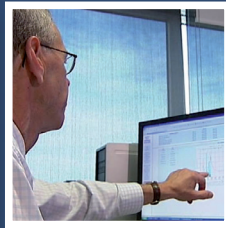
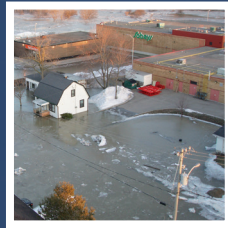


CADRE  
DE RÉFÉRENCE  
POUR LA GESTION  
DE LA QUALITÉ



# MANUEL SUR LA PRÉVISION ET L'ANNONCE DES CRUES



**Organisation  
météorologique  
mondiale**

Temps • Climat • Eau

OMM-N° 1072



# Manuel sur la prévision et l'annonce des crues

OMM-N° 1072

Édition 2011



**Organisation  
météorologique  
mondiale**  
Temps • Climat • Eau

### Remerciements

Cette traduction de la version anglaise du Manuel a été financée par la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) du Ministère français de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, avec le support scientifique du Service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations de la DGPR.

Caroline Wittwer a réalisé le contrôle technique de la traduction avec le concours de Céline de Saint-Aubin, pour la terminologie météorologique, et Fabrice Hébrard pour l'hydrométrie.

OMM-N° 1072

© Organisation météorologique mondiale, 2011

L'OMM se réserve le droit de publication en version imprimée ou électronique ou sous toute autre forme et dans n'importe quelle langue. De courts extraits des publications de l'OMM peuvent être reproduits sans autorisation, pour autant que la source complète soit clairement indiquée. La correspondance relative au contenu rédactionnel et les demandes de publication, reproduction ou traduction partielle ou totale de la présente publication doivent être adressées au:

Président du Comité des publications  
Organisation météorologique mondiale (OMM)  
7 bis, avenue de la Paix  
Case postale 2300  
CH-1211 Genève 2, Suisse

Tél.: +41 (0) 22 730 84 03  
Fax: +41 (0) 22 730 80 40  
Courriel: [publications@wmo.int](mailto:publications@wmo.int)

ISBN 978-92-63-21072-2

#### NOTE

Les appellations employées dans les publications de l'OMM et la présentation des données qui y figurent n'impliquent, de la part de l'Organisation météorologique mondiale, aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

La mention de certaines sociétés ou de certains produits ne signifie pas que l'OMM les cautionne ou les recommande de préférence à d'autres sociétés ou produits de nature similaire dont il n'est pas fait mention ou qui ne font l'objet d'aucune publicité.

Les constatations, interprétations et conclusions exprimées dans les publications de l'OMM portant mention d'auteurs nommément désignés sont celles de leurs seuls auteurs et ne reflètent pas nécessairement celles de l'OMM ou de ses Membres.

# TABLE DES MATIÈRES

Page

<b>AVANT-PROPOS .....</b>	<b>vii</b>
<b>PRÉFACE .....</b>	<b>ix</b>
<b>RÉSUMÉ (anglais, français, russe et espagnol).....</b>	<b>xi</b>
<b>CHAPITRE 1. INTRODUCTION .....</b>	<b>1-1</b>
1.1 Contexte.....	1-1
1.2 Portée et contenu du Manuel.....	1-3
1.3 Types et causes de crues.....	1-4
1.3.1 Définitions.....	1-4
1.3.2 Types de crues.....	1-4
1.3.3 Rôle de la prévision des crues dans leur gestion .....	1-6
1.4 Considérations fondamentales concernant les systèmes de prévision et d'annonce des crues .....	1-6
1.4.1 Définition des systèmes de prévision et d'annonce des crues .....	1-6
1.4.2 Considérations météorologiques.....	1-7
1.4.3 Considérations hydrologiques.....	1-8
1.4.4 Nature des risques et des impacts.....	1-8
1.4.5 Diffusion des prévisions et des annonces.....	1-9
1.4.6 Aspects institutionnels .....	1-9
1.4.7 Aspects juridiques.....	1-10
<b>CHAPITRE 2. PRINCIPAUX ASPECTS DES SYSTÈMES DE PRÉVISION DES CRUES.....</b>	<b>2-1</b>
2.1 Considérations de base .....	2-1
2.1.1 Types de bassins hydrographiques.....	2-1
2.1.2 Processus physiques.....	2-2
2.1.3 Type de service.....	2-3
2.1.4 Délais de prévision.....	2-4
2.2 Exigences concernant les données.....	2-5
2.2.1 Exigences techniques générales .....	2-5
2.2.2 Données hydrologiques .....	2-6
2.2.3 Données météorologiques.....	2-6
2.2.4 Données topographiques .....	2-7
2.2.5 Autres informations et données .....	2-7
2.3 Infrastructures et ressources humaines.....	2-7
2.3.1 Infrastructures.....	2-7
2.3.2 Ressources humaines .....	2-8
2.3.2.1 Exemples de structures d'équipes au Royaume Uni .....	2-9
2.3.2.2 Prévision des crues au niveau national.....	2-9
2.3.2.3 Exigences générales en matière de recrutement de personnel pour un service d'annonce des crues national .....	2-9
2.4 Détermination du concept opérationnel.....	2-10
<b>CHAPITRE 3. MÉTHODES ET MODÈLES DE PRÉVISION DES CRUES .....</b>	<b>3-1</b>
3.1 Introduction.....	3-1
3.2 Modèles de bassins versants basés sur les précipitations .....	3-3
3.2.1 Surveillance et prévision des précipitations .....	3-3
3.2.1.1 Pluie .....	3-3
3.2.1.2 Eaux de fonte.....	3-4

	<i>Page</i>	
3.2.2	Modélisation événementielle et simulation continue.....	3-4
3.2.3	Mode de fonctionnement des modèles de prévision des écoulements en temps réel .....	3-5
	3.2.3.1 Modèles fonctionnant en mode sans mise à jour .....	3-5
	3.2.3.2 Modèles avec mise à jour.....	3-6
3.2.4	Types de modèles de simulation pluie-débit.....	3-6
3.2.5	Modèles d'écoulement de fonte de neige fonctionnant en mode simulation.....	3-6
3.2.6	Modèles de prévision avec mise à jour en temps réel .....	3-7
3.2.7	Approche de modélisation et de prévision pluie-débit «multi-modèles» .....	3-7
	3.2.7.1 Bien-fondé de l'approche multi-modèles .....	3-7
	3.2.7.2 Types de systèmes à modèles multiples.....	3-7
	3.2.7.3 Prévisions d'ensemble ou probabilistes .....	3-8
3.2.8	Paramètres des modèles hydrologiques .....	3-9
3.3	Modèles de propagation .....	3-9
	3.3.1 Généralités .....	3-9
	3.3.2 Propagation hydrologique .....	3-9
	3.3.3 Propagation hydraulique .....	3-10
3.4	Modèles mixtes de bassins versants et de propagation .....	3-11
3.5	Modèles spécifiques .....	3-12
	3.5.1 Marées de tempête.....	3-12
	3.5.2 Crues éclair.....	3-13
	3.5.3 Crues urbaines.....	3-13
	3.5.4 Gestion des crues au moyen de réservoirs.....	3-14
3.6	Disponibilité des modèles.....	3-15
 <b>CHAPITRE 4. CHOIX DES MÉTHODES OU MODÈLES APPROPRIÉS EN MATIÈRE DE PRÉVISION DES CRUES.....</b>		<b>4-1</b>
4.1	Facteurs affectant le choix .....	4-1
	4.1.1 Généralités .....	4-1
	4.1.2 Choix du modèle approprié.....	4-1
	4.1.3 Modèles globaux et distribués .....	4-2
4.2	Études hydrologiques à réaliser pour appuyer le développement du modèle .....	4-2
	4.2.1 Généralités .....	4-2
	4.2.2 Compréhension de l'hydrologie des crues .....	4-3
	4.2.3 Exigences concernant les études analytiques sur les crues .....	4-6
	4.2.4 Besoins continus en données pour aider la modélisation.....	4-7
4.3	Calage du modèle et exigences concernant les données .....	4-8
	4.3.1 Principaux objectifs.....	4-8
	4.3.2 Méthodes de calage .....	4-8
	4.3.3 Étapes de base en matière de calage.....	4-9
	4.3.4 Données requises.....	4-11
	4.3.5 Exigences générales.....	4-12
4.4	Vérification des modèles.....	4-13
	4.4.1 Critères de vérification du modèle numérique.....	4-13
	4.4.2 Critères graphiques de vérification du modèle .....	4-14
	4.4.3 Critères de vérification des prévisions.....	4-14
4.5	Sources d'incertitude dans la prévision des modèles .....	4-15
	4.5.1 Erreurs concernant les modèles.....	4-15
	4.5.2 Erreurs concernant les paramètres des modèles .....	4-15
	4.5.3 Erreurs sur les conditions aux limites .....	4-15
	4.5.4 Erreurs sur les conditions initiales .....	4-15
	4.5.5 Erreurs d'observation .....	4-16
	4.5.6 Données de prévision .....	4-16
4.6	Assimilation des données.....	4-16
	4.6.1 Objet.....	4-16
	4.6.2 Techniques disponibles.....	4-16

4.7	Couplage des modèles de prévisions météorologiques et des modèles hydrologiques .....	4-18
4.7.1	Considérations générales .....	4-18
4.7.2	Prévisions hydrologiques mondiales basées sur le modèle mondial .....	4-19
4.7.3	Prévisions hydrologiques globales basées sur les modèles méso-échelle et la prévision immédiate.....	4-20
4.8	Incertitude des prévisions en mode opérationnel.....	4-22
<b>CHAPITRE 5. RÉSEAUX DE SURVEILLANCE.....</b>		<b>5-1</b>
5.1	Définition des réseaux d'acquisition de données.....	5-1
5.2	Évaluation des réseaux existants .....	5-1
5.2.1	Réseaux météorologiques .....	5-1
5.2.2	Réseaux pluviométriques .....	5-2
5.2.3	Réseaux (hydrométriques) de jaugeage des cours d'eau .....	5-2
5.2.4	Le réseau d'annonce des crues des rivières du Bangladesh .....	5-3
5.3	Exigences de conception pour les réseaux d'observations hydrométéorologiques.....	5-3
5.3.1	Identification des zones à risque .....	5-4
5.3.2	Sélection des délais appropriés .....	5-5
5.3.3	Identification des unités hydrologiques géographiques.....	5-8
5.3.4	Surveillance des conditions initiales (antécédentes) des bassins hydrographiques et préparation.....	5-8
5.3.5	Instrumentation et surveillance .....	5-9
5.3.6	Adéquation des structures de données.....	5-10
5.3.7	Logiciels d'exploitation .....	5-10
5.4	Exploitation et maintenance des réseaux hydrologiques .....	5-10
5.4.1	Équipement de surveillance sur le terrain .....	5-11
5.4.2	Équipement de bureau .....	5-11
5.4.3	Licences d'exploitation et garantie.....	5-12
5.4.4	Problèmes liés au personnel.....	5-12
5.4.5	Mobilité et transport.....	5-12
5.5	Sauvegarde des données hydrologiques .....	5-13
5.5.1	Définition de la sauvegarde de données.....	5-13
5.5.2	Problèmes liés à l'archivage des données .....	5-13
5.5.3	Justification de la sauvegarde des données hydrologiques.....	5-14
5.5.4	Initiatives passées de l'OMM.....	5-14
5.5.5	Sauvegarde des données et numérisation .....	5-15
5.5.6	Priorités pour la sauvegarde de données .....	5-16
<b>CHAPITRE 6. TRANSMISSION ET GESTION DES DONNÉES EN TEMPS RÉEL .....</b>		<b>6-1</b>
6.1	Transmission de données.....	6-1
6.1.1	Exigences de base.....	6-1
6.1.2	Choix des moyens de transmission .....	6-3
6.1.3	Méthodes et fréquence d'interrogation.....	6-5
6.1.4	Fiabilité.....	6-8
6.2	Prétraitement des données .....	6-11
6.2.1	Considérations générales .....	6-11
6.2.2	Contrôle qualité.....	6-12
6.2.3	Traitement des données manquantes.....	6-13
6.3	Développement et gestion des données .....	6-13
6.3.1	Gestion des données pour la prévision et l'annonce des crues.....	6-13
6.3.2	Archivage des données .....	6-13
6.4	Diffusion des données .....	6-15

