d'eau) sont fréquemment présentes dans les régions méditerranéennes et les régions montagneuses. Selon les informations fournies par Météo-France, pour les grands événements, le cumul des précipitations dépasse facilement les 100 mm en une heure. Les débits observés peuvent dépasser 500 mm en 24 heures dans la région sud de la France. Les deux grandes périodes des précipitations sont de mai à septembre et pendant l'automne (l'air en altitude se refroidit et la Méditerranée est encore chaude). Des épisodes de grande ampleur géographique, avec des précipitations élevées, sont fréquents sur la Bretagne et les collines normandes. Ces événements sont le plus souvent observés durant l'automne et l'hiver.

### 2.1.2. *Le climat au Brésil*

Le climat au Brésil est très diversifié, dû à sa localisation et sa grande extension territoriale. Il présente diverses variations d'une région à l'autre. En général le climat est tropical, par contre il peut être divisé en cinq modalités. Selon la classification d'Arthur Strahler, il existe cinq grands climats au Brésil (*annexe 2*) :

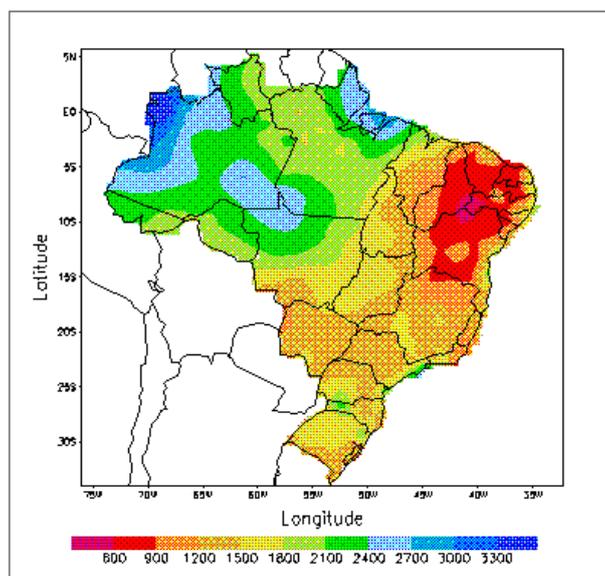
- Equatorial humide, qui inclut l'Amazonie;
- Tropical, englobant une grande partie de la zone centrale du pays et la côte mi-nord;
- Tropical sec, qui englobe l'arrière nord-est et la moyenne vallée de la rivière São Francisco;
- Littoral humide, qui englobe la côte est et la côte nord-est, exposés à des masses d'air de la mer;
- Subtropical humide et subtropical côtes orientales, principalement dominé par la masse d'air de la mer tropicale, englobant le sud du Brésil.

Par conséquent, Le Brésil présente des régimes pluviométriques très variés liés à ses caractéristiques régionales physiques. Le nord présente un climat équatorial humide. Au nord-est, la saison des pluies est caractérisée par des précipitations faibles, limitées à quelques mois, sous un climat semi-aride. Le sud-est et le centre-ouest sont influencés par les deux systèmes tropicaux qui touchent le pays, et ont deux saisons bien définies : la saison sèche en hiver (juin-août) et la pluvieuse en été (décembre-février), avec souvent des précipitations convectives. Le sud du Brésil est caractérisé par les systèmes frontaux, responsables des principales quantités de précipitation observées au cours de l'année (figure 9).

Selon Marengo et Hastenrath (1993), les précipitations moyennes annuelles dans chaque région du Brésil sont:

- Nord : 3000 mm ;

- Nord-est : 500 mm à 1000 mm ;
- Sud-est et centre-ouest : 1500 mm à 2000 mm ;
- Sud : 1500 mm à 2000 mm.



**Figure 9.** Cumul annuel moyen des précipitations au Brésil en mm (source: INMET).

Les principaux centres urbains et métropoles du sud-est du Brésil, pendant l'été et le printemps, saison de pluie dans ces régions, se produisent souvent des pluies torrentielles. Ces précipitations occasionnent souvent des grands dommages, avec la destruction des maisons, de tunnels et autoroutes, et peuvent aussi être responsable de la perte de vies humaines.

Dans la région sud et sud-est du Brésil, la Zone de Convergence de l'Atlantique Sud - ZCAS (système frontal) joue un rôle important dans les précipitations locales. Elle peut amener des fortes intensités de précipitation, parfois sur des longues durées, et provoquer des glissements de terrain et des épisodes d'inondation. La position et l'intensité de la ZCAS sont responsables pour la vaste variabilité temporelle des précipitations pendant les saisons estivales (Koski *et al.*, 1997).

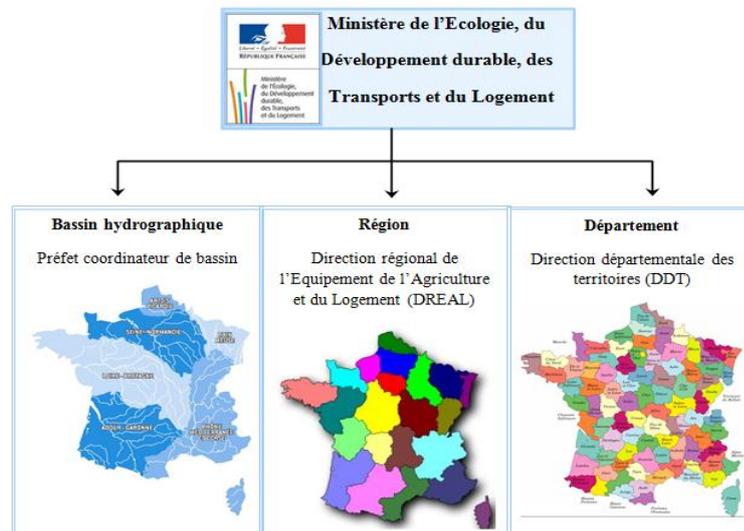
Dans les dernières années, les inondations au Brésil sont de plus en plus constantes. Le nombre de dommages et de préjudices financiers augmentent à chaque année. Des cas d'inondation dans les états du Paraná, São Paulo, Rio de Janeiro et Minas Gerais montrent la capacité de dégât de ces événements : par exemple, une première évaluation du Senat a estimé le cout des inondations de l'été 2011 à Minas Gerais à plus d'un milliard de dollars (Senat fédéral, 2012). Les glissements de terrain dans la région de Teresópolis à Rio de Janeiro en janvier 2011 ont été marqués par 400 morts, plus de 300 disparus et 35000 personnes délogées (Folha de São Paulo, 2011).

## 2.2. Acteurs nationaux dans le domaine de la prévision des crues

Tout d'abord, pour bien comprendre le système d'alerte et prévention des inondations d'un pays, il faut connaître les principaux acteurs de la région considérée dans le domaine. Dans le cas de ce projet, nous présentons ci-après les acteurs majeurs que l'on retrouve en France et au Brésil.

### 2.2.1. Les acteurs en France

En France, le principal acteur est le Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement. Le territoire est divisé selon les bassins hydrographiques (unités naturelles), région et département (figure 10).



**Figure 10.** Gestion des ressources hydriques en France.

Face aux inondations que la France a connues dans ces dernières années, un service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations a été créé à Toulouse en juin 2003, le SCHAPI. Il est rattaché à la Direction de l'eau du ministère de l'Écologie et du Développement Durable. Celui-ci réunit les secteurs d'étude, de la météorologie et d'hydrologie. Une des principales missions du SCHAPI consiste à soutenir les services de prévision des crues (SPC) au niveau national. Des informations destinées au public sont publiées à l'aide de cartes de vigilance « inondations ». Pour assurer la mission de gestion des inondations au niveau local, 22 services de prévision des crues (SPC) sont présents sur le territoire français (*annexe 3*).

Par rapport à la gestion des risques de crues, les responsabilités sont divisées en :

- **L'Etat** : connaissance de l'aléa et organisation des secours au niveau départemental.
- **Les collectivités** : travaux de protection, actions et informations de prévention et diffusion de l'alerte.
- **Le citoyen** : réduction de la vulnérabilité individuelle et information de l'acquéreur / locataire.

Les organismes qui font partie de la direction des inondations sont : les mairies, les préfetures, les SPC, le SCHAPI et Météo France. Les mairies sont responsables des alertes aux populations et les préfetures coordonnent les secours pilotés par la défense civile et les pompiers. Les Services de Prévision des Crues (SPC) fournissent les observations et prévisions de l'évolution du niveau des cours d'eau des bassins versants qui sont sous leurs surveillances. Le SCHAPI est le

service central responsable pour la partie technique d'appui aux SPC au niveau national et la diffusion des alertes produites par les SPC au public. Il contribue également aux actions de communication sur les événements hydrologiques et assure une mission d'animation, formation et conseil auprès des services intervenant dans le domaine de la prévision des crues et de l'hydrologie. Les données pluviométriques et les prévisions de pluie au niveau national sont fournies par Météo France.

### 2.2.2. Les acteurs au Brésil

Selon la division adoptée par le Ministère de l'Environnement, le Brésil est constitué par huit grands bassins versants (figure 11).



**Figure 11.** Les grands bassins versants du Brésil (CNRH, 2010).

Au Brésil, l'acteur majeur dans le domaine des ressources hydriques est le Ministère de l'environnement. Il gère les obligations du Secrétariat de gestion de l'eau (SRH) et de l'Agence nationale de l'eau (ANA). A l'exemple du modèle de gestion français, l'agence ANA a la fonction de réaliser les organisations exécutives et les comités de bassin versant (CBH), qui sont « les parlements de l'eau ». Ces comités ont été créés en 1978 dans le but de favoriser l'utilisation intégrée des ressources des bassins versants.

La loi 9.433 (8 janvier 1997) a créé les principes nationaux des politiques de l'eau au Brésil. Cette loi attribue à chaque état brésilien la possibilité d'adopter des directrices diverses selon ses spécificités locales, son administration et ses principes de gestion de l'eau. Le processus d'établissement des lois a commencé aux régions Sud-Est, Sud et Nord-Est, là où il y avait des conflits liés à la disponibilité de l'eau. L'état de São Paulo, par exemple, a créé des agences de gestion des bassins versants, le Système Intégré de Gestion de Ressources Hydriques –SIGRH.

Du fait que le pays perd, en moyenne, plus d'un milliard de dollars chaque année avec les inondations, qu'elles soient observées en milieu rural ou urbain, le ministère a créé Le Centre national de surveillance et des alertes des catastrophes naturelles, CEMADEN. Il a pour objectif de développer, de tester et de mettre en œuvre des systèmes de surveillance des catastrophes naturelles

dans les zones vulnérables au Brésil. Les données mises à disposition pour cette mission (radars, satellite, stations pluviométriques et hydrologiques) sont fournies et gérées par l'Institut national de la recherche spatiale (INPE) ou par l'ANA.

Le Secrétariat du développement régional a pour mission soutenir les villes dans la lutte contre les inondations. Dans la Constitution fédérale, article 21, paragraphe 28, il est marqué que c'est l'Union le responsable pour planifier et promouvoir la défense permanente contre les calamités publiques, en particulier les sécheresses et les inondations.

Des programmes nationaux de recherche sont mis en place afin de trouver des solutions qui réduisent l'impact des inondations et qui font la prévision de ces événements. Le développement technologique et scientifique a été encouragé par des programmes spéciaux de CNPq, Fapesp, PADCT / CIAMB et FINEP. Ceux derniers sont des fondations de soutien au développement scientifique et technologique du Brésil.

### **2.3. Données utilisées par un système de prévision**

De manière générale, les données utilisées pour établir un système de prévision de crue sont rapportées aux données météorologiques, la température, la pression, la vitesse du vent, l'humidité de l'air, les caractéristiques des bassins versants et de la pluie. Actuellement, les pluies sont détectées, dans la majorité des cas, par les radars et par les stations pluviométriques.

#### **2.3.1. Les données en France**

Les données pluviométriques utilisées en France sont obtenues à partir des réseaux de mesure au sol (stations pluviométriques ou hydrologiques), de radars météorologiques ou des sorties de modèles météorologiques. Des bases de données existent également pour pouvoir stocker les données collectées et les utiliser en temps différé pour rejouer les prévisions ou analyser des événements observés : Banque Météo, gérée par Météo-France, et Banque Hydro, gérée par le SCHAPI.

#### **2.3.2. Banque Météo - Climathèque**

Le Banque Météo est alimentée et gérée par Météo France. Elle est constituée des données suivantes :

- Données d'observation des stations pluviométriques : observations de précipitation sur 1500 stations en France (*annexe 4*).
- Données climatiques : observations de paramètres climatiques divers (humidité, température, vent) sur la France aux pas de temps horaire, journalier et mensuel.
- Bulletins climatiques mensuels et quotidiens qui contiennent les données météorologiques (pluviométrie, humidité de l'air, température, vent) : disponibles depuis mars de 1997.

### 2.3.3. Banque HYDRO

La banque HYDRO ([www.hydro.eaufrance.fr/](http://www.hydro.eaufrance.fr/)) stocke des débits instantanés, journaliers et mensuels des bassins versants français à partir de 3500 stations de mesure. Les débits sont calculés en utilisant les valeurs de la hauteur d'eau mesurée et des courbes de tarage préalablement calées. Ces courbes sont actualisées à chaque mise à jour d'une hauteur d'eau. Les stations de mesure sont implantées sur les rivières et la banque HYDRO fournit un accès aux informations signalétiques des stations (finalité, localisation précise, données disponibles et historique des mesures).

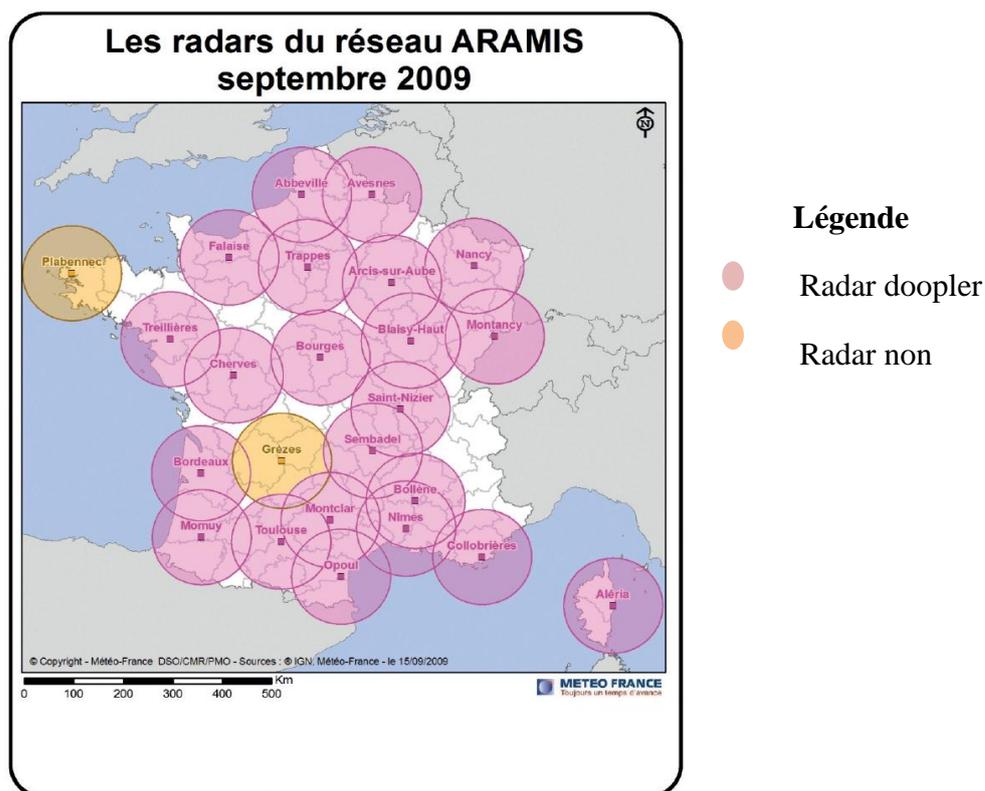
Le SCHAPI est responsable de l'administration de la banque HYDRO et gère leurs services associés. Il assure également les évolutions des projets et des données.

Les données hydrométriques sont utilisées pour caler les modèles hydrologiques et pour évaluer la qualité des prévisions (références de vérification).

### 2.3.4. Les radars météorologiques

Les données de radars en France sont fournies par le réseau ARAMIS (Application Radar à la Météorologie Infra-Synoptique) de Météo-France. Il est composé de 24 radars localisés en régions métropolitaines (figure 12).

Une maille d'un km<sup>2</sup> est créée dans tous les quarts d'heure élaborée (Parent Du Chatelet 2003; Diss, 2009). L'image peut être complétée par les informations satellites et d'autres données de mesures disponibles. Cette cartographie fournit une estimation des cumuls de précipitations et apporte des informations très importantes pour le suivi des systèmes précipitants et pour le calcul des prévisions des débits.



**Figure 12.** Les radars du réseau ARAMIS

(Source : <http://comprendre.meteofrance.com/content/2010/5/23216-43.jpg>)

### 2.3.5. Les données au Brésil

La surveillance hydrométéorologique au Brésil remonte au 19<sup>ème</sup> siècle, à partir des initiatives du Département national des travaux contre les sécheresses (DNOCS) et de l'Institut national de la météorologie (INMET). Depuis, le réseau s'est développé en cherchant à étendre les connaissances hydrométéorologiques au niveau national. Les données pluviométriques, hydrologiques et de qualité des eaux sont collectées par divers organismes et stockées dans une base nationale de données, le « Système Hydro », HidroWeb (<http://hidroweb.ana.gov.br/>), géré par l'ANA. Cette base de données fait partie du Système national d'information des ressources hydrologiques (SNIRH). Ces informations sont utilisées, entre autres, par les études d'évaluation de disponibilité de l'eau et de surveillance aux événements critiques d'inondation et étiage.