	<i>Page</i>
<b>CHAPITRE 7. APPLICATIONS POTENTIELLES ISSUES DE TECHNOLOGIES EN DÉVELOPPEMENT .....</b>	<b>7-1</b>
7.1 Introduction.....	7-1
7.2 Télédétection .....	7-1
7.2.1 Radar.....	7-1
7.2.2 Satellite .....	7-1
7.3 Prévision numérique du temps (PNT) .....	7-3
7.3.1 Crues fluviales à grande échelle .....	7-3
7.3.2 Précipitations convectives et événements fluviaux de petite échelle .....	7-3
7.4 Systèmes d'informations géographiques (SIG).....	7-4
7.5 Intégration d'améliorations dans le domaine des prévisions quantitatives des précipitations.....	7-5
7.6 Évaluation de l'incertitude des prévisions et prévision hydrologique d'ensemble.....	7-8
7.7 Utilisation opérationnelle de l'incertitude des prévisions pour améliorer la prise de décision .....	7-9
<b>CHAPITRE 8. STRUCTURE ET ORGANISATION DES ANNONCES DE CRUE .....</b>	<b>8-1</b>
8.1 Identification des utilisateurs finaux et de leurs exigences.....	8-1
8.2 Définition spatiale des annonces.....	8-1
8.3 Délais des annonces météorologiques et de crues .....	8-2
8.3.1 Considérations générales .....	8-2
8.3.2 Annonce météorologique .....	8-2
8.3.3 Annonce de crue .....	8-4
8.4 Sélection du niveau de gravité des annonces de crues.....	8-4
8.5 Présentation des annonces de crues aux utilisateurs.....	8-6
8.5.1 Symboles d'annonce de crue.....	8-6
8.5.2 Exemples d'informations sur les annonces de crues.....	8-6
8.5.2.1 États-Unis.....	8-8
8.5.2.2 Australie.....	8-9
8.5.2.3 Royaume-Uni .....	8-10
8.6 Contribution des informations de crue aux mesures d'intervention .....	8-10
8.7 Systèmes locaux d'alerte de crue.....	8-11
8.7.1 Mise en place de systèmes de surveillance des crues, y compris des moyens de communication .....	8-11
8.7.2 Mise en place de sondes pour des systèmes d'annonce de crue au niveau local .....	8-12
8.8 Annonce de crue et société .....	8-12
8.8.1 Considérations générales .....	8-12
8.8.2 Sensibilisation des médias.....	8-13
8.8.3 Participation des collectivités à la collecte de données et aux systèmes locaux d'annonce de crues .....	8-14
8.8.4 Un exemple d'évaluation de la nécessité d'un système local d'annonce des crues aux États-Unis.....	8-14
8.8.5 Efficacité des annonces de crues et psychologie humaine .....	8-15
<b>CHAPITRE 9. FORMATION REQUISE .....</b>	<b>9-1</b>
9.1 Prise en compte des ressources existantes .....	9-1
9.2 Qualifications professionnelles .....	9-2
9.3 Formation et enseignement continu.....	9-2
9.4 Formation opérationnelle du personnel des services de prévision et d'annonce des crues.....	9-5
9.5 Acquisition de la compréhension des prévisions et des annonces par les utilisateurs .....	9-7
<b>ANNEXE I. RÉFÉRENCES .....</b>	<b>AN-I-1</b>
<b>ANNEXE II. ABRÉVIATIONS.....</b>	<b>AN-II-1</b>



## AVANT-PROPOS

La prévision et l'annonce des crues est un domaine auquel l'OMM a toujours attaché une importance particulière. Le présent *Manuel sur la prévision et l'annonce des crues* s'inscrit dans cette tradition.

Les crues font partie des catastrophes naturelles les plus dévastatrices qui soient. De nombreuses régions du monde y sont confrontées chaque année. Au cours de ces dernières décennies, les dommages causés par les crues ont augmenté de manière exponentielle. Les systèmes hydrologiques de prévision et d'alerte constituent donc un élément essentiel des stratégies régionales et nationales.

Dans l'optique d'un développement socio-économique durable, il convient de perfectionner en permanence les systèmes de prévision et d'annonce de crues pour les populations exposées, ce qui suppose une combinaison optimale de données, d'outils de prévision et de spécialistes

ayant les qualifications requises. Un système de prévision des crues doit être conçu de façon à ce que les intéressés aient suffisamment de temps pour se préparer. Je suis certain que ce manuel s'avèrera utile aux nombreux Membres de notre organisation qui prévoient de se doter d'un tel système.

Au nom de l'OMM, je tiens à exprimer toute ma gratitude à tous les experts qui ont contribué à la rédaction et la publication du Manuel et en particulier aux membres du Groupe de travail consultatif de la Commission d'hydrologie de l'OMM pour leurs conseils avisés.



(M. Jarraud)  
Secrétaire général



## PRÉFACE

En tant que président de la Commission d'hydrologie (CHy), j'ai le plaisir de vous présenter le *Manuel sur la prévision et l'annonce des crues* dont la rédaction a été supervisée dès le départ, c'est-à-dire entre la douzième et la treizième session de la Commission, par M. Jian-yun Zhang (Chine). Ce dernier a présidé une équipe formée par des membres du Groupe d'experts de la CHy à composition non limitée (OPACHE) sur la prévision et la prédétermination des crues composé de:

- Zhiyu Liu (Chine);
- Jean-Michel Tanguy (France);
- Kieran M. O'Connor (Irlande), chargé d'établir la première version;
- Ezio Todini (Italie);
- James Dent (Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord);
- Konstantine Georgakakos (États-Unis d'Amérique);
- Curt Barrett (États-Unis d'Amérique).

Lors de sa treizième session, la Commission a reconduit son Groupe d'experts sur la prévision et la prédétermination des crues et lui a demandé d'achever la rédaction du Manuel. Après avoir été revu par la Commission, le texte a été finalisé par James Dent, qui a aussi tenu compte des commentaires des deux réviseurs:

- Johannes Cullmann (Allemagne), qui a été mandaté en avril 2010 par le Groupe de travail

consultatif de la Commission pour apporter la dernière touche au Manuel;

- Marian Muste (États-Unis d'Amérique).

Le présent manuel est le troisième ouvrage de la nouvelle série de publications créée par la Commission lors de sa treizième session tenue début novembre 2008. Les deux manuels précédents sont le *Manual on estimation of Probable Maximum Precipitation (PMP)* (WMO-No. 1045) et le *Manual on Stream Gauging* (WMO-No. 1044). Comme ce fut le cas pour ces manuels, la Commission d'hydrologie prévoit d'organiser, à la demande, des activités de formation; le *Manuel sur la prévision et l'annonce des crues* sera donc complété par du matériel didactique actuellement en cours d'élaboration.



(Julius Wellens-Mensah)  
Président de la Commission d'hydrologie



## SUMMARY

The *Manual on Flood Forecasting and Warning* provides the basic knowledge and guidance to develop or to set up an appropriate and tailored system for any case in which a flood forecasting and warning system is required. The aim is to provide a succinct but comprehensive overview of the basic knowledge and information that the relevant personnel of the National Meteorological or Hydrometeorological Services or other flood management service should require. The Manual is based on the latest information developed in prominent research or consultancy operations around the world and is provided with extensive references and Internet links to guide the reader to further sources of information.

The Manual is divided into several chapters that, it is hoped, will benefit particular situations, either for the evolution and improvement of existing

arrangements, or for the establishment from a very basic or non-existent capacity. The Manual does not set out a step-by-step process for the design of a flood forecasting and warning system along the lines of a particular template or practice in any one country. Rather, presented in all chapters are a number of examples of different practices and technologies, which may reflect different levels of development, ranges of needs and also capacities in a number of different situations.

The Manual describes the various components of a flood warning system, which are:

- Design of a flood forecasting system;
- Implementation and operation of a flood forecasting system;
- Flood warnings;
- Training.

## RÉSUMÉ

Le *Manuel sur la prévision et l'annonce des crues* présente les éléments de connaissance et d'orientation indispensables au développement ou à la création d'un système approprié et adapté, quel que soit le cas où un système de prévision et d'annonce de crues s'impose. Il propose un tour d'horizon, à la fois succinct et fouillé, des connaissances et des renseignements dont pourrait avoir besoin le personnel compétent des Services météorologiques et hydrologiques nationaux ou d'autres services de gestion des crues. Il s'appuie sur les résultats d'importantes missions de recherche et de consultation menées récemment partout dans le monde, et contient un grand nombre de références et de liens Internet qui permettent au lecteur d'avoir accès à des sources d'information supplémentaires.

Le Manuel comprend plusieurs chapitres dont le contenu, on l'espère, se révélera utile dans diverses situations particulières, que ce soit pour améliorer

et faire évoluer des configurations existantes, ou pour créer un système à partir de moyens sommaires voire inexistantes. Il ne s'agit pas de décrire les étapes de la conception d'un système de prévision et d'annonce de crues sur le modèle ou les pratiques en application dans un pays en particulier. On trouve plutôt dans tous les chapitres des exemples de pratiques et de techniques différentes correspondant à divers niveaux d'avancement et divers éventails de besoins ou de capacités, dans plusieurs situations différentes.

Le Manuel décrit les différentes composantes d'un système permettant d'établir des annonces de crues, à savoir:

- La conception d'un système de prévision des crues;
- La mise en œuvre et l'exploitation d'un système de prévision des crues;
- Les messages d'avis de crues;
- La formation.

## РЕЗЮМЕ

В *Наставлении по прогнозированию паводков и предупреждениям о них* содержатся базовые знания и руководство для разработки или создания надлежащей специализированной системы в тех случаях, когда существует потребность в системе прогнозирования паводков и предупреждений о них. Цель при этом заключается в предоставлении краткого, но всеобъемлющего обзора базовых знаний и информации, которые могут потребоваться соответствующему персоналу национальных метеорологических или гидрометеорологических служб или других служб, занимающихся вопросами, связанными с управлением паводками. Наставление основано на самой последней информации, полученной в результате крупных исследований или проведения консультаций во всем мире; в нем также приведено большое количество ссылок на источники и Интернет-ресурсы, которые помогут читателю получить дальнейшую информацию.

Наставление разделено на несколько глав, которые, можно надеяться, будут полезны в конкретных

ситуациях либо при развитии и совершенствовании существующих организационных схем, либо при их разработке, используя базовый потенциал или начинающаяся практически с нуля. В *Наставлении* не приводится пошаговый процесс создания системы прогнозирования паводков и предупреждений о них и не даются конкретные образцы или способы практического осуществления соответствующей деятельности в какой-либо стране. Напротив, во всех главах представлен ряд примеров всевозможных видов практики и технологий, которые могут отражать различные уровни развития, диапазон потребностей, а также возможности в ряде разнообразных ситуаций.

В *Наставлении* описаны различные компоненты системы предупреждений о паводках:

- проектирование системы прогнозирования паводков;
- внедрение и эксплуатация системы прогнозирования паводков;
- предупреждения о паводках;
- подготовка кадров.

## RESUMEN

El *Manual on Flood Forecasting and Warning* (Manual sobre predicción y aviso de crecidas) ofrece los conocimientos básicos y la orientación necesaria para elaborar o incluso implantar un sistema que se adecue y adapte a aquellas situaciones en las que se requiera un sistema de predicción y aviso de crecidas. Su objetivo consiste en presentar una visión sucinta pero completa de los conocimientos básicos y la información que necesite el personal competente de los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales u otro servicio de gestión de crecidas. El Manual se basa en la información más reciente obtenida en importantes actividades de investigación y asesoría de todo el mundo e incluye numerosas referencias y enlaces de Internet que permiten al lector acceder a otras fuentes de consulta.

El Manual se compone de varios capítulos cuyo contenido, es de esperar, será de gran utilidad en

situaciones concretas, bien para desarrollar y mejorar los estructuras ya existentes, bien para establecerlas a partir de una capacidad muy básica o inexistente. En el Manual no se describe paso a paso la forma de diseñar un sistema de predicción y aviso de crecidas siguiendo un modelo o las prácticas utilizadas en un país en concreto. Más bien, en todos los capítulos se ilustran ejemplos de diferentes prácticas y tecnologías, que pueden reflejar diferentes niveles de desarrollo, tipos de necesidades y también capacidades en diversas situaciones.

En el Manual se describen los diversos componentes de un sistema de aviso de crecidas, a saber:

- el diseño de un sistema de predicción de crecidas;
- el funcionamiento y explotación de un sistema de predicción de crecidas;
- los avisos de crecidas;
- la formación profesional.

# CHAPITRE 1

## INTRODUCTION

### 1.1 CONTEXTE

Lors de la douzième session de la Commission d'hydrologie, tenue à Genève en octobre 2004, la prévision et l'étude des crues fut l'un des sujets thématiques abordés par le groupe d'experts. Dans ce cadre, la préparation d'un manuel sur la prévision et l'annonce des crues a été identifiée comme l'activité prioritaire. La treizième session de la Commission, qui s'est déroulée à Genève en novembre 2008, a demandé que ce même groupe d'experts achève ce manuel.

Le Programme mondial pour l'évaluation des ressources en eau de l'Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO) ([http://webworld.unesco.org/water/wwap/facts\\_figures/managing\\_risks.shtml](http://webworld.unesco.org/water/wwap/facts_figures/managing_risks.shtml)) pose les données du problème en des termes clairs. La Figure 1.1 montre la part significative occupée par les inondations par rapport à l'ensemble des dangers naturels liés à l'eau.

Il convient de noter que les crues sont responsables de 15 pour cent de tous les décès liés à des catastrophes naturelles et, par exemple, entre 1987 et 1997, 44 pour cent de toutes ces catastrophes ont affecté l'Asie, coûtant la vie à 228 000 personnes (environ 93 pour cent de tous les décès liés aux crues dans le monde). Les pertes économiques totales pour cette région se sont élevées à 136

milliards USD. Au cours des deux dernières décennies, de nombreux décès ont été provoqués dans des pays de l'Union Européenne (UE) à la fois par les crues éclair et pluviales, sans compter les victimes des crues plus habituelles des rivières ou des fleuves. Plus de 12 pour cent de la population du Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord vit dans des plaines d'inondation fluviales ou dans des zones identifiées comme étant sujettes aux inondations côtières et la moitié de la population des Pays-Bas vit au-dessous du niveau moyen de la mer. En Hongrie, environ 25 pour cent de la population vit dans la plaine fluviale du Danube et de ses affluents.

Dans toutes les régions montagneuses d'Europe, les populations sont menacées par le risque de crues éclair. Les agglomérations sont également menacées par des inondations pluviales particulièrement dévastatrices, c'est-à-dire lorsque de très fortes précipitations dépassent la capacité des réseaux de drainage des eaux urbains. Au Royaume-Uni en 2007, les inondations estivales de ce type ont provoqué des pertes totales s'élevant à environ 4 milliards GBP, dont 3 milliards GBP étaient couvertes par les assurances. Pour le Royaume-Uni à lui seul, la valeur totale des actifs menacés par les inondations dépasse maintenant 238 milliards GBP. (Sources : The Flood Risk Management Research Consortium, <http://www.floodrisk.org.uk>; Agence pour l'Environnement du Royaume-Uni, janvier 2010 : *The costs of the summer 2007 floods in England.*)

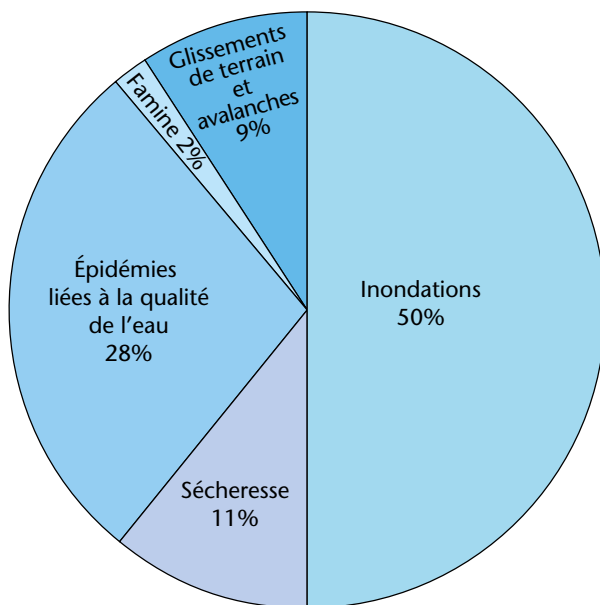


Figure 1.1. Types de catastrophes naturelles liées à l'eau, 1990–2001

Des inondations peuvent survenir n'importe où à la suite de fortes précipitations. Toutes les plaines inondables sont exposées et les fortes tempêtes sont susceptibles de provoquer des crues éclair en n'importe quel point du globe (voir Organisation météorologique mondiale, Natural hazards – Floods and flash floods, <http://www.wmo.int/pages/themes/hazards>). Des crues éclair peuvent également se produire après une période de sécheresse, lorsque de fortes pluies tombent sur un sol très sec et compact dans lequel l'eau ne parvient pas à pénétrer. Les inondations peuvent prendre des formes très diverses, de la petite crue éclair à la nappe d'eau qui recouvre d'immenses étendues de terre. Elles peuvent être déclenchées par de violents orages, des tornades, des cyclones tropicaux ou extratropicaux (dont l'intensité est souvent accrue par le phénomène El Niño), la mousson, des embâcles ou la fonte des neiges. Dans les zones côtières, les marées de tempête provoquées par les cyclones tropicaux et les tsunamis ou les rivières

grossies par des marées exceptionnellement fortes peuvent également causer des inondations. Les digues peuvent être submergées lorsque les rivières sont alimentées par la fonte des neiges. La rupture d'un barrage ou des opérations de régulation trop brutales peuvent également être à l'origine d'inondations catastrophiques. Les inondations constituent ainsi une menace pour les personnes et les biens partout dans le monde. Il est estimé que quelque 1,5 milliard de personnes ont été confrontées à ce phénomène au cours de la dernière décennie du XX<sup>e</sup> siècle. Dans son rapport annuel sur les inondations, le Bangladesh Water Development Board (Conseil de développement de l'eau au Bangladesh) (*Annual Flood Report, 2009*) a estimé le coût des dégâts provoqués par les inondations à environ 75 millions USD uniquement pour le secteur de l'eau. Même si la zone inondée totale – représentant 19,4 pour cent du pays entier – a été inférieure à la moyenne, la vulnérabilité des activités économiques et des biens a augmenté de façon importante au cours des dernières années.

L'augmentation exponentielle de l'impact des inondations a procuré une meilleure visibilité aux mécanismes de prévision et d'annonce des crues. Depuis la fin des années 80, les mesures structurelles majeures pour la gestion des crues ont laissé la place à une approche plus intégrée, dont la prévision et l'annonce des crues font partie intégrante. Le Concept de gestion intégrée des crues (Organisation météorologique mondiale-Partenariat global pour l'eau: Programme associé de gestion des inondations, <http://www.apfm.info>) encourage l'abandon de l'approche traditionnelle, fragmentée et localisée pour une utilisation globale des ressources du bassin fluvial, en mettant en œuvre des stratégies pour maintenir ou augmenter la productivité des plaines inondables, tout en fournissant en même temps des mesures de protection contre les pertes liées aux inondations.

Les crues constituent un risque naturel chronique aux conséquences potentiellement dévastatrices, représentant un tiers de toutes les pertes liées à des événements naturels. Au cours de la dernière décennie, les événements météorologiques extrêmes ont renforcé l'impression selon laquelle, que ce soit du fait du réchauffement climatique provoqué par l'homme ou pour d'autres raisons, les inondations deviennent plus extrêmes, plus étendues et plus fréquentes. Tandis que les risques et les coûts de ces catastrophes naturelles sont susceptibles de s'accroître en raison des bouleversements sociaux et environnementaux à l'échelle planétaire, un grand débat s'est instauré entre les différents types d'acteurs «sur les questions de responsabilité et d'obligation, ainsi que sur les mesures appropriées à prendre pour atténuer les pertes et porter secours

aux victimes» (Linnerooth-Bayer et Amendola, 2003). De telles perspectives ont permis de mettre davantage l'accent sur la nécessité d'améliorer le fonctionnement de la prévision des crues et d'optimiser les systèmes de gestion des risques liés aux inondations (Arduino et al., 2005).

Le contrôle et l'exploitation efficaces des inondations par l'homme sont souvent considérés comme des objectifs inaccessibles et «une protection complète contre les inondations est rarement envisageable» (Moore et al., 2005). Diverses données d'entrée (principalement les apports météoriques), des facteurs physiques (tels que les paramètres descriptifs des bassins hydrographiques), ainsi que la combinaison de ces éléments, servent de catalyseurs pour générer des flux importants dans les chenaux naturels de propagation des eaux de surface. Ces apports donnent lieu, dans les cas les plus extrêmes, à des inondations car le réseau de chenaux et le cours d'eau ne peuvent plus contenir ces flux.

Le but d'un système national de prévision et d'annonce des crues est de fournir aux autorités et à la population un délai de préparation aussi important que possible avant une crue prochaine. À mesure que le temps avance, les exigences en matière de prévision des crues évoluent d'une indication générale de l'éventualité d'une crue, par exemple pour de grandes rivières, à une prévision plus précise de l'ampleur et du délai de l'événement aux endroits stratégiques. Les principales composantes d'un système national de prévision et d'annonce des crues sont les suivantes :

- (a) Collecte de données en temps réel pour la prévision du niveau de gravité de la crue, y compris l'heure de début, la durée et l'ampleur de la crue ;
- (b) Préparation des informations de prévision et des messages d'annonce, donnant des indications claires sur la situation actuelle, prévisions concernant l'évolution de la situation et impacts prévus ;
- (c) Communication et diffusion desdits messages, qui peuvent inclure des conseils concernant les mesures à prendre ;
- (d) Interprétation de la prévision et des observations concernant la crue, en vue de fournir des analyses de la situation visant à déterminer les impacts possibles sur les collectivités et les infrastructures ;
- (e) Réaction aux annonces de crue de la part des organismes et des collectivités concernés ;
- (f) Passage en revue du système d'annonce et améliorations apportées au système après les crues.