### 2.3.6. Les stations pluviométriques

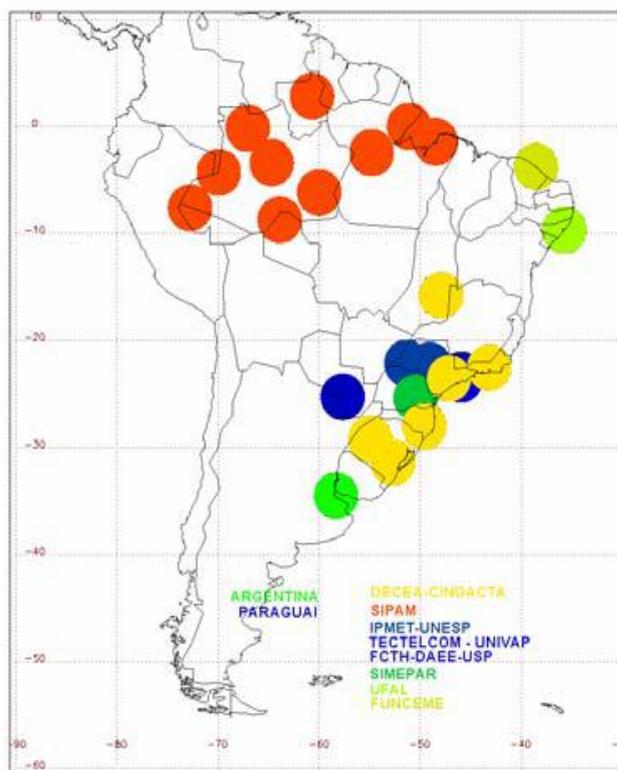
La partie plus importante du réseau de mesure national est surveillé par l'Agence nationale de l'eau (ANA) : de 8080 stations pluviométriques répertoriées dans le pays, l'ANA en gère 4543 (annexe 5). Les autres stations sont surveillées par des instituts de recherche du pays et par les Comités de bassins versants.

### 2.3.7. Les stations hydrométriques

Afin de constituer et viabiliser les informations nécessaires pour le développement des projets dans les thématiques d'hydrologie, ainsi, permettant le calcul et les simulations des débits, des stations hydrométriques sont installés au Brésil par l'Agence national de l'énergie électrique (ANNEEL). Actuellement au Brésil, 7100 stations hydrométriques sont opérationnelles dans tout le pays (Magalhães, 2000).

### 2.3.8. Les radars météorologiques

Au Brésil il y a actuellement plus de vingt radars météorologique appartenant aux instituts : DECEA (Département de contrôle de l'espace aérien), SIPAM (Système de protection de la Amazonie), IPMET-Unesp (Institut de la recherche météorologique), FCTH-DAEE (Fondation technologique hydraulique – Département des eaux et d'électricité). La figure ci-dessous montre la division des radars au Brésil.



**Figure 13.** Les radars existants au Brésil et les institutions responsables. Les cercles indiquent une zone de couverture d'un rayon de 250 km (source : Angelis *et al*, 2005).

Etant donné l'extension du pays, des projets ont été créés pour regrouper les données des radars. Par exemple, le projet SIM a pour objectif le développement d'un système automatique de surveillance météorologique, capable d'intégrer les bases de données nationales de météorologie. Les organismes fondateurs sont l'Institut d'astronomie géophysique et science atmosphérique de l'Ecole de São Paulo (IAG – USP), l'Institut de recherches météorologiques (IPMET – Unesp),

l'Institut National de Recherches Spatiales (INPE) et l'Institut National de Météorologie (INMET, 2010).

Egalement, une intégration du réseau de six radars appartenant au Département de Contrôle de l'Espace Aérien (DECEA) et au Centre de Prévisions Météorologiques et Etudes Climatiques (CPTEC-INPE) a été faite en 2004. Le résultat de cette intégration est la mise en place d'un réseau qui fonctionne 24 heures sur 24 en gérant des données qui sont envoyées au CPTEC en temps réel (Queiroz, 2008).

### **2.3.9. Plateforme de collecte de données (PCDs)**

Le PCD est la plateforme de données de l'Institut national de la recherche spatiale (INPE). Cette plateforme regroupe des données météorologiques, comme température, pression, vitesse du vent et l'humidité de l'air. Elle récupère les précipitations fournies par les radars météorologiques et met à disposition des images composées tous les 15 minutes. Elle génère également les bulletins techniques contenant les pluies instantanées et accumulées, détectées par des satellites.

Ces données sont utilisées par l'INPE ou par d'autres organismes partenaires dans des études climatiques, météorologies, et de prévision des pluies et inondations.

## **2.4. Méthodes utilisées et cas d'application/projets**

Dans la littérature il existe des nombreux modèles hydrologiques, chacun avec ses caractéristiques et domaines d'application. Ces modèles sont de systèmes complexes, à chaque étape de la modélisation des approximations sont réalisées (Ambroise, 1999). Ils peuvent être des différents types : modèles empiriques, conceptuels et distribués à base physique. Aussi, ils peuvent être classés selon la description spatiale des processus au niveau du bassin versant en modèles globaux ou distribués (Payraudeau, 2002).

Les approches de modélisation peuvent aussi varier selon la disponibilité des données et l'application envisagée. D'une part, les modèles débit-débit simulent un débit sortant à un point aval en considérant le débit entrant à un point en amont dans le réseau hydrographique. La connaissance des débits des cours d'eau est indispensable, ainsi que des équations de propagation au long du réseau. Ce type de modèle est souvent utilisé quand les conditions de propagation permettent l'anticipation de l'événement. D'autre part, les modèles pluie-débit simulent les débits du bassin versant en s'appuyant sur les mesures de la pluie à l'intérieur de la surface de drainage et à partir d'équations qui décrivent la transformation de la pluie en débit au sein du bassin versant.

En France et au Brésil, il y a plusieurs types de modèles hydrologiques considérés pour des applications diverses. Dans ce projet, nous allons citer les approches et modèles plus utilisés pour la problématique de prévision des crues.

### 2.4.1. France

En France les modèles pluies-débits utilisés pour la prévision de crues sont classés en trois principales catégories : modèles de type « boîte noire », les modèles conceptuels et les modèles « à base physique ».

Le premier groupe (modèles « boîte noire ») est caractérisé par les modèles qui transforment la pluie en débit en établissant un lien mathématique, comme par exemple, les régressions. Ces modèles n'utilisent pas des données sur la nature physique du bassin versant. Cette catégorie regroupe les modèles basés sur les fonctions de transfert (hydrogramme unitaire), les modèles régressifs et les réseaux de neurones. Ces modèles sont simples à mettre en œuvre, par contre, ils ne permettent pas la compréhension du comportement physiques des bassins. Le modèle PQb est un exemple de cette catégorie (*annexe 6*). Il utilise une régression linéaire multiple pour la prévision des débits.

Le deuxième groupe est représenté par les modèles conceptuels (empiriques). Le principe de ces modèles est le calcul de transformation pluie-débit à partir de sous-processus. L'ensemble du bassin versant est donc considéré comme des réservoirs. A partir de cette méthodologie il est possible de réaliser des calculs considérant la physique du bassin. Les processus majeurs qui sont modélisés à l'aide des réservoirs sont la transformation de la pluie brute en pluie nette, cela contribue au débit de la rivière. Ensuite la pluie nette est transformée en débit. Ces modèles peuvent être globaux, semi-distribués ou distribués. Les modèles GR3H (*annexe 7*), GRP (*annexe 8*), SIM (*annexe 9*) et AIGA (*annexe 10*) sont des exemples de ce type de catégorie.

Le dernier groupe est caractérisé par des modèles physiques. Ceux-ci se basent sur les lois de l'hydrodynamique à l'aide des équations liées à la mécanique des fluides. Les paramètres sont en principe mesurables sur le terrain, ils sont associés aux caractéristiques du bassin versant. Ces modèles requièrent un nombre important de données. Les performances de ces modèles sont plus satisfaisantes, mais son application dans la pratique est complexe et coûteuse. Comme exemple de ce groupe nous pouvons citer le modèle Marine (*annexe 11*).

### 2.4.2. *Brésil*

Actuellement au Brésil, les systèmes d'alerte de prévision des crues sont développés et mises en opération dans plusieurs régions du pays, principalement dans la région sud-est, où des grands centres urbains sont soumis à des inondations récurrentes. Les données d'entrée aux systèmes d'alerte proviennent souvent des radars météorologiques, satellites, stations pluviométriques et de corrélations établies entre les événements pluvieux précédents. Les systèmes sont souvent adaptés à un bassin versant particulier. Plutôt que des modèles, nous présentons donc ici quelques exemples de systèmes d'alerte retrouvés dans la littérature.

### 2.4.3. *Le système d'alerte aux inondations du bassin versant du Rio Doce*

Le bassin du Rio Doce est situé à l'État de Minas Gerais. Un système d'alerte contre les inondations a été installé dans ce bassin en collaboration avec l'Agence Nationale de l'Eau (ANA) et l'Institut des mines de gestion de l'eau (IGAM). Le système comprend la collecte et l'analyse des données pluviométriques, l'estimation de la prévision hydrologique et la transmission des résultats à la défense civile (CPRM, 2005).

La prévision hydrologique est basée sur la corrélation des débits à partir des données des précédentes saisons des pluies, depuis 1997. La méthode utilise des équations empiriques ; elle ne quantifie pas l'augmentation du débit en raison d'une pluie localisée. Le système est opérationnel pendant la saison des pluies (Castilho, 2002).

Ce système proposé la surveillance et la prévision des événements. L'organisme responsable produit des bulletins techniques et les transmet aux autres entités.

### 2.4.4. *Le système d'alerte aux inondations de la région de l'état de São Paulo (SAISP)*

Le Système d'Alerte aux Inondations de la Région de l'état de São Paulo (SAISP) a été créé en 1976 par le Département d'Eaux et d'Énergie Électrique (DAEE). La surveillance du système est faite par le « Rede Telemétrica de Hidrologia » de la DAEE. Les données utilisées sont celles de radars et des stations pluviométriques (Barros, 1999).

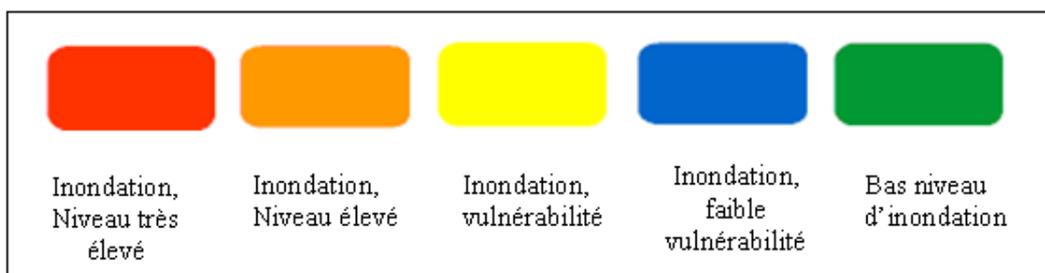
Les données de prévision sont les variables d'entrée du modèle. Le SAISP utilise le modèle TOPMODEL pour réaliser le calcul de la transformation des pluies en débits (Pereira Filho et al., 2008). Les résultats sont présentés tous les 5 minutes, à partir de trois catégories d'alerte : attention (possibilité d'inondation dans les proches trois heures), vigilance (inondation éminente dans les proches trois heures) et urgence (inondation en train de se produire).

### 2.4.5. Le « Signaleur Environnemental »

Le Signaleur Environnemental est un système de prévision des inondations dans le bassin versant de Gregório, à São Carlos, dans l'état de São Paulo (Barros *et al.*, 2003).

Le système utilise le modèle SCS du « Soil Conservation Service » pour réaliser l'estimation des débits à partir des données de pluies. La méthode considère comme variables d'entrée la prévision de pluie, la couverture superficielle du terrain, le type de formation géologique et l'humidité du sol. Une fois obtenues les valeurs de précipitation effectif, des hydrogrammes de crue (hydrogramme unitaire) sont estimés (Andrade, 2006).

A partir de l'évaluation des résultats du modèle de transformation pluie-débit, il est possible d'identifier cinq niveaux des inondations prévues. Les résultats sont utilisés pour établir un système d'alerte basé sur le modèle d'un sémaphore (Ribeiro *et al.*, 2007).



**Figure 14.** Schéma des niveaux des alertes du système « Signaleur Environnemental » (Ribeiro *et al.*, 2007).

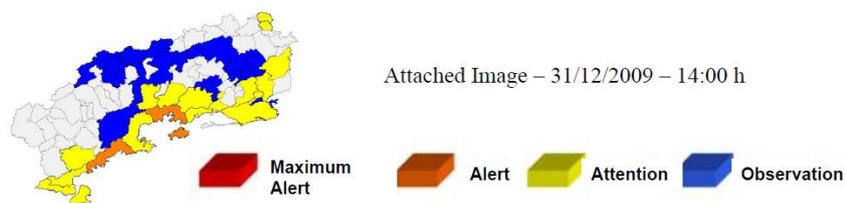
### 2.4.6. Le Système de Surveillance et des Alertes de Désastres Naturels- SISMADEN

Le Sismaden est un outil d'alerte aux risques d'inondation créée par l'INPE. Il est en opération dans le Centre Intégré d'Alerte de Désastres Naturels (Ciaden), localisé à Bauru, dans l'état de São Paulo.

Le fonctionnement de la méthode est basé sur les données pluviométriques du CPTEC/Inpe et sur des cartes de risque produites par l'Institut de Recherches Technologiques de l'État de São Paulo – IPT (*annexe 12*).

Les informations détectées par les radars météorologiques sont superposées aux cartes de risque et soumises à l'analyse automatique du système. Ainsi, par exemple, si dans un secteur de risque de glissements de terrain, il a déjà plu 200 millimètres en 48 heures, et il est prévu de pleuvoir 100 millimètres dans les prochaines 24 heures, le Sismaden interprète que la région est vulnérable à ce type de désastre. Des catégories de niveaux de risque sont stipulées à partir d'un système de couleurs : observation, attention, alerte et maximum d'alerte (figure 15).

En fonction du niveau de l'aléa de la situation à risque, les autorités de la région reçoivent des alertes de risque. Ils ont également accès aux informations détaillées et aux cartes des risques créés par le système.



**Figure 15.** Le système Sismaden (<http://www.dpi.inpe.br/sismaden/>).

### 3. Synthèse comparative

La gestion des ressources hydriques joue un rôle qui est de plus en plus important dans l'actualité. Au Brésil, la question a suscité des discussions et des tentatives d'implémentation d'une gestion intégrée depuis le début des années 80. Sur l'initiative du DNAEE (Département national de l'eau et l'électricité), des comités des bassins fédéraux ont été organisés, mais avec succès mitigés dans plusieurs cas. La difficulté de mettre en œuvre ces politiques peut être liée à l'extension des bassins hydrographiques. Après la Constitution de 1988, plusieurs États ont créé ses propres lois et ont organisé la gestion des bassins versants se trouvant dans leur territoire..

En France, la loi de 1964 constitue une étape importante dans l'histoire de la gestion des eaux. Elle est basée sur un trois piliers : le renforcement de la législation, l'action dans des zones géographiques spécifiques (division du pays en six grands bassins) et l'obtention des ressources nécessaires pour financer des nouveaux investissements. Pour résumer l'administration des eaux en France, on soulignera les deux principaux acteurs : 1) les six comités de bassins versants; 2) les agences de l'eau (Machado, 2003).

En France et au Brésil, la gestion des eaux et le développement de systèmes de prévision et alerte aux crues et inondations ont des particularités liés aux réglementations et aux cas d'application de chaque pays. En France, les services en prévision ont été centralisés avec la création du SCHAPI en 2003 et réorganisés, à la même année, en 22 services de prévision des crues (SPC). Le réseau SPC-SCHAPI contrôle les résultats produits par les simulations hydrologique et transmet des alertes aux décideurs et à la population à travers du site internet vigicrue (<http://www.vigicrues.gouv.fr/>).

Au Brésil, le développement d'outils de prévision et alerte a été mené de façon plus décentralisé. Le Centre de prévision des désastres naturels (Cemaden) vient en effet d'être créé en 2012 pour mieux gérer au niveau national la prévention des différents désastres naturelles observés dans le pays, y compris le risque d'inondation. L'extension géographique du Brésil et la variabilité des conditions hydro-climatiques rencontrées dans son territoire rendent sans doute difficile l'organisation et l'administration centralisés des systèmes d'alerte aux crues. On notera néanmoins que des projets sont en développement pour permettre d'homogénéiser les produits issus des prévisions météorologiques émises, comme par exemple, le projet SIM (regroupement des données et résultats des radars météorologiques).

Enfin, par rapport aux modèles hydrologiques utilisées dans les deux pays, on observe que, en général, les bases méthodologiques sont proches. Les deux pays utilisent tant des modèles globaux comme des modèles distribuées, même s'ils ont des climats différents et des bassins versants à caractéristiques différentes en termes aussi de géologie, surface et occupation du territoire. Des différences sont également observées dans les bases de données disponibles : tandis qu'au Brésil les stations pluviométriques et les radars sont localisés principalement dans les régions plus peuplées du sud et sud-est, en France, la couverture de l'ensemble du pays est plus homogène.

## PARTIE II : AIGA dans un contexte hydro-climatique varié : robustesse et applicabilité étendue de la méthode

### 1. Contexte spécifique

Actuellement, les alertes des crues réalisées par AIGA sont limitées à la région sud-est de la France, la Provence-Alpes-Côte d'Azur et le Languedoc-Roussillon. Dans cette zone la méthode est actuellement en opération (figure 16).