Les relations entre les éléments susmentionnés et l'utilisation des outils du Système d'information géographique (SIG) sont illustrées dans la Figure 1.2.



La prévision des crues nécessite la compréhension des comportements à la fois météorologiques et hydrologiques et des conditions spécifiques du pays en question. En dernier ressort, la responsabilité revient aux agences gouvernementales compétentes au niveau national, mais l'information et les activités opérationnelles doivent être menées à des niveaux plus localisés, par exemple un bassin versant ou une agglomération.

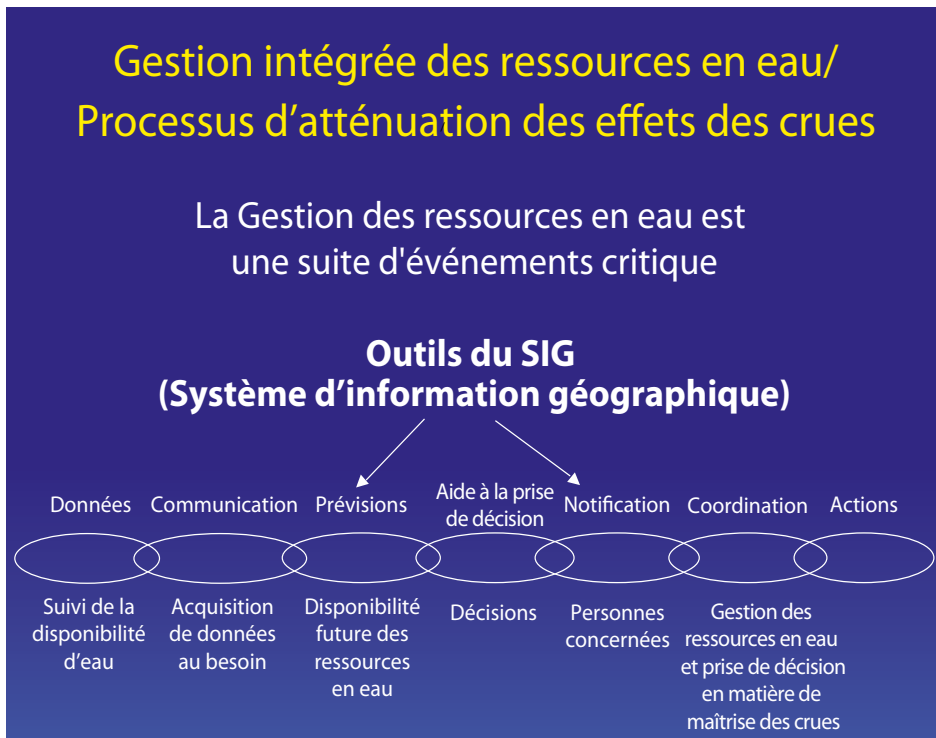
**1.2 PORTÉE ET CONTENU DU MANUEL**

Ce manuel apporte les connaissances et directives de base pour développer, voire même créer, un système personnalisé adapté pour tous les cas où le développement de mécanismes de prévision et d'annonce des crues est envisagé. L'objectif est de fournir un aperçu succinct mais complet des connaissances et informations de base que le personnel concerné des services météorologiques et hydrologiques nationaux ou de tout autre service de gestion des crues peut nécessiter. Ce manuel a été élaboré à partir des toutes dernières informations disponibles obtenues grâce à d'importantes opérations de recherche et d'expertise dans le monde entier et propose de nombreuses références et liens Internet permettant d'approfondir divers aspects auxquels il est fait référence dans les descriptions.

Ce manuel a été préparé par un groupe limité d'experts ayant l'expérience requise par rapport aux divers aspects de la recherche et des pratiques en matière de mécanismes de prévision et d'annonce des crues. Ils ont été, à leur tour, assistés par un certain nombre de contributeurs et de réviseurs. Ce manuel est composé de plusieurs parties, qui peuvent s'avérer très utiles pour des systèmes spécifiques, soit pour développer et améliorer des dispositifs existants, soit pour partir d'un projet embryonnaire ou inexistant. Les parties de ce manuel ne proposent pas de procédure pas à pas de conception d'un système de prévision et d'annonce des crues suivant un modèle particulier ou les pratiques d'un pays spécifique. Dans toutes les parties, des exemples sont présentés des différentes pratiques et technologies, qui peuvent refléter les divers niveaux de développement, besoins et infrastructures correspondant à un certain nombre de situations différentes.

Suite à cette introduction qui résume les diverses composantes d'un système de prévision des crues, les principales parties du rapport sont les suivantes :

- Chapitres 2-4 : Conception de systèmes de prévision des crues ;
- Chapitres 5-7 : Mise en application et fonctionnement des systèmes de prévision des crues ;



**Figure 1.2. Relations entre les systèmes de prévision et d'annonce des crues**

Source : Administration américaine pour les océans et l'atmosphère (NOAA)

- Chapitre 8 : Avis de crues ;
- Chapitre 9 : Formation.

L'approche séquentielle des différentes parties vise à fournir les directives nécessaires à l'élaboration d'un système de prévision des crues, qu'il convient d'évaluer, dans un premier temps, pour vérifier les éléments suivants :

- (a) Quels sont les aménagements nécessaires dans le cadre d'un système de prévision des crues, et quels sont les services gouvernementaux impliqués ? Des différences d'approche significatives sont notables concernant la satisfaction des besoins en matière de prévision lorsque la responsabilité est confiée à une seule autorité (par exemple le service météorologique) ou lorsque celle-ci est partagée entre plusieurs organismes (le plus souvent le service météorologique et l'organisme de gestion des cours d'eau).
- (b) Quelles informations sont disponibles pour les services météorologiques et hydrologiques ? Les sources d'information incluront les réseaux d'observation nationaux, le radar météorologique et l'accès aux données et prévisions internationales, ainsi que les informations satellitaires.
- (c) Quel est le statut du réseau hydrométrique (pluviomètres et stations de niveau d'eau) qui pourrait être utilisé pour un système de prévision ?
- (d) Le fonctionnement du système de prévision des crues est-il relié aux pays voisins, notamment lorsque des bassins versants transfrontaliers sont concernés ?
- (e) Quelles sont les exigences des utilisateurs finaux quant aux informations de prévision des crues ?
- (f) Quelles compétences sont nécessaires pour le développement adapté d'un système de prévision des crues ?

### 1.3 TYPES ET CAUSES DE CRUES

#### 1.3.1 Définitions

Il existe de nombreuses définitions issues de diverses sources nationales et internationales. Pour des raisons de cohérence, il est conseillé d'utiliser le *Glossaire international d'hydrologie* de l'Organisation météorologique mondiale (OMM)/UNESCO (OMM-N° 385, 1992), dans lequel les définitions des termes sont données dans plusieurs langues.

Le Glossaire définit le terme « crue » comme suit :

- (1) Montée, en général brève, du niveau d'un cours d'eau jusqu'à un maximum dont il redescend plus lentement.
- (2) Écoulement relativement fort tel qu'il est mesuré par la hauteur d'eau ou le débit.

L'« inondation », dans le sens des effets d'une crue, à distinguer de la crue à proprement parler, est définie de la manière suivante :

Submersion par l'eau débordant du lit normal d'un cours d'eau ou d'autres surfaces d'eau, ou accumulation d'eau provenant de drainages, sur des zones qui ne sont pas normalement submergées.

Ce glossaire donne les définitions d'une gamme exhaustive de termes utilisés en rapport avec les crues et les inondations et il n'est donc pas nécessaire d'en faire l'inventaire dans le présent manuel. En guise d'introduction, les principales caractéristiques des différents types d'inondations sont résumées ci-après.

#### 1.3.2 Types de crues

##### Crues éclair

Ces crues sont fréquemment associées à de violents orages de convection d'une courte durée s'abattant sur une superficie réduite. Les crues éclair peuvent se produire dans tout endroit comportant de fortes déclivités, mais elles sont plus communes dans les régions montagneuses fréquemment sujettes à de forts orages. Les crues éclair résultent souvent de fortes pluies sur une courte durée. Ce type particulier d'inondations emporte souvent les maisons, les routes, les ponts enjambant habituellement de petits cours d'eau et cela a donc des conséquences dramatiques pour les collectivités et les moyens de transport dans ces régions souvent isolées. Les crues éclair peuvent également se produire dans des zones très localisées dont les sols se sont compactés suite à une longue période sèche.

##### Crues fluviales

Les inondations fluviales constituent la priorité de ce manuel et concernent un large éventail de cours d'eau et bassins versants. Les crues dans les vallées fluviales se produisent principalement dans les plaines inondables et les zones de débordement dès l'instant où le débit devient supérieur à la capacité du lit du cours d'eau et que les flots débordent des berges naturelles ou des digues artificielles. Les crues éclair sont souvent plus dévastatrices car elles se produisent dans des vallées étroites, pentues et confinées et sont caractérisées, comme leur nom l'indique, par la rapidité de leur formation suite aux précipitations et par de fortes vitesses d'écoulement. Cette rapidité peut les rendre particulièrement dangereuses pour les personnes.

##### Crues simples

Il s'agit du type d'inondations le plus répandu, lors duquel de fortes pluies s'abattent durant plusieurs

heures voire plusieurs jours sur un bassin versant et provoquent de graves crues. Généralement, ces fortes pluies sont associées à des perturbations cycloniques, des dépressions et des orages de latitudes moyennes, avec des systèmes frontaux d'échelle synoptique très marqués.

#### Crues multiples

Celles-ci résultent de fortes précipitations dues à une succession rapide de perturbations météorologiques. À très grande échelle, ces perturbations incluent par exemple les crues dans les plaines indo-gangétiques et les régions d'Inde centrale souvent provoquées par le passage d'une série de zones de basses pressions ou de dépressions en provenance de la baie du Bengale, suivant plus ou moins la même trajectoire. Les crues multiples peuvent également affecter les grands bassins hydrographiques des zones de moyennes latitudes en hiver, lorsque des séries de dépressions actives se succèdent, par exemple en Europe occidentale.

#### Crues saisonnières

Il s'agit de crues qui se produisent avec une régularité générale en raison de fortes précipitations saisonnières. Les régions du monde sujettes à un climat de mousson sont généralement les régions les plus affectées et des situations gravissimes se produisent lorsque les inondations «normales» cèdent le pas à des crues prolongées à fort ruissellement. Les inondations concernent fréquemment l'ensemble du bassin et peuvent durer plusieurs semaines. Dans le cadre d'une mousson active, un certain nombre d'événements extrêmes peuvent se produire durant une saison de crue. Les crues saisonnières peuvent également résulter de hauts niveaux d'eau dans les lacs situés en amont du bassin fluvial, par exemple le lac Victoria et le fleuve Nil. Un autre type de crue saisonnière peut résulter de conditions humides dans un tronçon situé en amont d'un bassin hydrographique, qui est soumis à un régime climatique différent des zones affectées en aval. Les fleuves Nil et Yangzi Jiang sont de bons exemples.