Le but principal de ce stage est d'analyser la robustesse du modèle AIGA, et de le mettre en place dans des régions aux hydro-climats différents. Pour avoir une première conclusion sur la méthodologie du projet, l'outil sera appliquée sur le territoire français.

IRSTEA, en partenariat avec le SCHAPI, a développé ce projet en utilisant les données fournies par Météo-France. Cette thématique est considérée comme un sujet de très grande importance pour le développement et l'amélioration des programmes de prévisions des crues, administrés par les SPCs.

Cette analyse a un objectif exploratoire, l'outil étant testé pour la première fois sur l'ensemble du territoire français. Des questions se posent au long du travail : comment gérer toutes les données, comment gérer les données d'entrée pour utiliser l'AIGA, quels paramètres utiliser pour le taux de remplissage, quelles optimisations faire, quels bassins versants sélectionner pour analyser cette approche.

Comme continuation de ce travail l'objectif est de tester AIGA au Brésil. Etant donné que le Brésil est caractérisé par une grande diversité d'hydro-climats il sera intéressant d'appliquer la méthode pour vérifier sa robustesse. De plus, ce projet participera de la collaboration entre le Brésil et la France.



Figure 16. Localisation de la région où la méthode AIGA est en opération.

## 2. Méthodologie

### 2.1. La méthode AIGA

Opérationnel depuis 2005, AIGA est une méthode développée par IRSTEA et Météo-France et financée par le Ministère de l'écologie. Elle est exploitée par Météo-France dans la région méditerranéenne. Le système produit, toutes les 15 minutes, une carte de prévision des aléas. La période de retour des événements d'inondations est représentée par une échelle de couleurs. (Javelle et al, 2010). Le modèle hydrologique, le GR distribué, est caractérisé par deux réservoirs, l'un de production et l'autre de routage.

#### 2.1.1. Fonctionnement des réservoirs

Le premier réservoir (capacité A) représente l'infiltration de l'eau dans le sol et permet de stocker une partie d'eau des pluies. Ce réservoir est initialisé à chaque événement, le taux initial de remplissage est de  $S_0/A$ . Le rapport de remplissage varie entre 0 et 1.

Les pluies (P) remplissent le réservoir de production à chaque pas de temps. Les pluies passent dans un hydrogramme unitaire qui a un coefficient de 0.7 (lorsque la pluie agit directement sur le modèle) et de 0.3 (lorsque la pluie agit une heure après). Ainsi le pic de crue est atténué.

L'équation suivante présente la pluie nette qui remplit le premier réservoir :

$$P_s = 1 - [S / A]^2 \times P$$

P : pluie nette arrivant au sol

S : niveau d'eau présent dans le réservoir en mm

A : capacité du réservoir

Le paramètre (A), fixé pour chaque bassin versant, donne la variation du niveau de remplissage du réservoir (S). Cette méthode montre l'influence de la saturation du sol dû à l'infiltration ( $P_s$ ).

La pluie qui aliment l'écoulement ( $P_r$ ) remplit le second réservoir. La quantité d'eau est calculée par la formule suivante :

$$P_r = [S / A]^2 \times P$$

P : pluie nette arrivant au sol

S : niveau d'eau présent dans le réservoir en mm

A : capacité du réservoir

Le modèle montre que plus le premier réservoir est plein, plus le second réservoir est rempli ; représentant ainsi la saturation du sol.

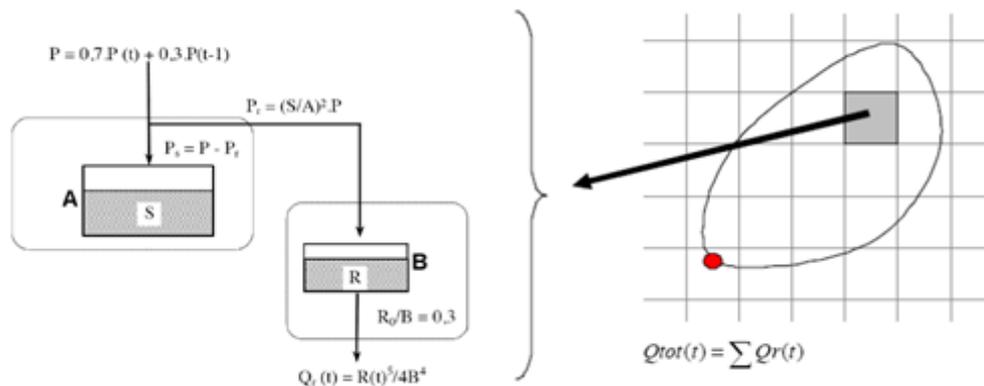
Par rapport au deuxième réservoir (capacité B), il s'agit de un réservoir de routage en permettant la transformation de Pr en débit. La capacité de ce réservoir établit la crue simulée (Graff, 2005). Le taux de remplissage est calculé par la fonction suivante :

$$Q(t) = \frac{R(t)^5}{4B^4}$$

R : niveau d'eau présent dans le réservoir (mm)

B : capacité du réservoir

Cette équation montre que l'augmentation, de la valeur du débit calculé, est gérée par la quantité de l'eau dans le réservoir de routage : plus il est plein, plus le débit est élevé (Arnaud 2005; Arnaud and Fine 2006). Le débit de l'exutoire est calculé en additionnant tous les pixels du bassin versant ( $Q_{tot} = \sum Q_r$ ).



**Figure 17.** Schéma de fonctionnement du modèle hydrologique distribué GR (Javelle, 2009).

### 2.1.2. Paramètres du modèle

Le modèle a pour paramètres les capacités du réservoir A et B. Elles sont établies pour chaque pixel du bassin versant analysé.

La capacité A est égale à la pluie journalière centennale, définie à partir de la méthode SHYREG (annexe 13). La valeur limite inférieure est fixée à 200 mm (Javelle, 2009).

La capacité B correspond à la valeur médiane pour une capacité B optimisée pour les bassins versants de petite surface (Fouchier, 2010). La valeur de B est identique, quelle que soit la zone et l'événement. Elle est fixée à 50mm.

### 2.1.3. Initialisation du modèle

Le modèle fonctionne sur un mode événementiel. Il est réinitialisé chaque jour, sauf si, pour le pixel considéré, la pluie journalière a dépassé 10 mm. Les deux états qui doivent être initialisés

sont les niveaux initiaux des réservoirs de production S0/A, ainsi que celui du réservoir de routage B0/B. Pour ce dernier, la valeur est fixée à 30%. L'initialisation du réservoir de production s'effectue quant à elle à partir d'un indice journalier d'humidité (SAJ) décrit ci-après.

#### 2.1.4. L'indice d'humidité journalier (SAJ)

Cet indice est calculé à partir du réservoir de production du modèle continu GR4J. Il utilise un pas de temps journalier. Les données d'entrées sont la pluie et le taux d'évapotranspiration journalier. Les valeurs de SAJ varient entre 0 et 1 ; 0 correspondant à un assèchement du sol et 1 à sa saturation.

L'ETP utilisée est celle calculée par la formule d'Oudin (Oudin *et al.* 2005), qui fournit une ETP journalière :

$$ETP(j) = \frac{R_e}{\lambda \times \rho} \times \frac{T_a(j) + 5}{100} \quad \text{si } T_a(j) + 5 > 0$$

$$= 0 \quad \text{sinon}$$

$\lambda$  : la chaleur latente de vaporisation de l'eau (2.25 MJ.kg-1),

$\rho$  : la masse volumique de l'eau (103kg.m-3),

$R_e$  : le rayonnement extraterrestre (en MJ.m-2.j-1) calculé à partir de la latitude du bassin,

$T_a(j)$  : la température journalière de l'air du bassin, ces valeurs sont obtenues par la base SAFRAN.

#### 2.2. Critère de performance

Pour pouvoir juger de la qualité des résultats obtenus par la méthode AIGA, les débits calculés seront comparés avec les débits observés. Pour cela, a été utilisé le critère de Nash borné, développé par Mathevet *et al* en 2006. Cette référence propose d'évaluer la conformité des hydrogrammes unitaires estimés avec les hydrogrammes observés.

La méthode du Nash borne est issu du critère de Nash Sutcliff (Nash et Sutcliffe, 1970). Le Nash Sutcliff représente la somme des erreurs quadratiques du modèle, par la variance obtenue des débits observés. Cette variance des débits est définie par la modélisation. La formule suivante présente le calcul de Nash :

$$\text{Nash} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{\text{nbpas}} (Q_{\text{obs}}(t) - Q_{\text{cal}}(t))^2}{\sum_{t=1}^{\text{nbpas}} (Q_{\text{obs}}(t) - \overline{Q_{\text{obs}}})^2}$$

$Q_{\text{obs}}$  : débits observés au pas de temps;

$Q_{\text{cal}}$  : débits calculés au pas de temps ;

$\text{Nbpas}$  : nombre de pas de temps ;

Le Nash compare le modèle hydrologique à une référence présentant, pour chaque pas de temps, un débit moyen de la crue observée. Les valeurs de Nash varient de  $-\infty$  à 1. Un Nash, dont la valeur est positive, signifie que le modèle utilisé est plus performant que le modèle basique de

référence. Une valeur négative indique que le modèle testé est moins efficace. Lorsque d'une estimation parfaite de la crue, la valeur sera égal à 1 (Siou, 2011).

Le Nash borné est une simplification du critère de Nash, il a pour but de simplifier la comparaison des critères de chaque bassin versant analysé. Le Nash non borné peut résoudre des valeurs très négatives ce qui rend difficile l'utilisation des tests statistiques. La formule ci-dessous représente le calcul du Nash borné.

$$Nash_{borné} = \frac{Nash}{200 - Nash}$$

Le domaine de variation de ce nouveau Nash vade -1 à 1, facilitant ainsi la comparaison des débits. Le Nash borné, par sa structure symétrique, donne le même poids aux crues modélisées (Mathevet *et al*, 2006).

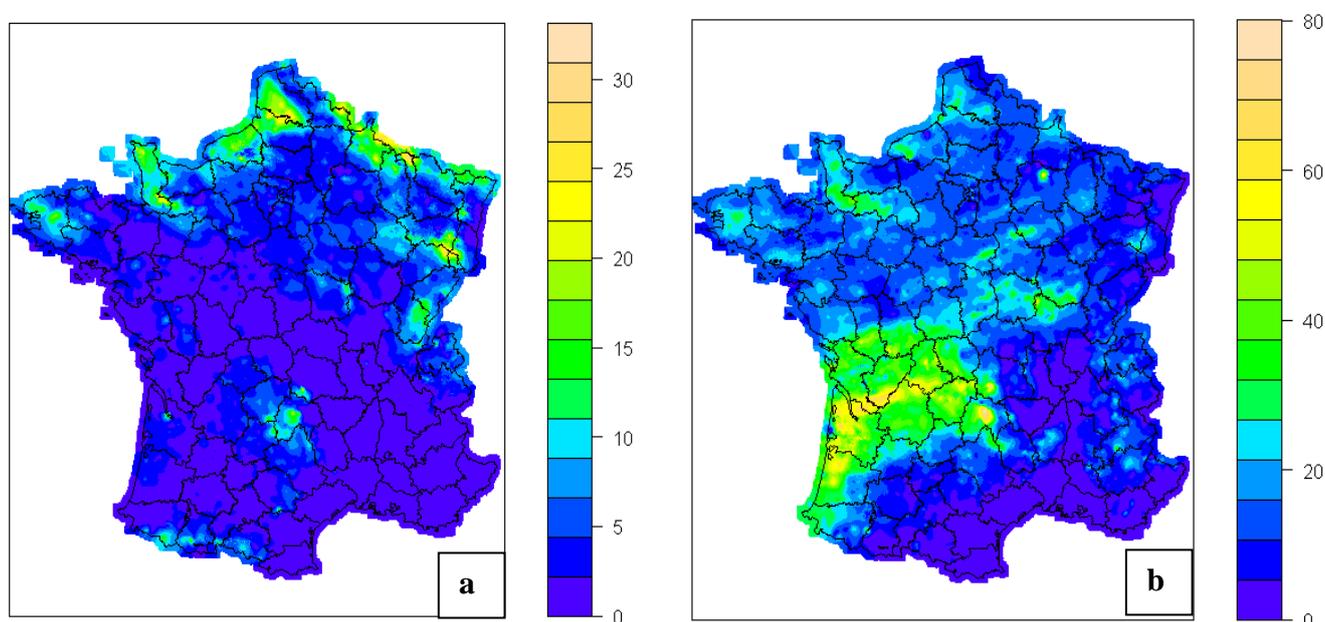
### 3. Préparation des jeux des données

La première étape de ce projet est d'établir les données nécessaires à l'étude : les calculs des pluies journalières, de l'évapotranspiration (ETP), du taux d'humidité (SAJ) et des débits observés.

#### 3.1. *Traitement des pluies de la réanalyse Météo-France*

Les données de pluie utilisées pour cette étude sont celles issues de la réanalyse Météo-France. Ces données sont disponibles pour la période 1997-2006, au pas de temps horaire, à l'échelle nationale. Elle combine l'information radar et les celles des pluviomètres au sol.

Le travail réalisé en début de stage a consisté à la lecture de ces données et leur mise au format pour qu'elles puissent être traitées par le modèle. Des grilles horaires et journalières ont été générées pour toute la période 1997-2007 sur la France entière (*figure 18*).

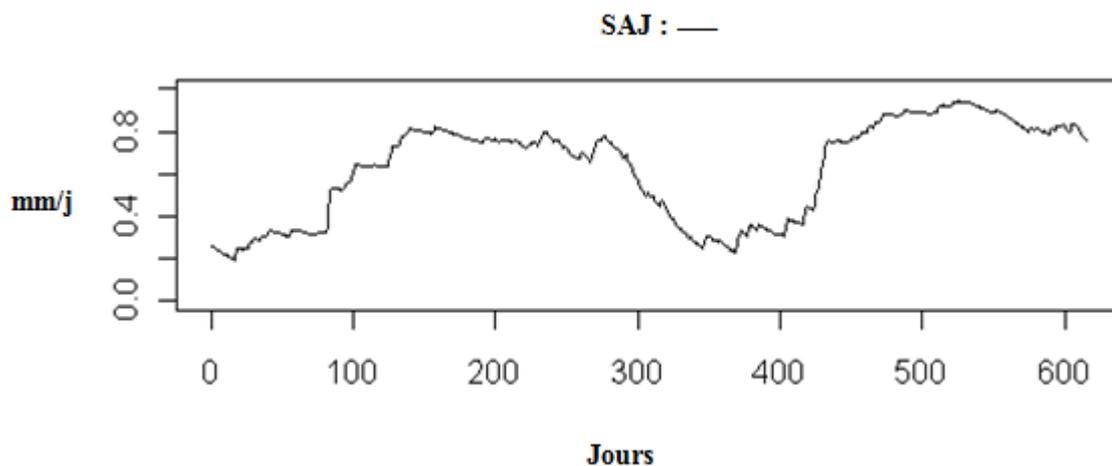


**Figure 18.** Exemples des cartes de pluies journalières (a : 11/02/1997, b:20/10/2000).

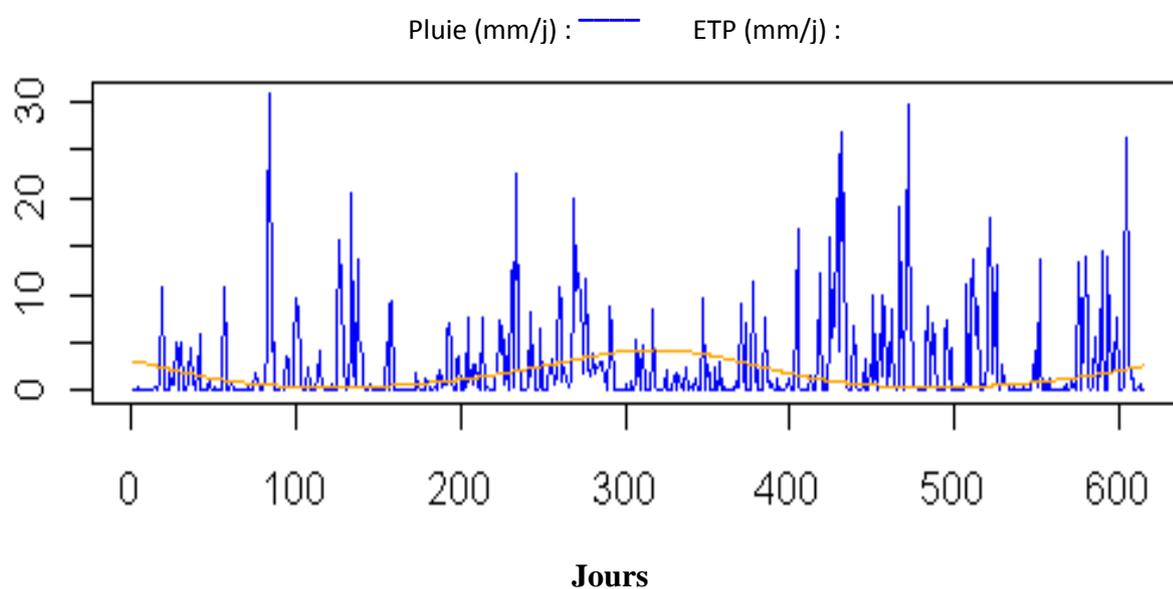
#### 3.2. *Calcul de l'indice d'humidité du seuil (SAJ)*

Le deuxième travail a consisté à générer, toujours sur la période 1997-2006, les grilles d'indice d'humidité SAJ pour la France entière. Pour cela, nous avons utilisé les grilles journalières de pluies créées à l'étape précédente, ainsi que des grilles journalières d'ETP calculées à partir formule d'Oudin (Oudin *et al.* 2005).

Les figures suivantes montrent l'évolution de l'indice SAJ pour un pixel donné, en fonction de la pluie et de l'ETP.

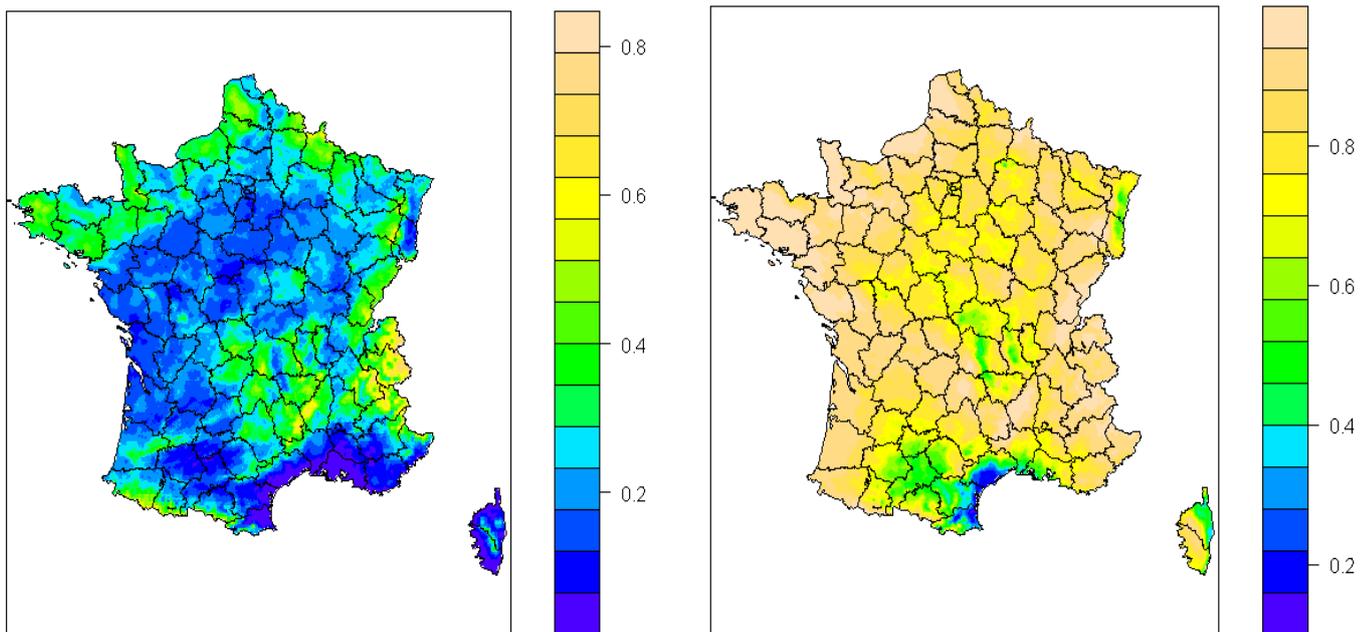


**Figure 19.** Exemple de l'évolution de l'indice SAJ pour un pixel donné.



**Figure 20.** Exemple de l'évolution de la pluie et de l'ETP.

A titre d'exemple, la figure suivante présente les grilles d'indice SAJ obtenues pour deux dates différentes, l'une en période sèche, l'autre en période humide.

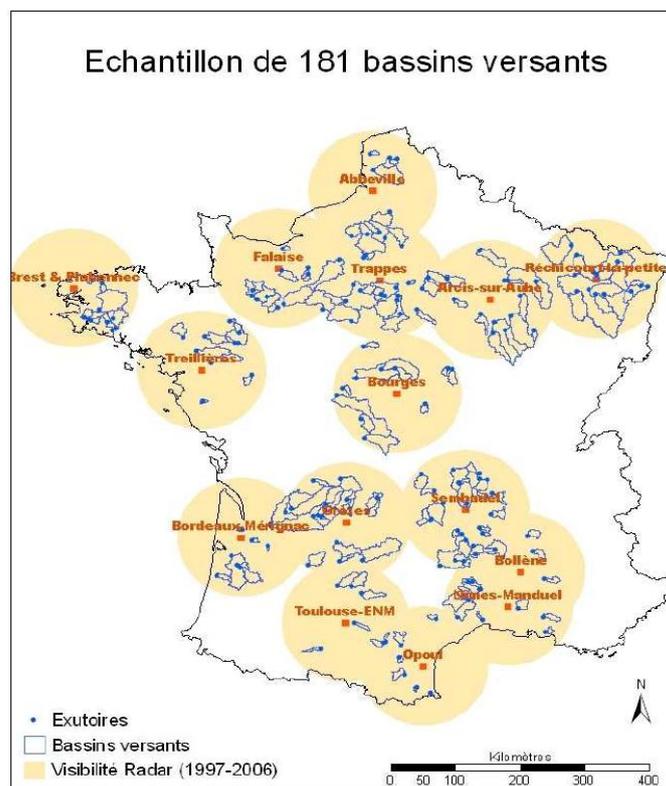


**Figure 21.** Exemples des cartes de indice SAJ (a : 26/07/1998- période sèche, b:17/12/2000- période humide).

### 3.3. *Constitution d'un jeu d'événements par bassin versant*

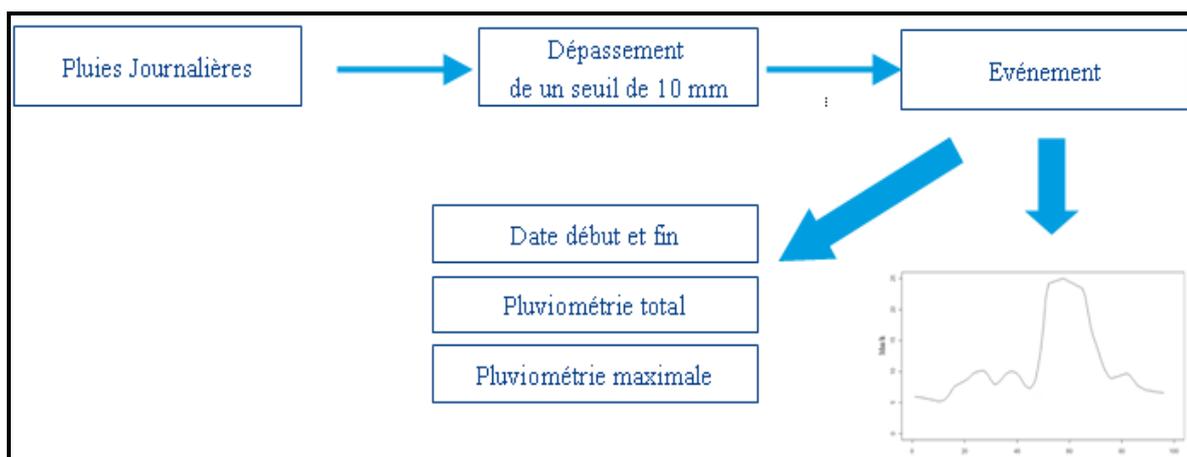
La dernière étape avant le lancement des calculs de modélisation est la définition des bassins versants et des événements que l'on souhaite modéliser pour chacun d'eux.

La sélection des bassins versants a été réalisée lors d'un travail antérieur par Florent Lobligeois, dans le cadre de sa thèse. Les bassins ont été choisis en fonction de la disponibilité des données débitmétriques sur la période d'étude (1997-2006), ainsi que de leur distance aux radars opérationnels. Une distance de 100 km a été choisie pour garantir une bonne visibilité. Au final, 181 bassins ont été retenus, représentés sur la figure suivante. Leurs surfaces sont comprises entre 16 km<sup>2</sup> et 3758 km<sup>2</sup>.



**Figure 22.** Les 181 bassins versants sélectionnés pour l'application de ce projet (Lobligeois, 2011).

Ensuite, pour chaque bassin, un jeu d'événement a été constitué sur la base d'un seuil de pluie uniquement. Ce seuil a été fixé à 10 mm par jour, pour se rapprocher au maximum du fonctionnement opérationnel du modèle. Au final, 3305 événements pluie-débit ont été constitués sur une période de données de 10 ans.



**Figure 23.** Schéma de définition de création d'un événement.

Ultérieurement, pour l'analyse des résultats, deux sous périodes vont être considérées : 1997-2001 et 2002-2006. En conséquence, les critères de Nash seront calculés pour chaque sous-période, afin de rendre les résultats comparables.

#### 4. Le modèle actuel : Règle Sud-est

La première application du modèle a été de le tester sur notre jeu de donnée France entière sans toucher au paramétrage développé sur la zone Sud-Est. Ces paramètres sont décrits dans la partie méthodologie. En particulier, la règle d'initialisation du réservoir de production a été définie de la manière suivante :

$$S_o/A = 0.52 SAJ + 0.38 Sstat - 0.17$$

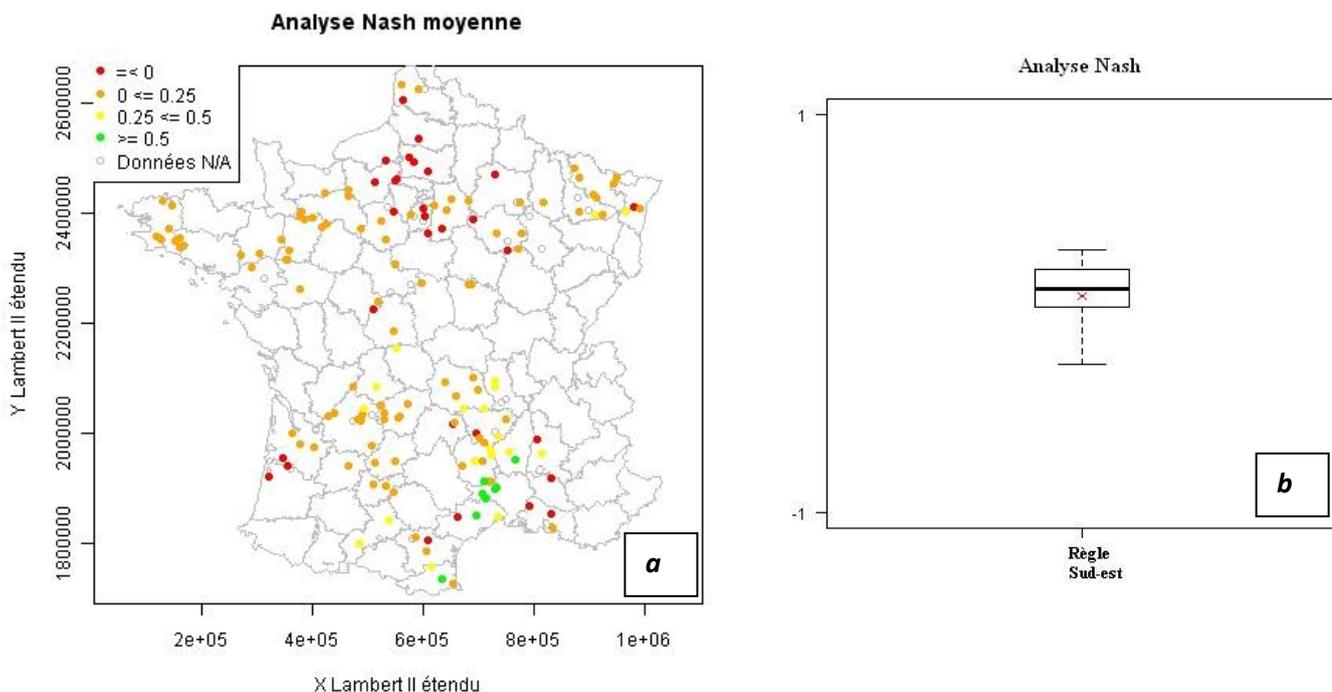
Avec

SAJ : l'indice d'humidité du modèle journalier continu la veille de la crue ;

Sstat : paramètre statistique régionalisé dans le cadre de la méthode SHYREG de prédétermination des quantiles de crue.

##### 4.1. Analyse de performance de l'initialisation régionale « Règle Sud-est »

La figure 24-a présente la répartition spatiale des valeurs du critère Nash obtenu sur les 181 bassins traités. Les points colorés sont les exutoires de ces bassins versant. La figure 24-b représente la distribution des critères, avec les quantiles 5%, 25%, 50%, 75% et 95%.



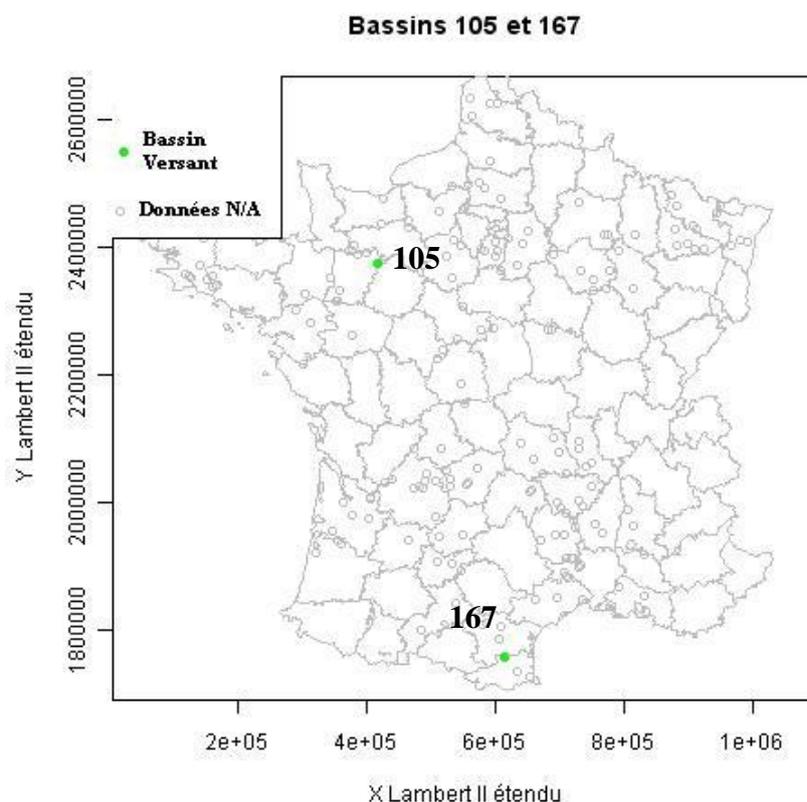
**Figure 24.** Graphiques de l'analyse de performance à partir du critère de Nash (*a* : résultats cartographiques, *b* : box plot des résultats).

La majorité des valeurs de critère de Nash se situent entre 0 et 0,25. Les meilleurs résultats sont obtenus dans le sud de la France, avec des valeurs supérieures à 0,5. Les moins bons résultats s'observent dans la partie Nord, en particulier dans le bassin parisien, avec des valeurs majoritairement inférieures à zéro. Ces résultats sont logiques, puisque le modèle a été appliqué avec une règle d'initialisée développée pour l'application au sud de la France.

Les valeurs de critère de Nash sont cependant faibles dans l'ensemble. Cela s'explique par le fait que le modèle n'est pas calé localement afin de fonctionner sur des bassins « non-jaugés ».

#### 4.2. Analyse sur deux exemples

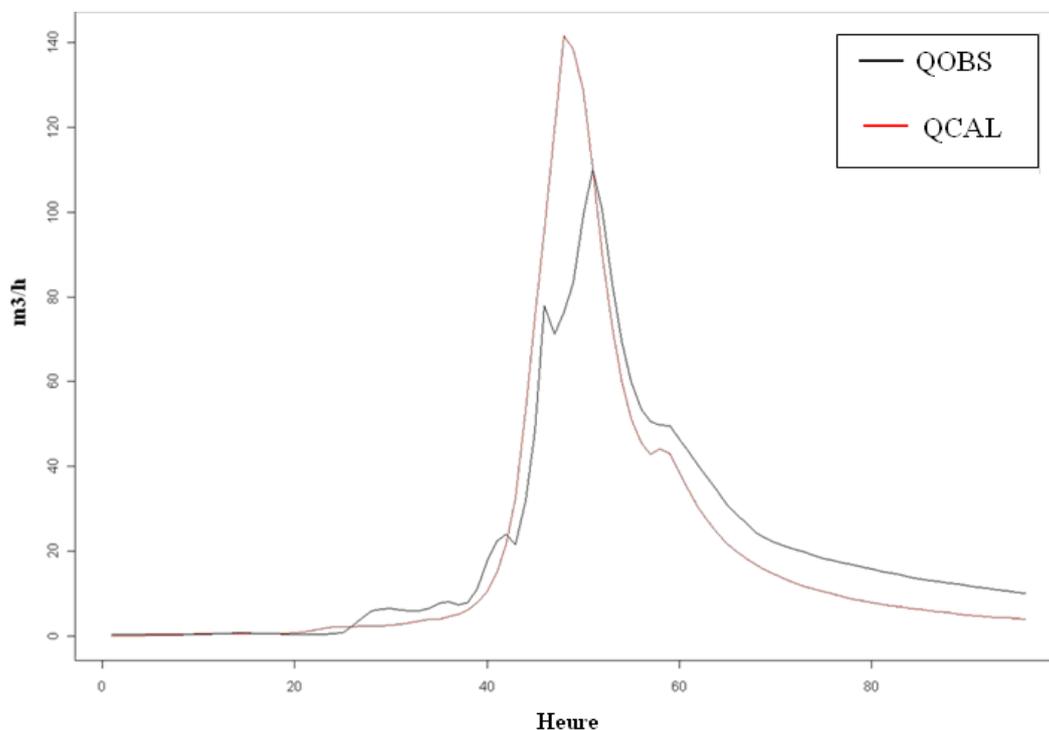
Pour pouvoir comprendre ces résultats, une analyse détaillée a été effectuée en comparant les hydrogrammes calculés et observés. A titre d'illustration, nous présentons ici des hydrogrammes pour deux bassins, l'un situé dans le nord de la France, Le Merdereau à Saint-Paul-le-Gaultier (surface= 118 km<sup>2</sup>), l'autre dans le sud, L\_Agly à Saint-Paul-de-Fenouillet (surface= 216 km<sup>2</sup>). Les valeurs de critère de Nash obtenues précédemment étaient respectivement de 0,11 et 0,40.