#### Inondations côtières

Les marées de tempêtes et les vents violents coïncidant avec de fortes marées sont les causes les plus fréquentes de ce type d'inondations. La marée de tempête elle-même résulte de l'élévation du niveau de la mer en raison de basses pressions atmosphériques. Dans des configurations particulières, telles que de larges estuaires ou des zones marines confinées, l'accumulation d'eau est amplifiée par une combinaison entre la faible profondeur des fonds marins et le retard du reflux. Les larges deltas comme le Mississippi et le Gange sont propices à ce type d'inondations en cas d'ouragans (cyclones). Une autre

zone sensible est la Mer du Nord en Europe occidentale en raison des trajectoires particulières des dépressions hivernales. Si la marée de tempête a lieu près de l'embouchure d'une rivière se jetant dans la mer, le flux de la rivière sera contrarié, ce qui peut occasionner de graves inondations dans les zones côtières et à leurs alentours. Les tsunamis résultant de tremblements de terre sous-marins sont une cause très spécifique d'inondations côtières occasionnellement dramatiques.

#### Crues estuariennes

Les estuaires sont les parties de l'embouchure d'un fleuve au niveau desquelles la marée côtière rencontre le flux d'eau douce du fleuve allant vers la mer. L'interaction entre le flux du fleuve allant vers la mer et le flux d'eau salée allant vers l'intérieur des terres durant les fortes marées peut provoquer une vague déferlante ou mascaret se dirigeant vers l'intérieur des terres. Fréquemment, la forme d'entonnoir caractéristique de nombreux estuaires provoque une augmentation du niveau d'eau dans les tronçons supérieurs moins larges du fleuve. Ce type d'inondations se produit généralement dans les deltas des rivières le long des côtes, par exemple dans les Bouches du Gange. Elles sont plus fréquentes et moins graves en termes de profondeur et de superficie des zones inondées que les inondations provoquées par les marées de tempêtes.

#### Crues urbaines

Les inondations en milieu urbain se produisent lorsque de fortes précipitations s'abattent dans les petites et grandes villes, créant un ruissellement rapide en provenance des zones imperméabilisées et bâties qui vient à dépasser la capacité des systèmes d'évacuation des eaux pluviales. Dans les parties basses des villes, la formation de mares liées au ruissellement des eaux pluviales n'est pas seulement due aux forts taux de précipitations mais également au colmatage des systèmes d'évacuation par des débris obstruant les passages couverts et les ouvrages d'évacuation, souvent du fait du manque d'entretien. Un certain nombre de grandes villes situées dans des zones deltaïques, par exemple la Nouvelle-Orléans, Dhaka et Bangkok, sont protégées par des digues et des systèmes d'évacuation par pompage. Lorsque les taux de précipitations dépassent la capacité de pompage, l'accumulation rapide des eaux de ruissellement provoque de graves inondations.

#### Crues liées à la fonte des neiges

Dans les régions de montagne et de hautes latitudes où de forts cumuls de neige se produisent en hiver, le dégel de printemps génère un important ruissellement d'eau de fonte. Si la température augmente rapidement, le taux de fonte peut

provoquer des crues, qui peuvent s'étendre à l'aval du bassin versant. Le degré de gravité des crues liées à la fonte des neiges augmentera si le dégel s'accompagne de fortes pluies et s'accroîtra davantage si le sous-sol reste gelé. Bien qu'il s'agisse d'un phénomène saisonnier typique des zones avec d'importantes accumulations de neige dans les cours supérieurs des rivières et qui peut générer des inondations bénéfiques en aval, ce phénomène peut aussi avoir des répercussions graves à plus petite échelle, en particulier dans les zones connaissant pendant l'hiver des variations entre des périodes froides et des périodes plus tempérées et pluvieuses.

#### Crues liées à des embâcles et à des obstructions

Dans les régions qui connaissent une fonte saisonnière des neiges, si celle-ci est rapide, des bancs morcelés de glace peuvent s'accumuler dans les rivières, bloquant et ralentissant le flux, provoquant ainsi l'augmentation du niveau de la rivière à l'amont de l'embâcle. Un dégagement soudain de l'«embâcle» peut provoquer une onde de crue vers l'aval similaire à celle provoquée par la rupture d'un barrage. Dans les zones encaissées, la fonte des neiges et de fortes précipitations peuvent provoquer des glissements de terrain et des coulées de débris. À mesure que ces débris se déplacent d'amont en aval, de gros blocages peuvent se constituer. Lorsque ces derniers se disloquent ou sont rompus, de graves inondations peuvent survenir. Ces deux phénomènes sont très difficiles à prédire.

#### 1.3.3 **Rôle de la prévision des crues dans leur gestion**

La prévision des crues est un élément nécessaire de toute stratégie de gestion des crues, étant donné qu'aucune mesure de prévention ou de protection ne peut être totalement efficace. La réalité des limites économiques en matière de fourniture de protection, ajoutée au fait que la capacité des systèmes de protection puisse être dépassée ou que ces derniers puissent connaître une défaillance, nécessite la mise en place de mesures complémentaires. Fournir des prévisions de crues fait également partie des stratégies de gestion des crues et de développement, qui prévoient qu'il existe pour certaines plaines inondables habitées des mesures non structurelles qui peuvent être efficaces. Cela peut inclure l'utilisation de défenses temporaires (barrières anti-inondation ou barrières démontables), de protections pour les maisons (sacs de sable) et l'évacuation des populations locales (vers des refuges spécialement prévus en cas d'inondations).

La gestion des crues nécessite un degré variable d'intervention de la part de l'organisme de gestion de l'eau, des autorités locales ou municipales, des

services chargés des transports et des communications ainsi que des services d'urgence. La prévision des crues doit fournir des informations à ces utilisateurs pour qu'ils se préparent et sachent comment réagir : dans les cas les plus extrêmes, la prévision des crues constitue un élément parmi d'autres de la structure de gestion des catastrophes au sens large, qui incombe au plus haut niveau de l'État.

Le rôle précis de la prévision des crues variera selon des circonstances dictées à la fois par l'environnement hydrométéorologique et l'environnement bâti. Les villes posent des problèmes différents par rapport aux zones rurales : la localisation des zones à risque en matière d'inondations par rapport aux rivières, aux côtes et aux chaînes de montagnes a une incidence significative sur les types de prévisions de crues concernés, ainsi qu'il est précisé au point 1.3.2. La nature des événements de crue est également importante, en particulier s'agissant de savoir si leur occurrence est régulière, comme dans le cas de climats saisonniers hautement prévisibles, tels la mousson ou la saison des ouragans, ou irrégulière, comme lors d'épisodes d'orages violents. Il n'y a donc pas de schéma type pour un système de prévision des crues, et l'équilibre entre les composantes spécifiques, par exemple les prévisions météorologiques et hydrologiques, la magnitude et la période de l'événement, doivent être adaptés aux circonstances. Au sein d'un pays donné, un certain nombre de types de crues différentes peuvent être rencontrés et chacun d'entre eux nécessitera une approche de prévision différente. Ainsi, le cours supérieur des rivières peut nécessiter un système orienté sur les crues éclair, tandis que les zones de plaines inondables devront tabler sur un système focalisé sur une lente montée des eaux conduisant à l'inondation.

#### 1.4 **CONSIDÉRATIONS FONDAMENTALES CONCERNANT LES SYSTÈMES DE PRÉVISION ET D'ANNONCE DES CRUES**

##### 1.4.1 **Définition des systèmes de prévision et d'annonce des crues**

Pour constituer un système de prévision des crues en temps réel efficace, les structures de base doivent être mises en relation de façon organisée. Pour ce faire, les éléments suivants sont nécessaires :

- (a) Fourniture de prévisions spécifiques concernant les précipitations en termes de quantité et d'échéance, pour laquelle des modèles de prévision météorologique numérique sont indispensables ;
- (b) Établissement d'un réseau de stations hydro-métriques manuelles ou automatiques, reliées à un centre de commande par tout type de télémesure ;

- (c) Logiciel de modélisation des prévisions de crues, relié au réseau d'observation et fonctionnant en temps réel.

Les annonces de crues sont distinctes des prévisions, car elles sont émises lorsqu'un événement survient ou est imminent. Les annonces de crues doivent être transmises à un certain nombre d'utilisateurs pour diverses raisons. Voici quelques-unes de ces raisons :

- (a) Faire en sorte que les équipes d'intervention et le personnel d'urgence soit prêts à intervenir ;
- (b) Alerter la population sur la période et la localisation de l'événement ;
- (c) Alerter les personnes des impacts prévisibles concernant, par exemple, les routes, les habitations et les structures de défense anti-inondations ;
- (d) Donner aux personnes et aux organisations le temps de mettre en place les actions préparatoires ;
- (e) Dans les cas extrêmes, donner l'ordre de se préparer à évacuer et communiquer sur les procédures d'urgence.

Une annonce précoce de crue peut sauver des vies, du bétail et des biens et contribuera toujours à réduire l'impact global. Les annonces de crues doivent être comprises rapidement et sans ambiguïté. Par conséquent, une grande attention doit être apportée au moyen de véhiculer au mieux les informations techniques au personnel non spécialiste des organisations, au public, aux médias et, dans certains cas, à des groupes de population illettrés.

Il existe un certain nombre de caractéristiques communes à tous les systèmes de prévision et d'annonce des crues qui ont trait aux causes, aux impacts et aux risques. Les caractéristiques essentielles et secondaires suivantes requièrent toute votre considération.

#### 1.4.2 **Considérations météorologiques**

Les phénomènes météorologiques constituent la cause naturelle première des inondations, que ce soit sous la forme de pluies, de neige ou d'eaux de fonte. Il est évident que la capacité à prévoir les événements extrêmes, à la fois de façon temporelle, spatiale et quantitative, constitue un atout majeur en matière de prévision et d'annonce des crues. Les connaissances météorologiques nécessaires pour traiter la question de l'annonce des crues sont principalement de deux ordres, notamment la climatologie associée aux inondations et la météorologie opérationnelle. Le Service météorologique national devrait logiquement être le plus à-même en termes d'équipement pour fournir les deux, sans doute avec l'aide des organismes de recherche appropriés.

La climatologie inclut la compréhension des systèmes précipitants, de leur saisonnalité et du caractère extrême de leur comportement. La compréhension des types de systèmes météorologiques qui peuvent être à l'origine des inondations contribuera largement aux décisions devant permettre de déterminer quels systèmes d'observation et de prévision sont nécessaires. Ainsi, dans une zone aride, où les crues éclair prédominent, les équipements d'observation et de prévision doivent se focaliser sur l'identification rapide de l'événement. Pour ce faire, le moyen le plus efficace est le satellite ou le radar, alors qu'une prévision synoptique à grande échelle présente un intérêt limité.

Comprendre la saisonnalité des systèmes précipitants est très important d'un point de vue opérationnel, et ceci aura une incidence sur les missions du personnel, l'organisation de l'alerte et les modalités de travail associées. Pour les régions où la saison des pluies est bien définie, par exemple en Asie (mousson), en Afrique tropicale et en Amérique centrale, il convient de faire en sorte que les besoins en effectifs soient couverts pour permettre des mises à jour régulières de la situation et une surveillance 24 heures sur 24 en cas de conditions extrêmes. Néanmoins, dans les zones tempérées et continentales, l'occurrence des événements de crues est plus aléatoire. Ainsi, une certaine flexibilité au sein des organisations est nécessaire afin que le personnel puisse accomplir, comme il se doit, son rôle en termes d'annonce des crues, même si ses tâches quotidiennes peuvent être diverses.