**Figure 25.** Représentation cartographique des bassins 105 (*Le Merdereau à Saint-Paul-le-Gaultier*) et 167 (*L\_Agly à Saint-Paul-de-Fenouillet*).

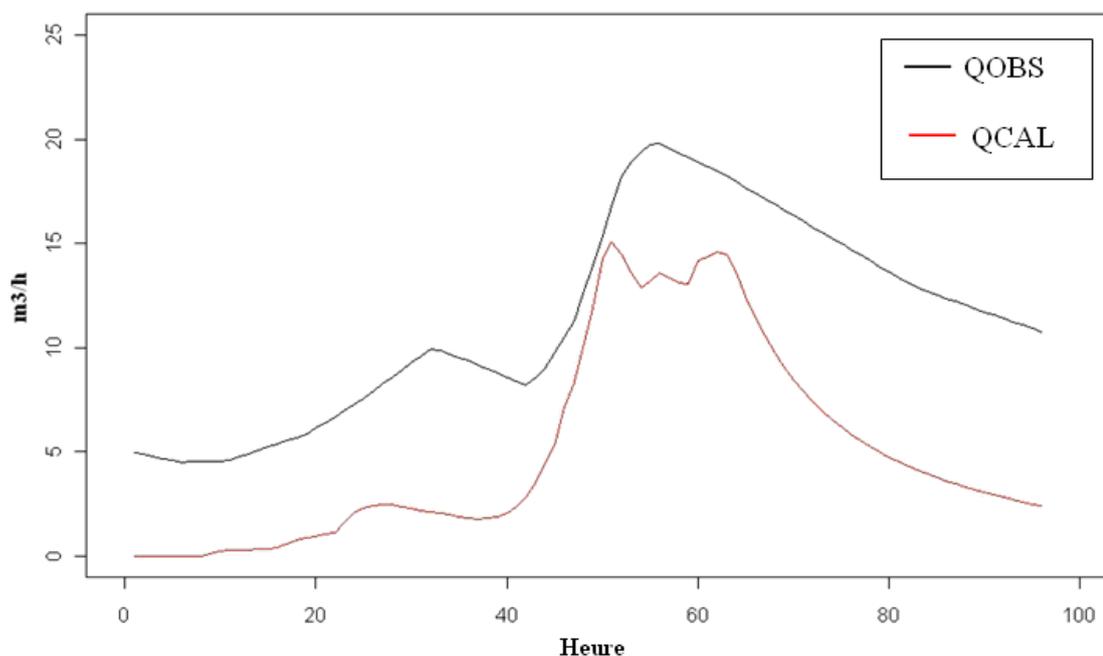
Les figures 26 et 27 montrent des exemples d'hydrogrammes obtenus pour ces deux bassins.

#### Hydrogramme de l'événement 1643 du bassin versant 167



**Figure 26.** Hydrogramme représentant l'événement 1643 du bassin versant 167 (*Bassin versant : L\_Agly à Saint-Paul-de-Fenouillet*).

#### Hydrogramme de l'événement 497 du bassin versant 105



**Figure 27.** Hydrogramme représentant l'événement 497 du bassin versant 105 (*Bassin versant : Le Merdereau à Saint-Paul-le-Gaultier*).

Nous observons que pour L\_Agly à Saint-Paul-de-Fenouillet, les hydrogrammes sont correctement reproduits, alors que pour Le Merdereau à Saint-Paul-le-Gaultier, les débits sont toujours sous-estimés. La principale cause est liée au fait qu'à partir de ces paramètres, le modèle n'est pas capable de produire un débit de base en début de crue. En effet, l'initialisation du réservoir de routage  $B_0/B=0,3$  (voir partie méthodologie) conduit forcément à démarrer les crues à un débit quasi nul. C'est ce que nous constatons sur les deux hydrogrammes présentés précédemment.

## 5. Tests pour identifier les améliorations possibles

### 5.1. Objectif des tests

Afin d'identifier les améliorations possibles du modèle, deux tests ont été réalisés.

Le premier test a pour but de voir l'amélioration du modèle en considérant une estimation correcte du débit de base avant la crue. Nous nous sommes donc autorisés à utiliser le débit observé au premier pas de temps de la crue.

Un second test a également été réalisé. Il a pour but de voir l'amélioration du modèle en connaissant avec une meilleure précision la règle d'initialisation à appliquer pour le réservoir de production. Dans ce cas, nous avons utilisé les débits observés pour caler localement une règle d'initialisation, au lieu d'appliquer la règle sud-est comme précédemment.

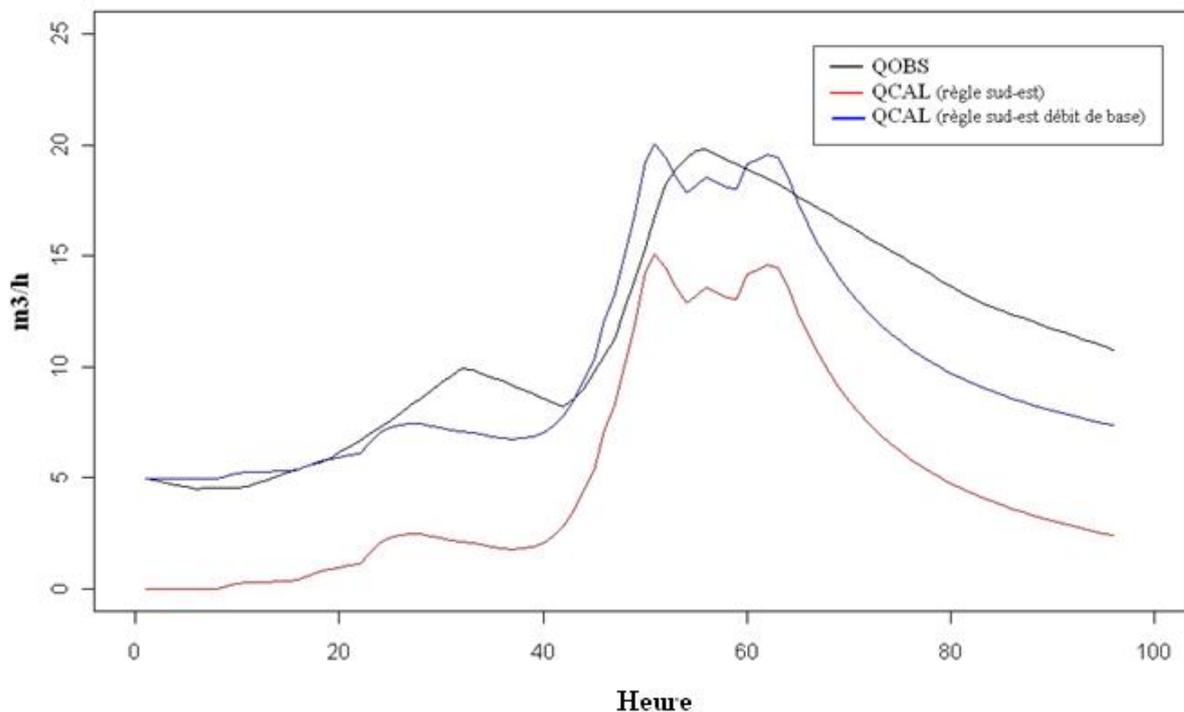
Il est à noter que ces tests ne sont pas utilisables en mode opérationnel, dû au fait que dans les deux cas, nous avons utilisé des débits observés. Le but de ces tests est plutôt d'identifier dans chacun des deux cas, la marge de progression du modèle.

### 5.2. Test avec un débit de base

Afin d'estimer l'impact du débit de base sur les résultats, nous avons simplement utilisé le premier débit observé pour translater l'hydrogramme calculé de cette valeur.

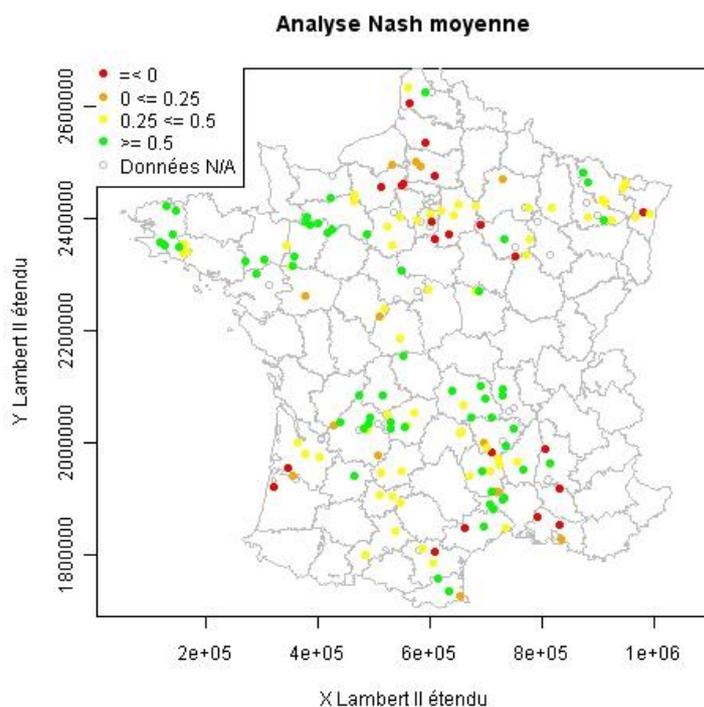
A titre d'illustration, nous présentons le même exemple que précédemment, à savoir Le Merdereau à Saint-Paul-le-Gaultier). Dans ce cas, les résultats sont nettement améliorés, puisque sur l'ensemble des crues de ce bassin, nous passons d'un critère de Nash de 0,11 sans le débit de base à 0,71 lorsque nous se donnant cette information.

### Hydrogramme de l'événement 497 du bassin versant 105



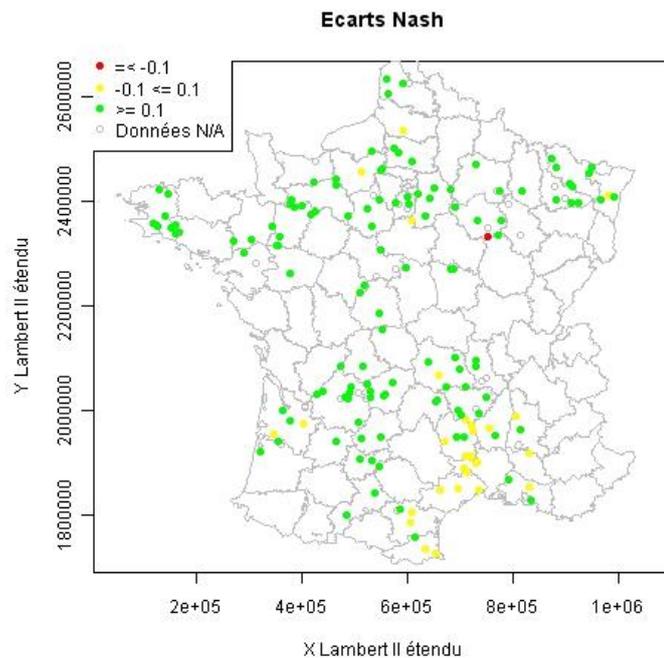
**Figure 28.** Hydrogramme représentant l'événement 497 du bassin versant 15 en considérant la règle sud-est avec un débit de base comme la règle d'initialisation (*Bassin versant : Le Merdereau à Saint-Paul-le-Gaultier*).

La figure 29 présente les résultats obtenus pour les 181 bassins.

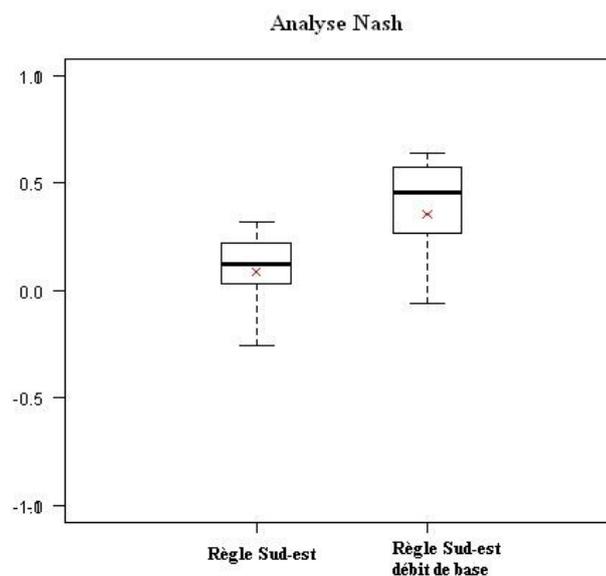


**Figure 29.** Graphique d'analyse de performance en considérant comme critère le Nash.

La figure 30 montre l'amélioration par rapport au même modèle, sans utiliser l'information « débit de base ». Pour cela, nous cartographions la différence entre les critères de Nash. Si la différence est comprise entre -0.1 et +0.1, nous considérons que les résultats sont équivalents (points jaunes). Si elle est inférieure à -0.1, nous estimons que les résultats sont dégradés (point rouges), si elle est supérieure les résultats sont améliorés (points verts). La figure 31 compare quant à elle les deux distributions de critères de Nash.



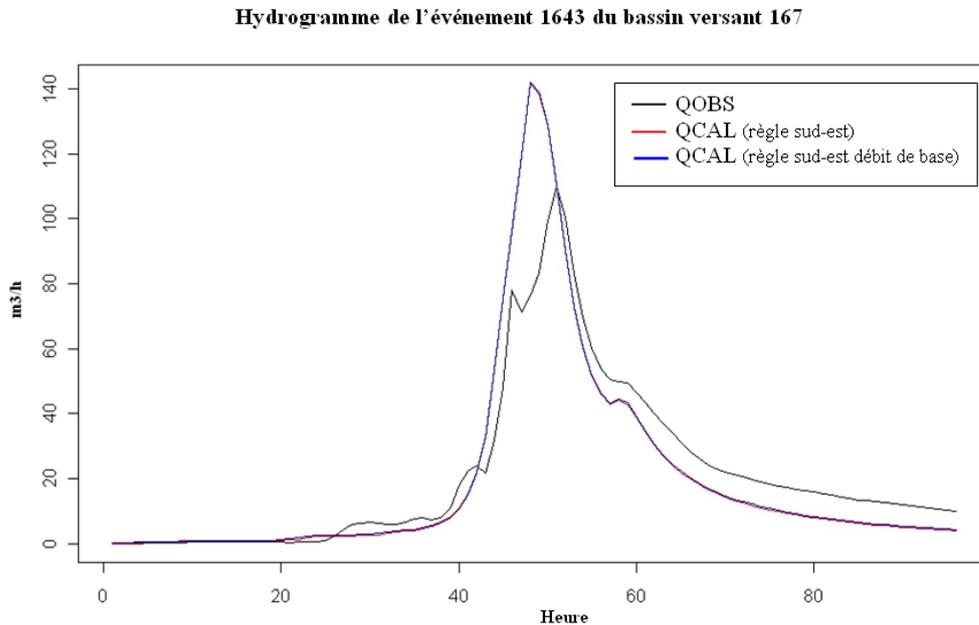
**Figure 30.** Différence des valeurs de Nash entre le modèle initial (règle sud-est) et l'ajout d'un débit de base.



**Figure 31.** Comparaison des distributions des critères de Nash entre le modèle initial (règle sud-est) et l'ajout d'un débit de base.

Nous avons vérifié dans l'ensemble un très net gain en termes de critère de Nash.

La zone sud se distingue, avec un gain dérisoire (différence comprise entre + ou – 0,1). Cela s'explique par le fait que les débits de bases y sont négligeables devant les crues. Cette remarque était bien visible sur l'hydrogramme présenté figure 32.



**Figure 32.** Hydrogramme représentant l'événement 1643 du bassin versant 167 (*Bassin versant : L\_Agly a Saint-Paul-de-Fenouillet*).

### 5.3. *Optimisation du paramètre de production pour chaque bassin : règle calée localement*

#### 5.3.1. *Méthode*

Comme deuxième test, nous avons voulu savoir la part de l'erreur liée à la règle d'initialisation du réservoir de production, commune à tous les bassins. Nous avons donc repris le modèle initial (sans débit de base), mais avons calé localement une règle d'initialisation du type :

$$So/A = a_{ibv} \times SAJ$$

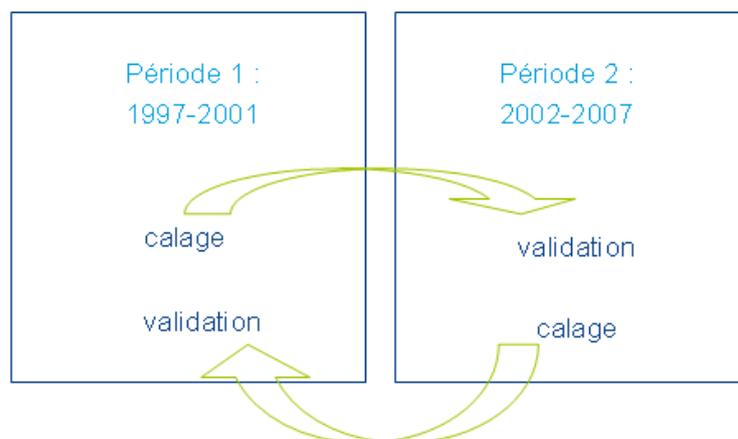
$a_{ibv}$ : paramètre calé pour le bassin numéro  $ibv$  ;

SAJ, l'indice d'humidité du modèle journalier continu la veille de la crue.