Les statistiques hydrométéorologiques (principalement les précipitations, mais aussi l'évaporation) sont essentielles pour les opérations de prévision et d'annonce des crues et elles sont généralement traitées indépendamment des données de climatologie. L'objectif des données et des statistiques est d'estimer la gravité et la probabilité des événements recensés ou prévus et de les mettre en perspective. Des observations à long terme sont capitales et cela nécessite des investissements pour installer et entretenir des réseaux de pluviomètres (en complément des stations d'évaporation et/ou climatologiques), pour garantir le personnel et les équipements nécessaires au traitement et à l'analyse des observations, et pour maintenir une base de données flexible et accessible.

La disponibilité de données hydrométéorologiques est également vitale en temps réel pour faire fonctionner les systèmes de prévision et d'annonce des crues. Il est important qu'une proportion représentative du réseau de pluviomètres communique par télémessure avec le centre de contrôle de prévision et d'annonce des crues. Il y a trois raisons à cela :

- (a) Permettre au personnel de surveiller la situation d'une façon générale ;
- (b) Émettre des annonces de crue suivant des seuils indicateurs ou de déclenchement en fonction de l'intensité des précipitations et/ou les cumuls de précipitations ;
- (c) Fournir des données aux modèles de prévision, en particulier pour les modèles pluie-débit.

#### 1.4.3 **Considérations hydrologiques**

Les exigences concernant les informations hydrologiques pour un système de prévision et d'annonce des crues sont similaires à celles formulées pour la météorologie, dans la mesure où il est nécessaire d'avoir une bonne compréhension globale des caractéristiques globales des crues de la région ainsi que de disposer d'informations en temps réel à des fins opérationnelles. Les principales exigences en matière d'observations et de données concernent le niveau d'eau des lacs et rivières, le débit des rivières et, dans certains cas, le niveau des nappes souterraines. Le rôle des stations d'observation est double : fournir des données pour les statistiques sur le long terme et envoyer par télémétrie des données au centre de commande. Les différences de niveaux d'eau à des points donnés peuvent correspondre à diverses extensions des inondations. Ainsi, une série de seuils peut être paramétrée pour fournir des alarmes par télémétrie. La relation amont-aval entre les niveaux d'eau est un moyen de prévision important. Les premiers systèmes d'annonce de crues reposaient sur la connaissance de la relation entre les niveaux d'un point en amont et les niveaux résultants à un point donné menacé d'inondations à l'aval, ainsi que du temps de propagation de la crue entre les deux points. Ils étaient présentés sous forme de tableaux ou de graphiques de corrélations de niveau-à-niveau et de temps de parcours. Les développements de la modélisation des crues en temps réel offrent désormais des informations plus complètes concernant les prévisions de niveaux, la période de la crue et l'étendue des inondations.

#### 1.4.4 **Nature des risques et des impacts**

Le risque peut être défini par la probabilité de conséquences néfastes telles que le nombre de blessés potentiels, les dégâts sur l'environnement, les pertes en vies humaines, biens et moyens de subsistance, suite aux interactions entre les aléas naturels ou humains et la vulnérabilité des conditions. Les risques de crue sont liés aux incertitudes hydrologiques, qui sont inextricablement liées aux incertitudes sociales, économiques et politiques. En fait, s'agissant de déterminer le risque futur de crue, les changements les plus importants et les plus imprévisibles sont susceptibles de résulter de la croissance de population et de l'activité économique.

Ceci peut être démontré par l'évolution historique de l'adaptation aux inondations, alors que la résilience des populations principalement rurales s'est perdue dans nos sociétés plus complexes. La gestion des risques de crues est composée d'actions systématiques suivant un cycle de préparation, d'intervention et de restauration. Elle doit rentrer dans le cadre de la Gestion intégrée des ressources en eau (GIRE). La gestion du risque exige l'identification, l'évaluation et la réduction du risque, voire la suppression des risques inacceptables au moyen de politiques et pratiques adaptées.

Les activités d'annonce de crues visent essentiellement à résoudre certains problèmes techniques en cas d'inondations, par exemple dans une fourchette de probabilités. Des systèmes de surveillance, de modélisation ou opérationnels peuvent être mis en œuvre par rapport à ces risques et impacts potentiels connus. En particulier, ces activités se focaliseront sur certaines parties de la population, des infrastructures et des moyens de communications essentiels et sur la nécessité d'effectuer des interventions efficaces en cas de crue. Les crues et, par conséquent, leurs impacts sont variables de par leur ampleur. Ainsi, un système de prévision et d'annonce des crues doit être en mesure de faire face à une gamme d'événements d'ampleur différente. Ceux-ci peuvent varier : d'inondations localisées à faible impact, pouvant être gérées par des mesures relativement simples, telles que l'installation de protections temporaires, de portes et barrières anti-inondations, à des inondations à plus grande échelle lors desquelles les biens peuvent subir des dégâts et des pertes, des fermetures de routes et de voies de chemin de fer peuvent survenir et l'évacuation des zones à risque peut être décidée. Les mesures de protection et de remédiation des crues sont conçues ou planifiées pour être efficaces jusqu'à une certaine limite qui peut être fixée selon une probabilité spécifique. Ces mesures dépendent d'une décision économique liée au rapport entre les frais à engager et les pertes potentielles. Les critères habituels de conception des mesures de protection sont de 100 ans (un événement considéré comme ayant un pour cent de chance de survenir lors d'une année donnée) pour les zones urbaines dotées de grandes infrastructures, 50 ans (deux pour cent) pour les concentrations de population moins importantes et les moyens de transport, 20 ans (cinq pour cent) pour les zones rurales et les structures de protection mineures.

Au-delà des limites de conception du système de gestion des crues pour lesquelles les mécanismes ont été prévus et en particulier lors d'événements catastrophiques, par exemple lors de la rupture d'un barrage ou d'une digue, certains aspects de la fourniture de prévisions et d'annonces des crues peuvent ne pas être pleinement efficaces. Cependant, il est important, dans de telles situations, de disposer

de systèmes de surveillance suffisamment fiables, car certaines observations en continu seront vitales pour les équipes d'intervention d'urgence et les activités de secours. À cet égard, la résistance des instruments de surveillance, de leur structure et des équipements de télémessure, revêtent une importance considérable, notamment lorsque les observations sur le terrain deviennent impossibles.

#### 1.4.5 **Diffusion des prévisions et des annonces**

Une diffusion efficace des prévisions et annonces de crues est très importante. Un équilibre doit être trouvé entre l'information au public et l'information aux autres organismes concernés par la gestion des crues. Historiquement, cela a résulté en une dichotomie pour les services d'annonce des crues, qui doivent répartir leurs ressources entre les services pour la collectivité et pour le gouvernement. Ce sujet a fait l'objet de critiques sévères à la lumière des défaillances passées en termes de livraison de service. Ainsi, la langue utilisée et le type d'informations transmises doivent être soigneusement réfléchis et structurés. Le confinement des informations de prévision et d'annonce des crues aux autorités, à savoir le gouvernement, a été graduellement abandonné pour une implication plus directe des populations. Ceci a été facilité par l'expansion des télécommunications, l'informatique, la révolution des technologies de l'information et l'augmentation de la couverture médiatique et du nombre de postes de radio et de télévision. Toutefois, il est important de maintenir un large éventail de diffusion et de ne pas se laisser séduire par les approches *high-tech*. Même dans les sociétés techniquement avancées, il n'est pas certain que la communication par Internet des informations d'annonce des crues puisse être entièrement efficace. Les personnes âgées ou démunies de la collectivité n'ont pas nécessairement l'équipement indispensable à domicile et il n'est pas sûr du tout non plus que les personnes consultent les sites Internet lors d'une situation dangereuse. Il convient également de se souvenir que ces systèmes dépendent des télécommunications et des connexions électriques qui sont elles aussi susceptibles de connaître des défaillances durant les inondations.

Une approche uniquement axée sur des moyens sophistiqués et des méthodes *high-tech* n'étant pas souhaitable, certains équipements alternatifs doivent être prévus. Par le passé, dans la plupart des régions du monde, les services d'urgence (police, pompiers, protection civile) ont toujours été étroitement liés aux opérations de secours lors des crues. Leur rôle peut évoluer avec les progrès de la technologie mais ils doivent nécessairement être impliqués dans la communication des annonces de crues et les opérations de secours. Les autres systèmes d'alerte généraux, tels que les équipes de

première intervention et les sirènes d'alarme ne doivent pas être abandonnés sans que les conséquences d'une telle décision n'aient été soigneusement étudiées.

#### 1.4.6 **Aspects institutionnels**

Un système de prévision et d'annonce des crues doit proposer des rôles et responsabilités clairement définis. Ils sont divers et variés, incluant, entre autres, la collecte de données, la formulation et la diffusion des prévisions, l'incertitude des résultats et les éventuelles exigences de responsabilité et obligations juridiques. Quelles que soient les responsabilités fonctionnelles et opérationnelles des organismes individuels impliqués dans la prévision et l'annonce des crues, une responsabilité fondamentale incombe au gouvernement central en matière de gestion de la sécurité publique et des urgences. Le gouvernement n'a, toutefois, pas toujours d'obligation régaliennne de protéger les terres et les biens contre les inondations, mais le gouvernement reconnaît la nécessité de mesures pour préserver le bien-être social et économique du pays au sens large. Les autorités coordinatrices peuvent détenir des obligations sans pour autant avoir d'obligation légale de réaliser ou de maintenir en état des mesures de protection contre les crues dans l'intérêt des populations. Cependant, de telles responsabilités peuvent être intégrées à la législation par le biais de lois et de réglementations en vertu desquelles les différents services gouvernementaux opèrent. Lors de l'établissement ou de l'amendement de la législation, il est donc extrêmement important que les interfaces entre les devoirs et obligations des services affectés soient soigneusement considérées avant l'entrée en vigueur de ces actes réglementaires.

La structure et la responsabilité institutionnelles peuvent devenir compliquées pour les raisons suivantes. Plusieurs ministères peuvent gérer des responsabilités distinctes dans le cadre d'activités liées à la prévision et à l'annonce des crues. En outre, au sein des organisations chargées de la mise en œuvre, les activités de prévision et d'annonce des crues peuvent représenter simplement une partie de leurs responsabilités globales. Les exemples suivants illustrent les complexités possibles pouvant survenir.

Royaume-Uni : Les prévisions météorologiques sont fournies à l'Agence pour l'environnement (responsable de la prévision et de l'annonce des crues) par le Met Office, qui dépend du Ministère de la Défense. L'Agence pour l'environnement fait partie du Ministère de l'Environnement, de l'Alimentation et des Affaires rurales du Royaume-Uni. Bien que l'Agence pour l'environnement émette des annonces de crue, elle n'est pas responsable des interventions sur le terrain. Cela est surtout du ressort des autorités locales (Département des

collectivité et des autorités locales) et des services d'urgence (Ministère de l'Intérieur britannique).

**Bangladesh :** Certaines informations météorologiques sont fournies au Centre de prévision et d'annonce des crues (FFWC) par le Département météorologique du Bangladesh (BMD), qui fait partie du Ministère de la Défense. Le FFWC est une unité qui dépend du Département d'hydrologie (Conseil de développement de l'eau), géré par le Ministère des Ressources en Eau. Les interventions et actions post-crue de remise en état sont partagées par de nombreux ministères et départements et la coordination s'organise via le Bureau de gestion des catastrophes, qui dépend du Ministère de l'Alimentation et de la Gestion des Catastrophes.

**Papouasie-Nouvelle-Guinée :** Cet exemple fait référence à la situation à la fin des années 80. Les annonces de crues étaient essentiellement gérées par les autorités locales individuelles, avec une coordination globale du Ministère des Travaux Publics. Des avis de temps violent avaient été fournis par le Bureau de la météorologie, qui dépendait du Ministère des Ressources minérales et de l'Énergie, tout comme le Bureau des ressources en eau, qui était responsable de la collecte des données hydrologiques, y compris les précipitations. Par la suite, le Bureau de la météorologie est passé sous la responsabilité du Département de l'aviation et le Bureau des ressources en eau est passé sous le contrôle du Ministère de l'Environnement.

Un certain nombre de pays disposent d'un service hydrologique et météorologique conjoint, par exemple la Fédération de Russie, l'Islande, certains pays d'Europe de l'Est et le Népal. En théorie, cela permet de résoudre plus facilement les problèmes de collecte, d'utilisation et de diffusion des données qui peuvent survenir lorsqu'une organisation collecte les données atmosphériques et qu'une autre fournit les données sur les niveaux de précipitations et des rivières. Dans la plupart des cas, les données pluviométriques sont collectées à la fois par les agences météorologiques et hydrologiques et le type de données relevé dépend de facteurs historiques ou de la nécessité prioritaire d'obtenir des données pluviométriques. Au Sri Lanka, les données pluviométriques sont collectées par le Département météorologique dans le cadre de leurs attributions agrométéorologiques, par le Département de l'irrigation et par le Département de l'agriculture.

La prévision et l'annonce des crues en tant qu'activité spécifique du secteur hydrométéorologique a été développée relativement récemment. Cela révèle sans doute une prise de conscience croissante concernant l'impact des crues, à la fois en termes d'investissements financiers et de pression sur les populations. Précédemment, au Royaume-Uni, en France et dans

d'autres pays européens, les moyens de réponse se limitaient aux dispositifs de protection anti-inondations et à la vigilance par rapport aux événements violents annoncés par les services météorologiques nationaux. Cependant, la survenance d'un certain nombre d'événements météorologiques extrêmes entre 1995 et 2003 ont conduit à la mise en service de centres nationaux de prévision et d'annonce des crues. Ceci a permis de favoriser le développement des réseaux de surveillance, notamment à des fins de prévision et d'annonce de crues. Les réseaux hydrologiques utilisent des instruments dotés de moyens électroniques pour le stockage et la transmission des données (pluviomètres et limnigraphes enregistreurs) et la mission météorologique a été axée sur la collecte et la fourniture de données satellite et radar.

#### 1.4.7 **Aspects juridiques**

Tout système de prévision et d'annonce des crues doit gérer le facteur de l'incertitude. Il s'agit d'un élément inhérent à la nature des phénomènes météorologiques et hydrologiques concernés. Ceci vient s'ajouter aux incertitudes liées aux équipements et à la possibilité d'erreur humaine dans le cadre d'une structure opérationnelle. L'incertitude peut être prise en compte dans les processus de conception et de planification, où une décision est prise en fonction du niveau d'incertitude, à savoir le risque de défaillance acceptable. Il s'agit ensuite de trouver le bon équilibre entre le coût des dispositifs de protection par rapport aux pertes potentielles liées aux dégâts. À l'exclusion des installations clés comme les sites de sécurité nationale ou les usines nucléaires pour lesquels une «protection totale» est nécessaire, les aspects de l'incertitude peuvent être abordés par des méthodes probabilistes. L'approche probabiliste est de plus en plus utilisée dans le cadre des analyses de risques, lorsque l'impact et les conséquences en termes humains et économiques sont reliés aux caractéristiques météorologiques et hydrologiques.

La responsabilité en termes strictement juridiques est difficile à appliquer aux diverses activités de prévision et d'annonce des crues. Tandis que la responsabilité d'un entrepreneur peut être engagée en cas de défaillance d'un dispositif de protection anti-inondations (par exemple un barrage ou un mur anti-crue) tout comme celle d'un fabricant dont le produit ne respecte pas les spécifications en termes de résistance aux inondations ou d'imperméabilisation, la plupart des systèmes et codes juridiques nationaux et internationaux considèrent les inondations et les causes de celles-ci comme des «cas de force majeure». La responsabilité concernant les inondations tend à opérer en sens «inverse», c'est-à-dire que les indemnisations ou les réparations pour les pertes et les dégâts peuvent ne pas être accordées s'il est prouvé qu'il y a eu une certaine forme de négligence au



niveau de l'installation ou que des directives ont été ignorées. Dans bon nombre de pays, les agences gouvernementales ou internationales peuvent fournir des indemnités ou de l'aide pour la reconstruction, mais elles ne font l'objet d'aucune obligation légale. Les assurances jouent de plus en plus le rôle du gouvernement dans les actions de recouvrement, en particulier dans les pays développés où un accord commercial a été négocié. Toutefois, l'utilisation

accrue des assurances suppose que, dès lors que des événements surviennent, les frais des compagnies d'assurance augmentent, d'où une hausse des cotisations. Cette situation conduit également les compagnies d'assurance à devoir statuer sur ce qui peut ou ne peut pas être assuré en fonction du risque, d'où une situation où des habitations situées dans des zones à haut risque de crue deviennent impossibles à assurer.

---



## CHAPITRE 2

# PRINCIPAUX ASPECTS DES SYSTÈMES DE PRÉVISION DES CRUES

### 2.1 CONSIDÉRATIONS DE BASE

La reconnaissance de la nécessité de systèmes de prévision et d'annonce des crues témoigne de la réalité des limitations des mesures structurelles de protection anti-inondations. En raison de l'existence de populations et autres biens matériels dans des zones propices aux inondations et de la nécessité de répondre aux attentes actuelles des communautés en termes de sécurité et de protection des actifs, la fourniture d'un système de prévision et d'annonce des crues adapté devient un besoin pressant dans la plupart des pays. Les services de prévision et d'annonce des crues offrent nombre d'avantages au niveau local, mais, à grande échelle, ils opèrent en soutien des services de protection civile et d'intervention d'urgence. Les services de prévision et d'annonce des crues sont, dans la plupart des cas, des services d'État et leur principal but est de fournir des informations fiables et en temps opportun aux services de protection civile et au grand public. Cette mission doit s'accomplir dans des délais suffisants pour permettre aux populations de prendre toutes les mesures adéquates et se protéger des inondations.

L'objectif d'un service national de prévision des crues est de fournir une gamme complète de prestations sur l'ensemble du territoire national. Cela peut ne pas toujours être possible et il faut souvent trouver un compromis, ce qui suppose un degré de sophistication moindre du service ou de l'équipement dans les zones moins exposées, ou une décision d'utiliser une approche par étapes qui se focalise d'abord sur les zones où le risque est élevé.

Pour concevoir un service de prévision et d'annonce des crues, il est nécessaire de comprendre :

- (a) Les caractéristiques hydromorphologiques du bassin hydrographique, la topographie, la géologie et les sols, ainsi que le degré de développement des infrastructures ;
- (b) Les principaux processus physiques qui se produisent lors d'événements hydrométéorologiques ;
- (c) Le type de service nécessaire ou réalisable techniquement et économiquement.

Les points (a) et (b) sont des éléments liés aux conditions physiques des bassins hydrographiques concernés, tandis que le point (c) concerne des considérations organisationnelles et opérationnelles. Chaque point sera examiné dans les sous-sections suivantes.

### 2.1.1 Types de bassins hydrographiques

Il existe une grande variété de bassins et systèmes hydrographiques dans le monde et, dans une mesure variable, ils ont leurs propres particularités, réagissant de façon très spécifique aux fortes pluies, aux orages ou aux effets combinés des événements météorologiques marins et terrestres. En général cependant, il est possible de définir cinq grands types de bassins hydrographiques caractérisés par leurs différentes réponses spatiales et temporelles à un événement hydrométéorologique :

- (a) Les bassins urbains de très petite taille (quelques kilomètres carrés), à forte densité de population et dotés d'une grande proportion de surfaces imperméables qui réagissent suivant un délai de l'ordre d'une à deux heures et dont l'écoulement peut dépasser la capacité du réseau d'évacuation des eaux pluviales ;
- (b) Les bassins versants supérieurs et les bassins hydrographiques (de petite à moyenne taille), dont la superficie est comprise entre 10 et 500 kilomètres carrés, et les délais de réaction sont de quelques heures. Ces bassins hydrographiques de montagne aux pentes abruptes ont des délais de réaction très rapides ;
- (c) Les rivières de taille moyenne dotées de bassins versants de 500 à 10 000 kilomètres carrés, caractérisées par une propagation de l'écoulement sur de longues distances et une contribution variable des affluents. Pour ces bassins, la crue peut prendre plusieurs jours avant d'affecter les tronçons inférieurs. Les bassins et les rivières continentales dotés de bassins hydrographiques supérieurs à 10 000 kilomètres carrés forment un sous-ensemble de grandes rivières pour lequel le temps de parcours de l'onde de crue se mesure en semaines et reflète les conditions météorologiques saisonnières globales ;
- (d) Le cas très spécifique des estuaires, sous l'influence combinée des marées de tempêtes, des effets des marées et de la crue arrivant de l'amont. Dans le cas des larges estuaires, le niveau d'eau peut être fortement affecté par les vents forts. Les délais de propagation dans les estuaires sont de l'ordre de plusieurs heures lorsque la crue fluviale prédomine, en fonction de la longueur du fleuve en amont ;
- (e) Les systèmes hydrographiques influencés par les eaux souterraines et sujets à de longues fluctuations périodiques de la nappe phréatique. Ceci peut générer des inondations de longue durée, durant plusieurs semaines dans certains cas.

**Interaction entre la taille du bassin hydrographique, le processus physique et le temps de parcours de l'onde de crue**

Type de bassin hydrographique	Processus physique						
	Vent	Infiltration	Intensité des précipitations	Ruissellement	Propagation	Marée et surcote	Niveau de la nappe
Urbain		X	XXX	XXX	X		
Partie amont du bassin		XX	XX	XXX	X		
Longue rivière	X		X	XX	XXX		X
Estuaire	XXX				XX	XXX	
Aquifère	X			X		X	XXX

XXX : effet dominant    XX : effet perceptible    X : effet mineur

**2.1.2 Processus physiques**

La nature de tout service de prévision qui peut être fourni dépend avant tout des types de processus d'inondations se produisant au niveau du bassin. Le tableau ci-dessus illustre ces processus et indique clairement que tout service de prévision doit pouvoir s'adapter à toute une gamme de bassins différents.

Par exemple, les bassins supérieurs sont caractérisés par une réaction rapide aux précipitations intenses, qui peut être amplifiée si l'infiltration dans le sol est réduite en raison d'une saturation du bassin. Les volumes de crue, qui se propagent vers l'aval, reçoivent aussi la contribution apportée par les différents affluents du haut bassin. La réduction de l'infiltration dans le sol liée à l'urbanisation constitue un facteur plus important encore pour les petits bassins hydrographiques qui, dans tous les cas, sont exposés à une réaction rapide.