$a_{ibv}$  : est obtenu à l'aide d'un test de sensibilité : le coefficient le plus adapté pour chaque bassin versant a été sélectionné pour obtenir le meilleur critère de Nash possible.

Afin d'examiner la robustesse du modèle, une procédure de calage – contrôle (Klemes, 1986) a été réalisée sur l'ensemble de bassin versant considérant comme règle d'initialisation la

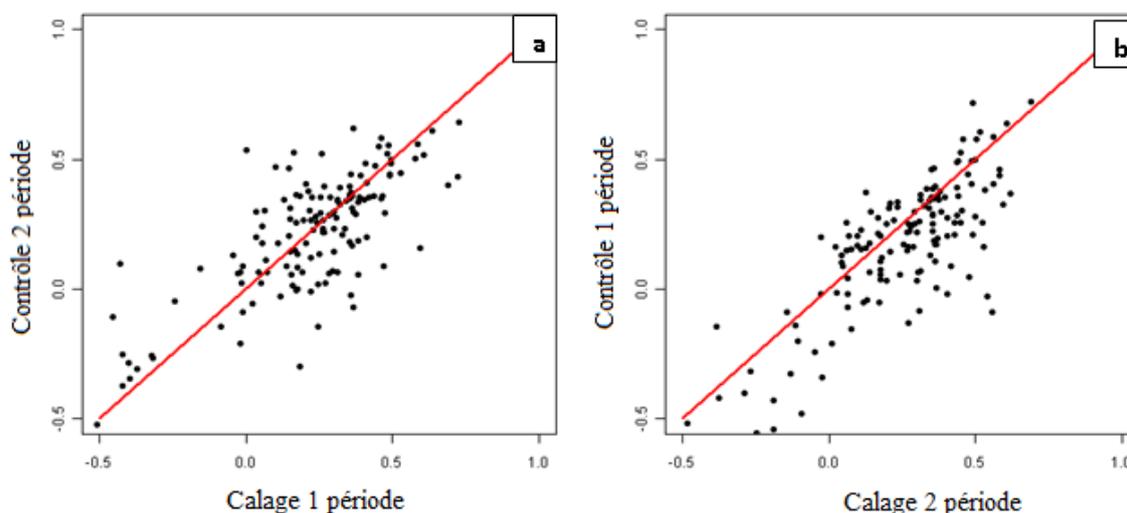
règle calée localement. Deux sous-périodes de cinq années ont été constituées : de 1997 à 2001 et une deuxième période de 2002 à 2007. Le modèle est calé sur une période puis analysé avec ce jeu de paramètre sur la deuxième période, période de validation (contrôle), et vice versa. La figure ci-dessous présente un schéma qui résume la méthode.



**Figure 33.** Schéma de la méthode de calage/contrôle.

### 5.3.2. Résultats

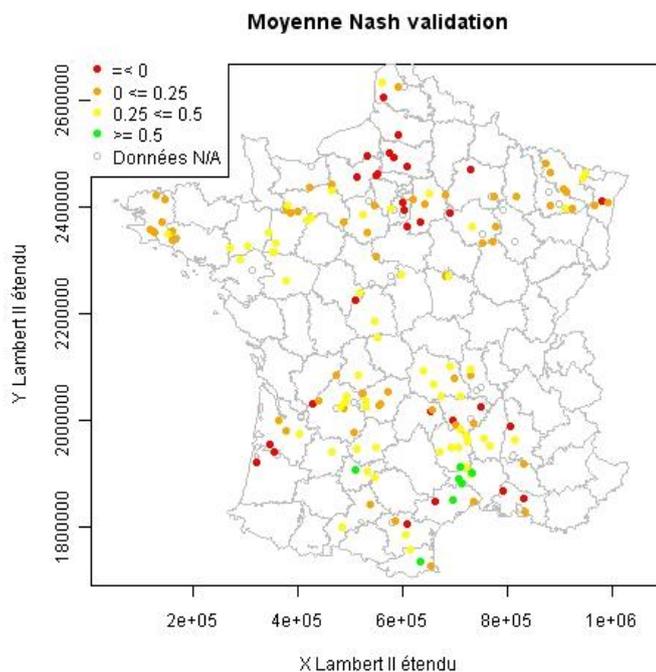
Pour évaluer la robustesse du modèle, des graphiques ont été créés en comparant les critères de Nash obtenus en calage sur une période, puis en contrôle sur l'autre période.



**Figure 34.** Comparaison des performances en calage et contrôle pour chaque sous période.

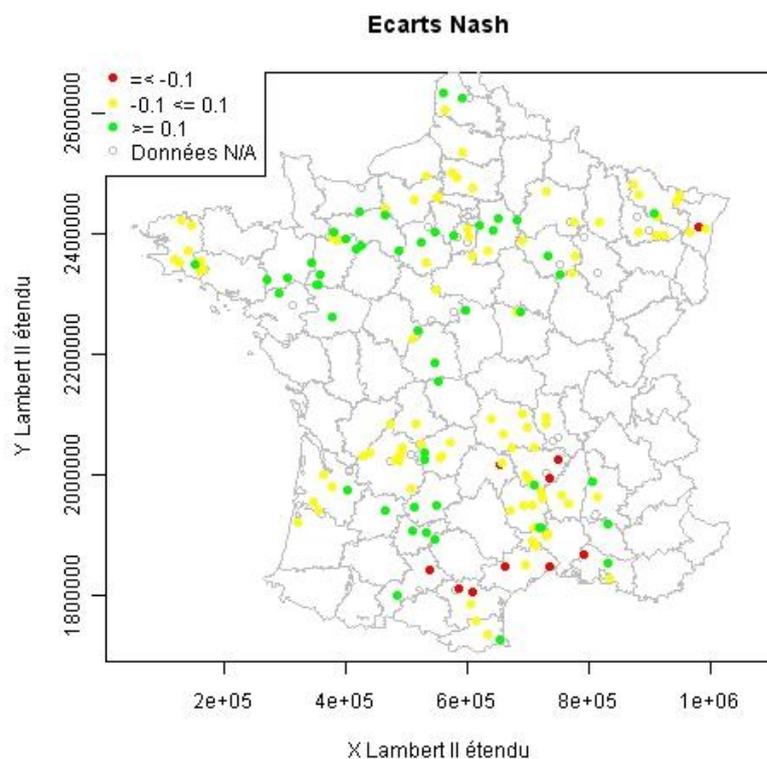
Logiquement, nous constatons une baisse entre les critères obtenus en calage et en validation (points en majorité sous la première bissectrice). Dans certains cas, les critères sont meilleurs en contrôle. Cela est dû au fait qu'ils ne sont pas calculés sur la même période. Dans l'ensemble des bassins versants nous remarquons que le modèle est robuste, les valeurs du coefficient  $a_{ibv}$  ont été similaires en comparant les deux périodes.

La figure 35 représente la cartographie des performances. Les résultats sont présentés ici en contrôle, dû le fait que celles au calage sont moins révélatrices de la réelle capacité de simulation. Pour cela, nous représentons la moyenne des critères de Nash obtenus en contrôle, sur les deux périodes.

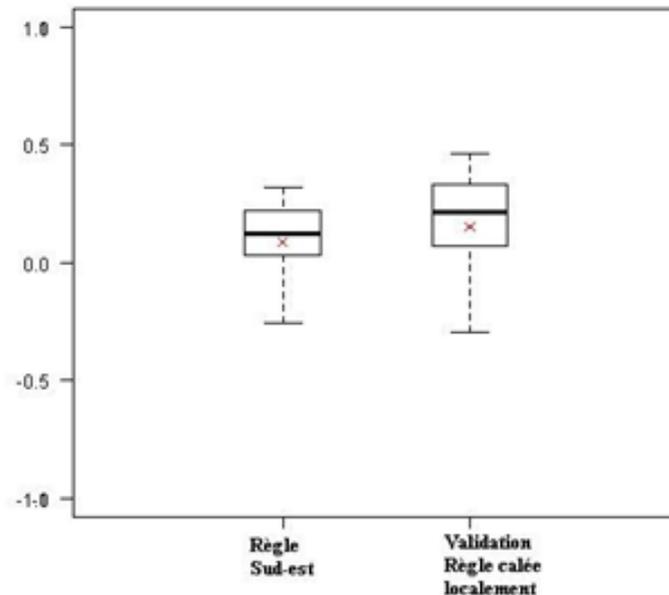


**Figure 35.** Graphique d'analyse de performance en considérant comme critère le Nash (règle calée localement).

Afin de comparer les performances au modèle initial (avec la règle sud-est), nous présentons également un carte des différences des Nash obtenus, figure 36. Comme précédemment, les points rouges signifient que les résultats sont dégradés, les points jaunes qu'ils sont équivalents, et les points verts qu'ils sont améliorés.



**Figure 36.** Différence des valeurs de Nash entre le modèle initial (règle sud-est) et en optimisant localement un règle d'initialisation.



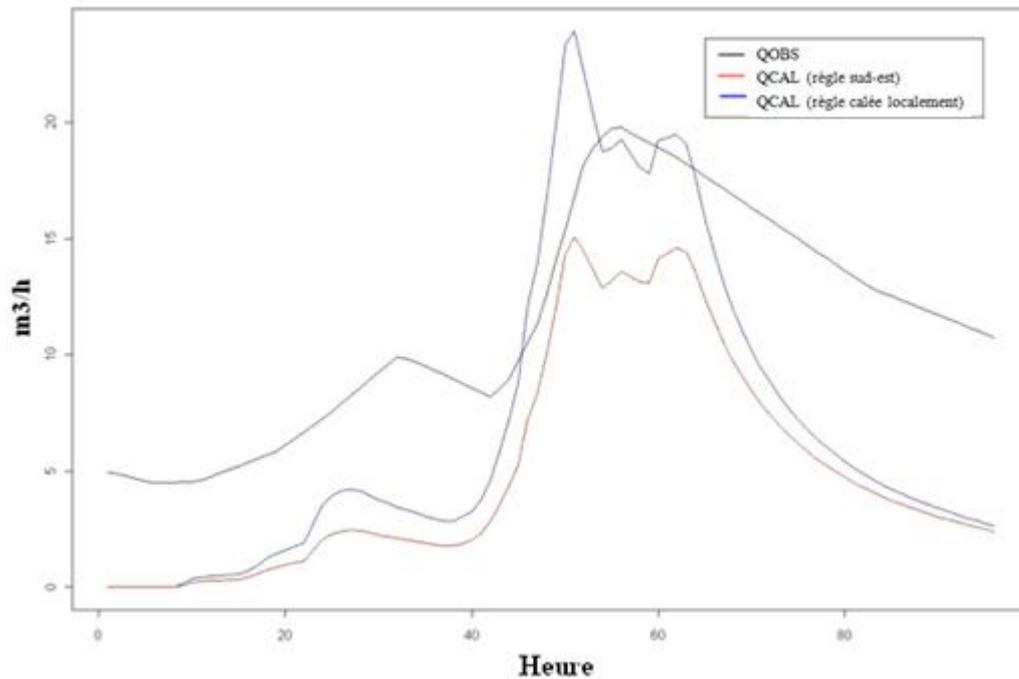
**Figure 37.** Comparaison des distributions des valeurs de Nash entre le modèle initial (règle sud-est) et en optimisant localement un règle d'initialisation.

Globalement il y a une amélioration des résultats par rapport au modèle initial. Cependant, l'amélioration est modeste et pour certains bassins du sud, il y a même une dégradation.

La figure 38 montre pour le même exemple que précédemment, Le Merdereau à Saint-Paul-le-Gaultier, un hydrogramme observé ainsi que les débits calculés avec le modèle initial (règle sud-

est), et la règle optimisée. Nous constatons que ces derniers sont effectivement plus proches des débits observés. Cependant, l'amélioration est limitée par le fait que le débit de base n'est pas pris en compte. En partant d'un débit nul, il est impossible de reproduire correctement toute la crue.

Hydrogramme de l'événement 497 du bassin versant 105



**Figure 38.** Hydrogramme représentant l'événement 497 du bassin versant 15 (*Bassin versant : Le Merdereau a Saint-Paul-le-Gaultier*).

Comme nous avons noté, la règle optimisée entraîne parfois une dégradation des résultats sur certains bassins du sud. Cela montre que la règle utilisée ( $So/A = a_{ibv} \times SAJ$ ) n'est pas la meilleure. En effet, pour simplifier l'optimisation, nous avons choisi de ne faire varier qu'un seul paramètre :  $a_{ibv}$ . Il faudrait peut-être ajouter une constante, et tester une règle du type  $So/A = a_{ibv} \times SAJ + b$  pour gagner en souplesse.

## 6. Conclusion

Le but principal de ce stage était de réaliser une première application de la méthode AIGA à des bassins versants localisés en dehors de la région pour laquelle la méthode a été développée. L'idée était d'identifier les améliorations futures à apporter. Pour cela, nous avons tout d'abord mis au point un jeu de données de 181 bassins versants, en utilisant les pluies horaires de la ré-analyse de Météo- France (1997-2006) et les débits de la banque HYDRO.

Dans un premier temps, pour pouvoir initialiser AIGA, nous avons besoin de créer les données nécessaires (pluies journalières, humidité du sol) pour l'utilisation de la méthode sur toute la France à partir de la réanalyse des pluies. Ensuite, nous avons comparé, pour le Sud-est de la France, les données obtenues aux données d'entrée opérationnelles d'AIGA. Ces nouvelles données seront, désormais, utilisées par le groupe RHAX pour continuer l'optimisation et améliorer les performances du modèle.

En considérant les règles d'initialisation du modèle, nous avons conclu que la règle actuellement utilisée dans le sud de la France n'était pas adaptée pour la prévision de crues dans les bassins versants sélectionnés. Nous avons montré que cela était très pénalisant et empêchait la bonne reproduction des crues pour de nombreux bassins. Les débits calculés ont toujours été sous-estimés par rapport aux débits observés, comme nous avons montré en analysant le critère de Nash. Elle doit être adaptée et optimisée pour une utilisation plus large, sur le territoire français.

Pour améliorer la performance de cette méthode, des tests de règles d'initialisation ont été effectués. Les deux règles d'optimisation utilisées ont rendu des résultats plus satisfaisants que la règle actuelle. Les valeurs de l'analyse du critère de Nash ont été plus élevées, signifiant que les débits calculés sont plus proches des débits observés. En revanche, pour ces trois règles appliquées en région Parisienne nous n'avons pas eu des résultats significatifs. Cela peut être dû au fait que cette région est reconnue pour avoir une grande partie de son territoire imperméabilisée.

Parmi les deux règles d'optimisation, nous avons constaté que la règle sud-est qui prend en compte un débit de base a rendu de meilleurs résultats. Cela pourrait s'expliquer par la présence de bassins versants pour lesquels le débit de base est important.

Par ailleurs, la troisième règle ne fournit pas de résultats significatifs en comparaison des résultats de la deuxième règle. Cela peut-être dû au fait que les deux sous-périodes ne présentaient pas les mêmes caractéristiques. La première période apparaît plus humide que la deuxième période. Egalement, cela peut être en raison du calage qui a été effectué en considérant, comme variable, un seul paramètre : le taux de remplissage du réservoir A.

En analysant la robustesse du modèle, nous pouvons confirmer que la méthode, dans son ensemble est robuste. Des exceptions sont observées, mais celles-ci peuvent être liées à des bassins versants qui ont des caractéristiques hydrologiques difficiles à prendre en compte.

Afin de poursuivre l'amélioration des performances de cette méthode, il est conseillé d'optimiser la règle d'initialisation du réservoir de production. Il conviendrait également d'effectuer un deuxième calage en considérant plus d'un paramètre.

Il m'a été proposé de poursuivre ce travail dans le cadre d'une collaboration entre le Brésil et la France, dans lequel la méthodologie sera testée sur un sous bassin versant de la ville de São Paulo. Le but principal de ce travail est de continuer à développer l'analyse de robustesse de ce modèle.

## Références Bibliographiques

Accédé 15 avril 2012, depuis le site de: IRSTEA:

<http://comprendre.meteofrance.com/content/2010/5/23216-43.jpg>

Accédé le 10 juin 2012, depuis le site de: IRSTEA:

<http://www.vigicrues.gouv.fr/>

Accédé le 3 mai 2012, depuis le site de: IRSTEA:

HidroWeb (<http://hidroweb.ana.gov.br/>).

Accédé le 2 mai 2012, depuis le site de: IRSTEA :

<http://climanalyse.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliensp10a/chuesp.html>

Accédé le 5 juin 2012, depuis le site de: IRSTEA :

<http://noticias.pt.msn.com/Internacional/articulo.aspx?cp-documentid=155846944>

Accédé le 15 juin 2012, depuis le site de: IRSTEA :

Banque Hydro (<http://www.hydro.eaufrance.fr/>).

Accédé le 20 avril 2012, depuis le site de: IRSTEA :

SISMADEN (<http://www.dpi.inpe.br/sismaden>).

Ambroise B., *La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant - Processus, facteurs, modèles*. Edition H & G & A, Bucarest, 1999.

ANDRADE, J. P. M. *Système de prévision hydrométéorologique visant la prévision des alertes d'inondations dans les bassins versants urbains*. Thèse (master) - Ecole d'ingénieurs de São Carlos, Université de São Paulo, São Carlos – SP, 2006.

ANGELIS, C. F., MACHADO, L. A. T., MORALES, C.A., SILVA, S. A. A., HENRIQUES, C. R., NOGUEIRA, J. *Radars météorologiques*. DECEA – INPE/ CPTEC. 2005.

ARNAUD, P. *Simplification de gr3h pour la prédétermination des crues. Application sur des petits bassins versants*. Note interne.: 26 p, 2005.

BARROS, R. M., ESTEVES, R. L., MENDIONDO, E. M., WENDLAND, E. *Calcul de l'écoulement des événements critiques pour la cartographie des inondations du bassin versant Grégorio, São Carlos, SP*. In: Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Curitiba – PR, 2003.

BARROS, M. T. L. *Système d'alerte des crues de l'état de São Paulo*. REVISTA ÁGUA e ENERGIA, 1999.

BASTONE, V., DE LA TORRE, Y., GARNIER, CH. *Etude préliminaire de l'impact du changement climatique sur les risques naturels à la Réunion*. Rapport public. 2011.

BERTHET, L. *Prévision des crues à pas de temps fin : comment mieux assimiler l'information de débit dans un modèle Pluie - Débit*. Thèse de Doctorat, AgroParisTech/ENGREF, Paris.2010.

BERTHE, L., ANDRÉASSIAN, V., PERRIN, C., JAVELLE, P. *How crucial is it to account for the antecedent moisture conditions in flood forecasting? Comparison of event-based and continuous approaches on 178 catchments*. Hydrology and Earth System Sciences, 13(6), 819 831.2009.

CASTILHO, A.S. *Le système d'alerte contre les inondations du bassin versant Rio Doce*. Séminaire III de l'eau-Business, SMEA. Governador Valadares, 2002.

CNRH. *Plan national de ressources hydriques*. Pré-Conáguas. Brasilia- GO, 2010.

CPRM. *Système d'alerte des crues du bassin versant Rio Doce - Rapport technique du fonctionnement du système d'alerte* - de Décembre 2004 à Mars 2005. CPRM, Belo Horizonte, MG, 2005, 89p.

Conseil Régional Nord – Pas-de-Calais, DREAL, ADEME. *Climat, météo et santé*. 2011.

- CRICHTON, D. *The risk triangle*. In: Ingleton, J. (ed.) *Natural Disaster Management*. Tudor Rose Holdings Limited, Leicester, Inglaterra, pp.102-103. 1999.
- DEFRANCE, D. *Initialisation du modèle d'alerte de crue AIGA par un indice d'humidité. Rapport de master*. Aix-en-Provence, 2010
- DISS, S. *Apport de l'imagerie radar pour la connaissance spatio-temporelle des champs de pluie*. Utilisation pour une modélisation prédictive des crues. Géosciences et Ressources Naturelles. Paris, Pierre et Marie Curie: 255, 2009.
- DURAND, Y., E. Brun, L. MÉRINDOL, G. GUYOMARCH, B. LESAFFRE, and E. MARTIN. *A meteorological estimation of relevant parameters for snow models*. *Ann. Glaciol.*, 18, 65–71, 1993.
- FOLHA DE SÃO PAULO. *Defesa civil do Rio ignorou os alertas de chuva forte*. 2011
- EDJATNO, MICHEL, C (1989). *Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres*. *La houille blanche*(2): 113-121, 1989.
- FABRET, C. *Annonce des crues du bassin de la Vézère. Calcul des débits à partir des précipitations*. Bilan hydrologique. Conférence donnée à la 3e session de recyclage en hydrologie, 1968.
- FOUCHIER, C. *Développement d'une méthodologie pour la connaissance régionale du risque de crue* *Géosciences - Sciences de l'eau dans l'environnement continental*. Montpellier, Université de Montpellier 2, **2010**.
- FORMIGUÉ, P., LAVABRE, J. *Flood forecasting with the GR3J conceptual rainfall-runoff model. Adaptability to rainfall uncertainties*. *Journal of Water Science*, 18(1), 87-102, 2005.
- IBGE – Institut de Géographie et Statistique. *Direction de recherches, coordination de population et indicateurs sociales*. Recherche National d'Assainissement. Basique. Atlas d'assainissement. 2005.
- IFEN. *Observation des enjeux, Estimation des populations et des logements en zone inondable*, Janvier 2008.
- JAVELLE P. *Initialisation d'AIGA2. Mise au point d'une règle d'initialisation à partir d'un indice journalier calculé en continu*, CEMAGREF: 37 p, 2009.
- JAVELLE, P., FOUCHIER, C., ARNAUD, P. & LAVABRE, J. *Flash flood warning at ungauged locations using radar rainfall and antecedent soil moisture estimations*. *J. Hydrol.* **394**(1-2), 267-274, 2010.
- KLEMES, V. *Operational testing of hydrological simulation models*. *Hydrological Sciences Journal/Journal des Sciences Hydrologiques* 31 (1), 13– 24, 1986.
- KOSKI, V., SKROPPA, T., PAULE, L., WOLF, H., TUROK, J., 1997. *Technical guidelines for genetic conservation of Norway spruce*. EUFORGEN Technical Guidelines, IPGRI, 1997.
- KRON, W. *Flood Catastrophes: causes, losses and prevention an international re-insure's viewpoint*. In: *International Workshop on Precautionary Flood Protection in Europe*, Bonn, Allemagne. 2003.
- KRZYSZTOFOWICZ, R; DAVID, D. *A methodology for evaluation of flood forecast-response systems, 1, Analyses and Concepts*. *Water Resources Research*, v.19, pp. 1423-1429. 1983.
- LOBLIGEOIS, F. *Utilisation des données radar de précipitation pour la prévision des crues*. Rapport Préliminaire, 2011.
- Loi 9.433. *Politique nationale sur les ressources en eau*. Brasília: Ministère des Ressources Hydriques. Le ministère de l'Environnement des Ressources Hydriques et juridique Amazon, 1997.
- MCHADO, S.,E. *Comparação de aspectos institucionais na gestão de recursos hídricos em alguns países europeus e sua implicação para a gestão da bacia do Alto Iguaçu*. RBRH, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. V.3. 1998.

- MACHADO, S., J., C. *La gestion des ressources hydriques: description et analyse des principes juridiques*. RBRH, Revista Brasileira de Recursos Hídricos. V.8. 2003.
- MAHESHWARI, B. L. *Interrelations among physical and hydraulic parameters of non-cracking soils*. Journal of Agricultural Engineering Research, v.68, p.297-309, 1997.
- MAGALHÃES, A. P. La situation de la surveillance des eaux au Brésil. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.5, 2000.
- MATHEVET, T., MICHEL, C., ANDRÉASSIAN, V. et PERRIN, C. *A bounded version of the Nash-Sutcliffe criterion for better model assessment on large sets of basins*. IAHS-AISH Publication, n° 307, 211-219, 2006.
- MARENGO, J.A., HASTENRATH, S. *Case Studies of Extreme Climatic Events in the Amazon Basin*. Journal of Climate 6, 617-627, 1993.
- MARTIN, C. *Les inondations du 15 juin 2010 dans le Centre Var : Réflexion sur un épisode exceptionnel*. Études de Géographie Physique, p. 41-76, 2010.
- MENDIONDO, E.M. *An overview on urban flood risk management*. Revista Minerva, v.2, n.2, p. 131-144, 2005.
- METEO-FRANCE. *Hauteurs moyennes annuelles de précipitations*. Accédé le 2 mai 2012, depuis le site de IRSTEA: [http://pluiesextremes.meteo.fr/hauteurs-moyennes-annuelles-de-precipitations\\_r213.html](http://pluiesextremes.meteo.fr/hauteurs-moyennes-annuelles-de-precipitations_r213.html)
- NASH, J. E., SUTCLIFFE, J. V. *River flow forecasting through conceptual models. Part 1 - A discussion of principles*. Journal of Hydrology, vol 10, n° 3, 282-290, 1970.
- NOILHAN, J., MAHLOUF, J F. *The ISBA land surface parameterisation scheme*. Global and Planetary Change, vol.13, no.1-4, 145-159, Jun 1996.
- LOUDIN L., HERVIEU F., MICHEL C., PERRIN C., ANDRÉASSIAN V., ANCTIL, F. et LOUMAGNE, C. *Which potential evapotranspiration input for a rainfall-runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient PE model for rainfall-runoff modelling*. Journal of Hydrology, 303(1-4): 290-306, 2005.
- PARENT DU CHATELET, J. *Aramis, le réseau français de radars pour la surveillance des précipitations*. La météorologie **40**: 9. 2003.
- PAYRAUDEAU, S. *Modélisation distribuée des flux d'azote sur des petits bassins versants méditerranéens*. Thèse, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts de Montpellier. 2002.
- PEREIRA FILHO, A. J., MASSAMBANI, O., SANTOS, P.M. Radar météorologique MXPOL. Anais do XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, São Paulo, 2008.
- QUEIROZ, A. P. *La surveillance immédiate et la prévision des tempêtes en utilisant des données radar*. INPE. Mémoire (Master en météorologie) - Institut national de recherche spatiale, São José dos Campos, 2008.
- RIBEIRO, C.A.G., MENDIONDO, E. M. *Sinaleira Ambiental como estratégia de gestão de inundações – Estudo de caso na população da micro-bacia do Gregório, São Carlos, SP (Brasil)*. Jornadas Internacionales sobre Gestión del Riesgo de Inundaciones y Deslizamientos de Laderas. Brasil, 2007.
- SCHAPI, Manuel *utilisateur prévisionniste du logiciel SOPHIE*. Historique de l'application SOPHIE. 2008.
- SÉNAT FÉDÉRAL. *Enquête préliminaire de dommage contre les inondations*. Rapport technique, 2012.

SIOU, L. K. *Modélisation des crues de bassins karstiques par réseau de neurones. Cas du bassin du Lez (France)*. Université de Montpellier II, 2011.

STRAHLER, A. N. *Géographie physique*, 3<sup>a</sup> ed. Barcelona: Omega, 2000.

SZCZYPTA, C. Amélioration des outils de vigilance et de prévision des crues sur les bassins versants de l'Agly et du Réart (Pyrénées Orientales). Mémoire de fin d'études. 2008.

TANGARA, M. *Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global*. Thèse de Doctorat, EPHE, Paris, 374 pp.2005.

THIREL, G., MARTIN, E., MAHFOUF, J., F., MASSART, S., RICCI, S., REGIMBEAU, F., HABETS, F. *A past discharge assimilation system for ensemble streamflow forecasts over France – Part 2: Impact on the ensemble streamflow forecasts*, Hydrol. Earth Syst. Sci., 14, 1639-1653, doi:10.5194/hess-14-1639-2010, 2010

WMO- World Meteorological Organization. *Preventing and mitigation natural disasters: Working together for a safer world*. WMO No 993. ISBN 92-63-10993-1. 2006.

## Liste des figures

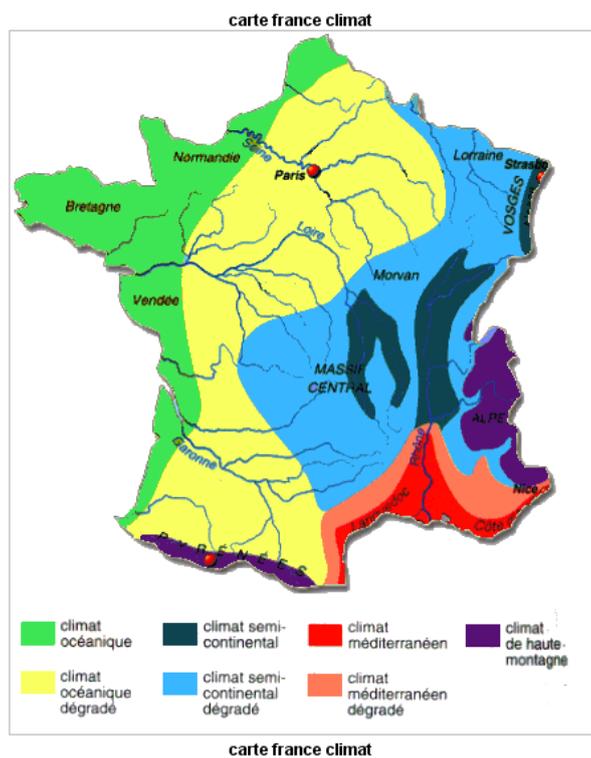
Figure 1. Exemples of daily rainfall maps (a: 11/02/1997, b: 20/10/2000).....	6
Figure 2. SAJ index example (17/12/2000- wet period).....	7
Figure 3. Hydrographic event example (event 497, watershed: Le Merdereau a Saint Paul le Gaultier). .....	7
Figure 4. Performance analysis for the three rules types. ....	8
Figure 2. Exemples of daily rainfall maps (a: 11/02/1997, b: 20/10/2000).....	9
Figure 2. SAJ index example (17/12/2000- wet period).....	9
Figure 3. Hydrographic event example (event 497, watershed: Le Merdereau a Saint Paul le Gaultier). .....	9
Figure 4. Performance analysis for the three rules types. ....	9
Figure 5. Schéma de réduction des impacts des inondations.....	13
Figure 6. Triangle du risque (Crichton, 1999).....	15
Figure 7. Protocole générale d'un système d'alerte d'inondation (Andrade, 2006). ....	16
Figure 9. Cumul annuel moyen des précipitations au Brésil en mm (source: INMET). ....	19
Figure 10. Gestion des ressources hydriques en France. ....	20
Figure 11. Les grands bassins versants du Brésil (CNRH, 2010).....	21
Figure 12. Les radars du réseau ARAMIS .....	24
Figure 13. Les radars existants au Brésil et les institutions responsables. Les cercles indiquent une zone de couverture d'un rayon de 250 km (source : Angelis et al, 2005).....	25
Figure 14. Schème des niveaux des alertes du système « Signaleur Environnemental » (Ribeiro et al., 2007). .....	29
Figure 15. Le système Sismaden ( <a href="http://www.dpi.inpe.br/sismaden/">http://www.dpi.inpe.br/sismaden/</a> ).....	30
Figure 16. Localisation de la région où la méthode AIGA est en opération.....	32
Figure 17. Schéma de fonctionnement du modèle hydrologique distribué GR (Javelle, 2009). ....	34
Figure 18. Exemples des cartes de pluies journalières (a : 11/02/1997, b:20/10/2000).....	37
Figure 19. Exemple de l'évolution de l'indice SAJ pour un pixel donné. ....	38
Figure 20. Exemple de l'évolution de la pluie et de l'ETP. ....	38
Figure 21. Exemples des cartes de indice SAJ (a : 26/07/1998- période sèche, b:17/12/2000- période humide).....	39
Figure 22. Les 181 bassins versants sélectionnées pour l'application de ce projet (Lobligeois, 2011). .....	40
Figure 23. Schéma de définition de création d'un événement.....	40

Figure 24. Graphiques de l'analyse de performance à partir du critère de Nash (a : résultats cartographies, b : box plot des résultats). .....	41
Figure 25. Représentation cartographique des bassins 105 (Le Merdereau à Saint-Paul-le-Gaultier) et 167 (L_Agly à Saint-Paul-de-Fenouillet). .....	42
Figure 26. Hydrogramme représentant l'événement 1643 du bassin versant 167 (Bassin versant : L_Agly à Saint-Paul-de-Fenouillet). .....	43
Figure 27. Hydrogramme représentant l'événement 497 du bassin versant 105 (Bassin versant : Le Merdereau a Saint-Paul-le-Gaultier). .....	43
Figure 28. Hydrogramme représentant l'événement 497 du bassin versant 15 en considérant la règle sud-est avec un débit de base comme la règle d'initialisation (Bassin versant : Le Merdereau à Saint-Paul-le-Gaultier). .....	45
Figure 29. Graphique d'analyse de performance en considérant comme critère le Nash. ....	45
Figure 30. Différence des valeurs de Nash entre le modèle initial (règle sud-est) et l'ajout d'un débit de base. ....	46
Figure 31. Comparaison des distributions des critères de Nash entre le modèle initial (règle sud-est) et l'ajout d'un débit de base. ....	46
Figure 32. Hydrogramme représentant l'événement 1643 du bassin versant 167 (Bassin versant : L_Agly a Saint-Paul-de-Fenouillet). .....	47
Figure 33. Schéma de la méthode de calage/contrôle. ....	48
Figure 34. Comparaison des performances en calage et contrôle pour chaque sous période. ....	48
Figure 35. Graphique d'analyse de performance en considérant comme critère le Nash (règle calée localement). ....	49
Figure 36. Différence des valeurs de Nash entre le modèle initial (règle sud-est) et en optimisant localement un règle d'initialisation. ....	50
Figure 37. Comparaison des distributions des valeurs de Nash entre le modèle initial (règle sud-est) et en optimisant localement un règle d'initialisation. ....	50
Figure 38. Hydrogramme représentant l'événement 497 du bassin versant 15 (Bassin versant : Le Merdereau a Saint-Paul-le-Gaultier). .....	51

## Annexes

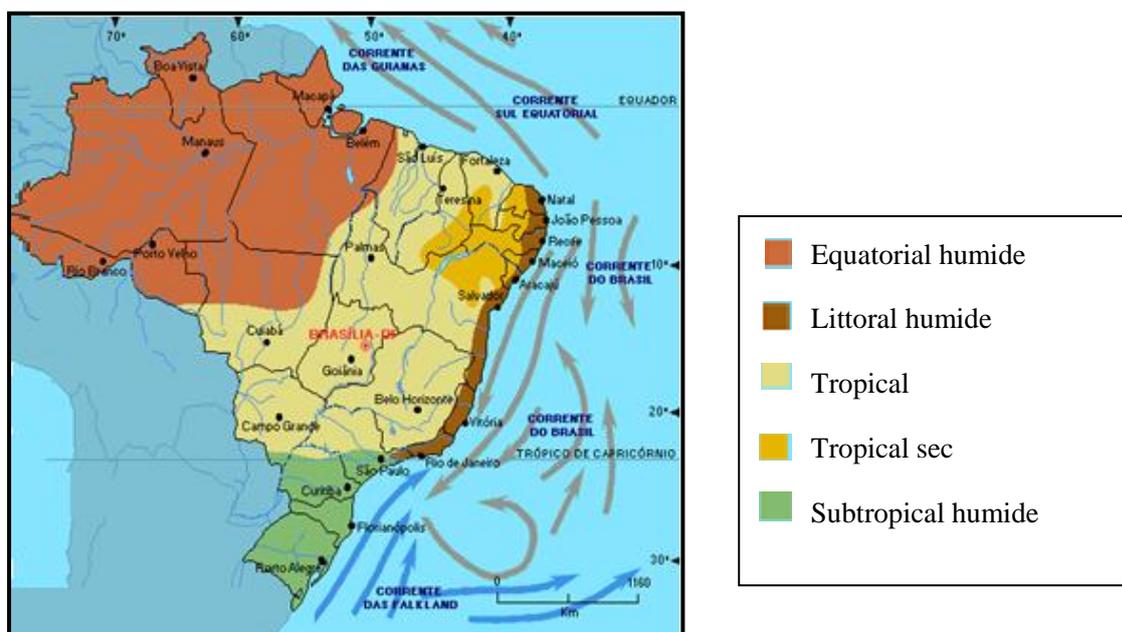
1.	<i>Les climats en France</i> .....	61
2.	<i>Les types de climats au Brésil</i> .....	61
3.	<i>Les 22 SPC en France</i> .....	62
4.	<i>Les stations pluviométriques en France</i> .....	62
5.	<i>Les stations pluviométriques au Brésil</i> .....	63
6.	<i>Modèle PQb</i> .....	63
7.	<i>Modèle GR3H</i> .....	64
8.	<i>Modèle GRP</i> .....	65
9.	<i>Modèle SIM</i> .....	66
10.	<i>AIGA</i> .....	67
11.	<i>Modèle MARINE (IMFT)</i> .....	67
12.	<i>Schéma du Système Sismaden</i> .....	68
13.	<i>La méthode SHYREG</i> .....	69

## 1. Les climats en France



(Source : <http://www.cartesfrance.fr/geographie/cartes-france-climat/carte-france-climat.html>).

## 2. Les types de climats au Brésil



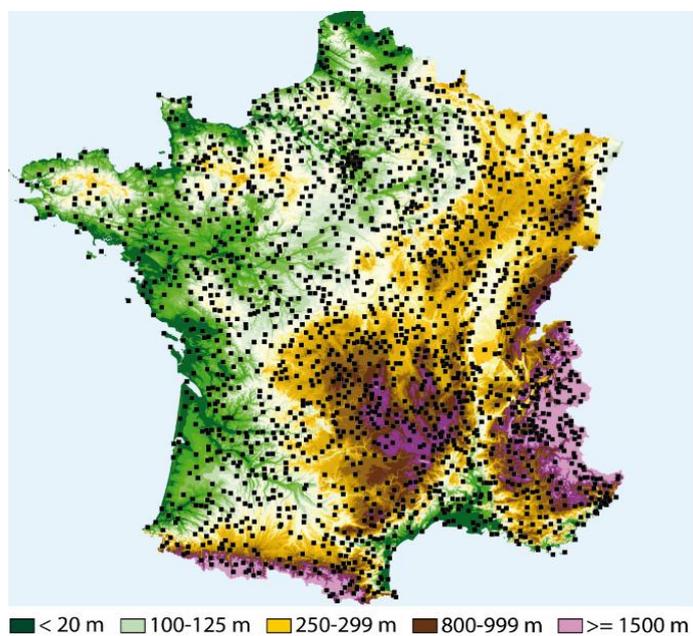
(Source : [http://www.portalbrasil.net/brasil\\_clima.htm](http://www.portalbrasil.net/brasil_clima.htm)).

### 3. Les 22 SPC en France



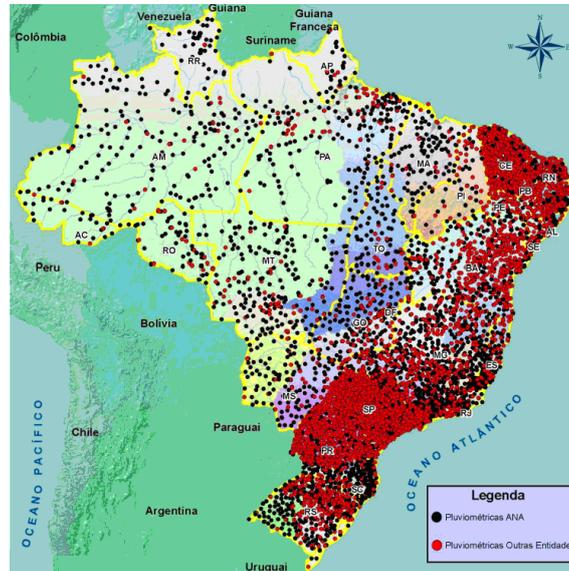
(Source : site internet <http://www.vigicrues.gouv.fr>).

### 4. Les stations pluviométriques en France



France (source : Météo-France, <http://cybergeographie.org/docannexe/image/23155/img-1.png>).

## 5. Les stations pluviométriques au Brésil



(Source : SAR/ANA, base de données HidroWeb).

## 6. Modèle PQb

Le PQb est un modèle de prévision pluie-débit initialement développé par la DIREN Midi Pyrénées (Fabret, 1968). Il relie les précipitations du bassin versant à son débit à l'exutoire à partir de l'équation suivante :

$$Q(t+L) = \frac{\alpha-1}{\alpha} \cdot Q(t) + \frac{S \cdot b}{\alpha \cdot L} \cdot \Pi$$

où,

$\alpha$  : est un coefficient de décrue (supérieur à 1) ;

L : est le délai de prévision souhaité ;

S : est la surface du bassin versant ;

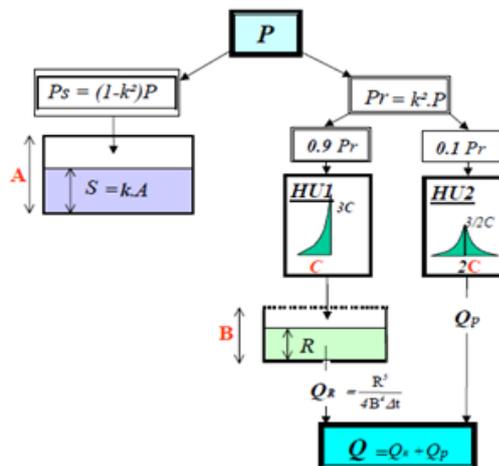
b : est le coefficient de réduction des pluies (rapport entre la pluie tombée et la pluie ruisselée). Sa valeur appartient à l'intervalle [0,1];

$\Pi$  : est le cumul de pluie tombée entre t-L et t.

## 7. Modèle GR3H

GR3H est un modèle événementiel développé à l'Irstea. Il établit un lien mathématique entre les variables d'entrée et de sortie du système, en simulant la transformation de la pluie en débit à partir de fonctions décrivant la production et le transfert. Il s'agit de (figure) :

- une fonction de production caractérisée par un réservoir décrit par un paramètre A (niveau maximal du « réservoir-sol » S). Cette fonction correspond à la transformation de pluie (P) brute en pluie nette (Pr). La différence (Ps) est stockée dans le réservoir S.
- une fonction de transfert définie par deux paramètres : B et C. B est la capacité maximale de transfert d'un réservoir sur un pas de temps donné et, C représente le temps de montée des hydrogrammes unitaires (HU). Cela est une transformation de la pluie (Pr) en débit (Q) à l'exutoire. Il y a un retard apporté par C et un étalement de temps occasionné par le réservoir de transfert R (stockage partielle).



**Figure.** Schéma de la structure du modèle GR3H (Formigué & Lavabre, 2005).

Par rapport aux niveaux des réservoirs en début des événements de crues :

- R : le niveau  $R_0$  est déduit de la valeur de  $Q_0$ .
- S : le niveau  $S_0$  est un paramètre calculé pour chaque événement. Il est basé sur des pluies antécédentes. Le taux de remplissage est, normalement, considéré comme le rapport  $S_0/A$ .

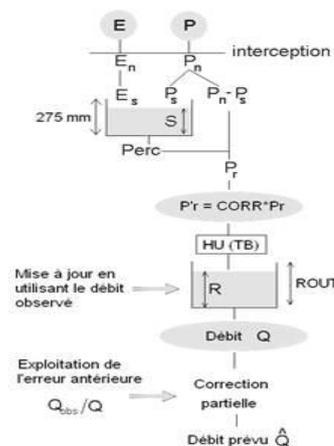
Pour utiliser ce modèle, il est nécessaire de caler ses paramètres à partir des simulations des événements de pluie-débit connus. Le calage est l'optimisation des paramètres considérés dans le modèle pour une fonction d'objectif donnée (par exemple, la minimisation des écarts entre le débit observé et simulé).

## 8. Modèle GRP

Le modèle GRP est un modèle pluie-débit de fonctionnement en continu. Il a été développé à l'Irstea par Tangara (2005), au pas de temps journalier, et Berthet (2010), au pas de temps horaire. Il s'agit de un système utilisé par les estimations des débits à court et à long terme. Des prévisions des débits à l'exutoire sont obtenues à partir des précipitations prévues sur les bassins versants considérés.

Le GRP est un modèle continu et global. Continu dû au fait qu'il se sert de l'historique pluviométrique pour créer les événements et pour déterminer les conditions initiales d'humidité du bassin. Il est global parce qu'il ne prend pas en compte l'hétérogénéité spatiale des caractéristiques et des précipitations du bassin.

Le modèle est basé sur une structure en réservoirs pour représenter les fonctions de production et transfert au sein du bassin versant. La structure du système modélisé (le bassin versant) est ainsi caractérisée par un réservoir de production pour le suivi des conditions d'humidité du bassin, une fonction d'ajustement de la pluie, un hydrogramme unitaire et un réservoir de routage (figure).



**Figure.** Schéma de fonctionnement du modèle GRP (Tangara, 2005).

D'abord la pluie est neutralisée par l'évapotranspiration ( $E_n$ ) et divisée en deux parties ( $P_n$ ) : remplissage du réservoir ( $P_s$ ) de production et écoulement ( $P_n - P_s$ ). La percolation du réservoir (Perc) participe, aussi, de l'écoulement. Le reliquat d' $E_n$  contribue à la vidange du réservoir ( $E_s$ ). L'eau écoulee est multipliée par le facteur d'ajustement CORR. Celui-ci permet de considérer les échanges d'eau avec les nappes et les bassins versants voisins. L'hydrogramme unitaire (TB) et le réservoir de routage assurent le transfert d'eau qui est décalé entre pluie et débit (Berthet, 2010).

## 9. Modèle SIM

La chaîne SAFRAN-ISBA-MODCOU (SIM) a été développée par le Centre National de Recherche Météorologique (CNRM) à Météo-France (Szczypta, 2008).

Cette méthode est basée sur SAFRAN (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à La Neige) qui utilise des observations et des modèles météorologiques pour calculer la quantité d'eau précipité, sous forme de neige et pluie (Durand *et al.*, 1993). Elle peut être appliquée pour tout le territoire français. Elle est exploitée en opérationnel pour fournir en temps réel des réserves d'eau du sol (Thirel *et al.*, 2010). Les résultats de cette analyse sont interpolés sur une résolution de 8x8 km<sup>2</sup>, à l'aide du modèle ISBA (Noilhan et Mahlouf, 1996). Dû le fait que modèle est du type distribué, une valeur moyenne est estimée pour le bassin versant, en se basant sur la pondération des valeurs correspondant aux pixels qui forment la région analysée.

## 10. AIGA

La méthode AIGA, acronyme d'Adaptation d'information Géographique pour l'Alerte de Crues, a été élaborée à l'Irstea en partenariat avec Météo-France. L'objectif de la méthode est de faciliter le calcul des prévisions des crues et de pouvoir donner des alertes à n'importe quel endroit d'un bassin versant (Fouchier, 2010). Pour son fonctionnement, elle a besoin des données de pluviométrie et de l'humidité des sols.

La pluie est transformée en débit à partir d'un modèle distribué. Une base de données de débits statistiques permet ensuite l'estimation du débit calculé. Les données statistiques sont obtenues à partir des cartographies, des données pluviométriques et des débits obtenus par la méthode SHYREG.

Le modèle hydrologique utilisé par AIGA est le GR3S : modèle basé sur la famille de modèles GR développés à l'Irstea, distribué, au pas de temps horaire et à 3 paramètres (Edijatno et Michel, 1989; Arnaud, 2005).

Le GR3S est constitué de deux réservoirs, un de production et l'autre de routage, reliés par des lois de transferts. Le pas de temps utilisé est horaire et le fonctionnement est événementiel. Les alertes aux crues sont fournies en trois catégories de couleur, à partir de la période de retour des aléas.

Période de retour	$2 < T < 10$ ans	$10 < T < 50$ ans	$T > 50$ ans
Niveau d'alerte	Jaune	Orange	Rouge

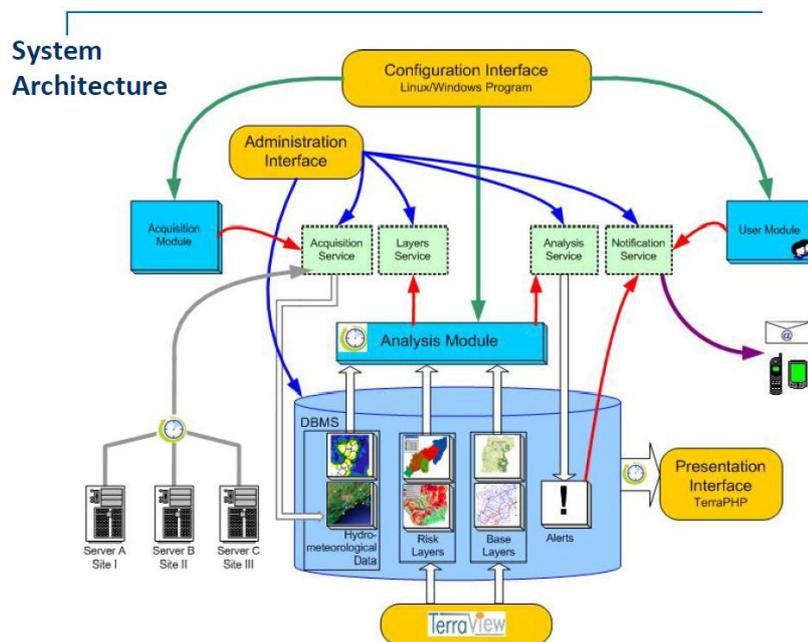
*Niveaux des alertes dans l'outil AIGA (Defrance, 2010).*

## 11. Modèle MARINE (IMFT)

MARINE (Modélisation de l'Anticipation du Ruissellement et des Inondations pour des Evénements Extrêmes) est un modèle hydrologique développé par l'équipe HydroEco de l'IMFT (l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse), depuis Estupina (2004). Il est un modèle hydrologique distribué à base physique et événementiel. Celui-ci réalise des prévisions de crues pour les petits bassins versants.

Pour réaliser la transformation de pluie en débit, le modèle a besoin des données de pluies hétérogènes et des comportements variés du bassin versant (Estupina et al, 2005).

## 12. Schéma du Système Sismaden



Source (<http://www.dpi.inpe.br/sismaden/>).

### 13. La méthode SHYREG

Pour définir les périodes de retours des débits, généralement, s'est basé sur les débits observés. Par contre cette méthodologie obtient divers imprécisions, la durée des observations n'est pas assez longue et, dû l'importance des stations de débits en continu, le nombre des bassins versants jaugés est faible (Lavabre, Fouchier et al. 2003).

Pour pouvoir améliorer ces données, les débits peuvent être estimés par les informations sur les pluies. La méthode SHYREG améliore l'estimation des débits à partir des informations sur les pluies. Elle est caractérisée par la régionalisation de la méthode SHYPRE - Simulation d'Hydrogramme pour la prédétermination des crues (Arnaud, Lavabre et al. 2006).

La méthodologie utilise un modèle stochastique, basé sur une description géométrique du signal temporel de pluie à l'échelle régionale, pour créer des pluies horaires. L'objectif est de constituer des longues chroniques de pluie horaire, ainsi, permettant gérer les temps de retour.

Les pluies générées sont transformées en débits à partir du modèle hydrologique GR3 (Javelle, 2009). Alors des quantiles sont connus pour chaque  $\text{km}^2$  de chaque bassin versant. La fonction de transfert statistique (FTS) permet de calculer les débits à l'échelle du bassin versant en tenant compte l'abattement des débits en fonction de la surface de chaque bassin. La formule dépend du niveau de remplissage initial  $S_0/A$  du réservoir A. Une valeur moyenne du  $S_0/A$  est optimisée pour diminuer l'écart entre les débits observés et les calculés.

Comme dernière étape, les valeurs de remplissage sont régionalisées obtenant une valeur pour chaque pixel et permettant le calcul des débits pour les bassins versants non jaugés.