Les bassins urbains présentent des caractéristiques hautement spécifiques de par la superficie des zones revêtues et la capacité – ou le déficit de capacité – des systèmes d'évacuation des eaux pluviales. L'intensité des précipitations est un facteur significatif de la genèse des inondations et récemment ce type d'inondations a été appelé « inondation pluviale ». Des études récentes menées par le Ministère de l'Environnement, de l'Alimentation et des Affaires rurales (Defra) au Royaume-Uni, ont analysé les seuils de précipitations critiques qu'il pourrait être intéressant de connaître dans le cadre de toute application de prévision pluviométrique et pour l'identification des « points chauds » inondables, bien souvent dans les quartiers situés en contrebas des villes ou dans les zones où l'évacuation des eaux de surface est insuffisante.

Ainsi, les processus majeurs, à la fois dans les parties supérieures des bassins versants et en zone urbaine sont liés à l'interaction de l'infiltration et du ruissellement qui se combinent pour générer de

fortes concentrations des écoulements dans les tronçons inférieurs des rivières et les zones topographiques basses. Dans le cas des longues rivières, ayant de par leur nature de larges superficies de bassins hydrographiques, l'organisation des crues des sous-bassins et leur manière de s'associer, à savoir l'occurrence de pics soit à des moments séparés soit de façon quasi-synchrone, affectera la façon dont la crue peut se propager vers les tronçons inférieurs. Des complications peuvent survenir lorsque les tronçons inférieurs des rivières débouchent dans des estuaires, car les marées et les vents peuvent contrarier de façon significative la progression des pointes de crue. Dans certains grands bassins hydrographiques, il peut également exister des zones importantes où les aquifères modifieront la propagation de l'onde de crue en fonction des caractéristiques des eaux souterraines. Celles-ci peuvent réduire la réaction initiale à un événement pluviométrique ou de fonte des neiges, mais le débit retardé des eaux souterraines pourra prolonger la durée des inondations dans les tronçons inférieurs du système hydrographique.

Les processus décrits ci-dessus peuvent être surveillés et prévus en combinant observation et modélisation, et il est nécessaire de concevoir un service de prévision et d'annonce des crues sur la base d'un ensemble de conditions données. Chaque type de crue de bassin hydrographique nécessitera une approche différente au niveau des équipements de surveillance et de modélisation. Les bassins hydrographiques situés en montagne et en milieu urbain présentent des défis particuliers pour garantir des délais de réaction suffisants. Ainsi, l'accent doit être mis sur l'efficacité de l'observation en temps réel et la rapidité de transmission et de traitement des données. Dans ces zones, il est important de disposer d'observations et de prévisions météorologiques de bonne qualité qui peuvent être utilisées pour générer de façon anticipée des estimations de crue par modélisation. Une compréhension exhaustive du comportement des

précipitations localisées très intenses et la capacité des structures d'évacuation des eaux pluviales deviennent des enjeux majeurs.

Dans les zones où les bassins versants sont plus grands, les délais associés aux prévisions et observations pluviométriques peuvent ne pas être aussi essentiels, et dans les très grands bassins, un échantillonnage de données à des intervalles de quelques heures peut être suffisant. Certains grands bassins versants peuvent présenter des problèmes de «blocage de l'évacuation des eaux», qui surviendra lorsque le niveau de la rivière principale est haut, empêchant ainsi la crue de s'écouler des plus petits bassins hydrographiques et des zones adjacentes moins élevées. Dans ces cas, les observations pluviométriques locales relevées par pluviomètres télétransmis ou par radar, revêtent une importance considérable car le temps de parcours de l'onde de crue au niveau local différera de celui constaté dans la majeure partie du bassin hydrographique.

Un exemple intéressant s'est produit au Royaume-Uni dans la ville de Hull en juin 2007. Hull se situe à l'embouchure d'un grand estuaire et est entourée de zones basses. Les rivières y sont donc fortement contrôlées et influencées par le blocage des marées. Une période prolongée de fortes pluies avait provoqué une montée des rivières avoisinantes à un tel niveau que des «alertes locales» avaient été émises. Cependant, même si les niveaux continuaient de monter, cette montée était lente et le niveau de seuil maximum nécessitant l'émission d'une «annonce de crue» n'était pas encore atteint lorsque de fortes pluies localisées se sont abattues sur la ville et ont provoqué des inondations urbaines majeures. De fortes perturbations et de gros dégâts s'ensuivirent car les autorités s'étaient largement appuyées sur les annonces de crue (fluviale) et qu'aucun système spécifique n'était en place pour les fortes précipitations et le débordement des réseaux.

### 2.1.3 Type de service

La forme la plus perfectionnée de service de prévision et d'annonce de crues qui puisse être fournie concerne l'extension de la zone inondable et sa profondeur. Même dans les pays très développés, il n'est pas possible d'offrir ce niveau de service à l'échelle de tout le territoire. Les limitations concernant le niveau de service sont largement dictées par le coût et la complexité de la modélisation, mais les raisons suivantes peuvent également influencer le choix du niveau de service pertinent à adopter :

(a) Il existe trop peu de sites à la fois vulnérables aux inondations ou d'une certaine importance économique dans le bassin pour justifier la mise en œuvre d'une instrumentation exhaustive et coûteuse ;

- (b) La nature des conditions hydrométéorologiques dans le bassin ne génère pas suffisamment d'événements extrêmes ou pas assez fréquemment pour justifier l'investissement, par exemple dans les régions arides et semi-arides ;
- (c) Malgré la connaissance de la réaction hydrologique du bassin, les moyens les plus modernes de surveillance et de modélisation hydrologique ne sont pas assez performants pour produire des prévisions suffisamment précises, par exemple dans les zones urbaines ;
- (d) Le niveau de développement et les conditions économiques d'un pays ou d'une région sont insuffisants pour mettre en place et entretenir des services techniques.

Le type et le niveau de service qui peuvent être fournis représentent donc un équilibre entre la faisabilité technique des prévisions des risques de crues et la justification économique de la protection des populations, des zones d'importance et des infrastructures vulnérables. Les différents types de services, des services minimaux de base aux services de qualité optimale, peuvent être résumés comme suit :

- (a) Alerte de crue en fonction de certains seuils : Ce service peut être basé sur des mesures en temps réel le long des rivières. Il ne s'agit pas d'une prévision quantitative mais d'une estimation qualitative de l'augmentation du débit ou du niveau de la rivière. Aucun modèle hydrologique ou hydrodynamique n'est requis, car les tendances sont extrapolées au prorata pour estimer si et quand les seuils critiques peuvent être atteints. Les informations de base nécessaires sont la connaissance du comportement de la rivière, à savoir l'hydrogramme de crue à des points d'observation spécifiques. Les extrapolations sont réalisées à des intervalles de temps pour réviser la prévision des conditions de crue potentielles ou en cours.
- (b) Prévision de crues : Il s'agit d'un service beaucoup plus complet basé sur l'utilisation d'outils de simulation et de la modélisation. Ce moyen de simulation peut inclure des méthodes simples telles que les courbes statistiques, les corrélations de niveau-à-niveau ou les relations entre les temps de parcours. Ces méthodes peuvent toutes permettre une prévision quantifiée et temporelle du niveau d'eau pour fournir un avis de crue d'un indice de confiance et de fiabilité acceptable. Que cette approche simple soit utilisée ou une approche plus sophistiquée par le biais de modèles qui intègrent et répliquent le comportement des rivières sur l'ensemble du bassin, les outils de simulation doivent être étalonnés auparavant à l'aide des données historiques issues des crues passées enregistrées. Les méthodes de simulation doivent aussi être vérifiées et actualisées régulièrement pour s'assurer que

les relations du bassin hydrographiques restent correctement identifiées. Les informations fournies par un service d'annonce des crues ne visent pas uniquement les sites des stations, comme lors d'une alerte à la crue, mais peuvent être focalisées sur des sites à risque spécifiques.

- (c) Carte de vigilance : Il s'agit d'un développement de l'approche d'annonce par site spécifique décrite en (b). Dans un certain nombre de pays, les services d'annonce des crues produisent désormais une visualisation cartographique (par exemple, la «carte de vigilance» en France) sous forme de service Internet. Les niveaux de risque dérivés des observations ou des modèles sont caractérisés par un code couleur (dans l'exemple français, vert, jaune, orange et rouge) indiquant le degré de gravité de la crue annoncée.
- (d) Prévision d'inondations : Il s'agit du service le plus sophistiqué qui peut être proposé au public. Il nécessite l'association d'un modèle hydrologique ou hydrodynamique du niveau d'eau et du débit avec une représentation numérique de la surface du sol de la plaine inondable. Le niveau de détail et de précision du modèle de terrain dépend de la nature de la zone à risque. Le niveau de complexité le plus élevé doit être appliqué aux zones sensibles de la plaine inondable, où l'étendue de la crue est dictée par un faible relief, et aux zones urbaines. Ces

modèles ont la capacité de prévoir les inondations dans des zones très précises, par exemple les zones d'habitation ou les infrastructures majeures comme les centrales électriques et les ponts routiers ou ferroviaires. Le développement de cette approche nécessite également une connaissance exhaustive des grands événements de crue historiques.

#### 2.1.4 Délais de prévision

Les délais de prévision possibles dépendent du type de bassin hydrographique. Toutefois, le principe de base pour évaluer les exigences en termes de délais est la période minimum d'annonce nécessaire pour une mise en œuvre efficace des actions de préparation. Cela dépendra des besoins de la collectivité ou de la région cible. Les propriétaires individuels et les entreprises peuvent avoir besoin d'une à deux heures pour déplacer les articles de valeur aux étages supérieurs ou mettre des sacs de sable ou des petites barrières en place. La protection des infrastructures plus importantes, la mise en place de déviations routières et le déplacement des animaux de ferme en lieu sûr peuvent nécessiter des délais de plusieurs heures. S'agissant des grandes rivières dont les délais de réaction sont plus longs mais les impacts potentiels immenses, les durées nécessaires à l'évacuation des populations à risque peuvent être



«Carte de vigilance» du Gouvernement français pour le 17 décembre 2008

de l'ordre de plusieurs jours. Ainsi, le concept de délais doit être flexible et les délais minimum peuvent dépendre complètement de la structure du bassin hydrographique et des équipements de prévision et d'annonce des crues. Pour les petits bassins hydrographiques urbanisés, le temps de parcours de l'onde de crue peut être si court qu'il est extrêmement difficile de fournir un système d'annonce des crues efficace. Dans une situation à haut risque et impact élevé, le problème de la trop courte anticipation peut être résolu par la mise en place de systèmes sophistiqués d'alarme automatisée reliés à une modélisation hydrologique et hydraulique en temps réel.

Les trois situations suivantes illustrent certains des problèmes affectant les délais de prévision :

- (a) Dans le cas où seules des prévisions basées sur les hauteurs d'eau historiques sont disponibles, l'extrapolation de la hauteur d'eau sur une période de quelques heures est possible, en fonction des caractéristiques du bassin hydrographique et de la nature de l'événement en question.
- (b) Dans le cas où des données de pluviométrie télé-transmises ou des informations pluviométriques par radar sont disponibles, celles-ci peuvent permettre une anticipation supplémentaire. Dans ce cas, un prévisionniste expérimenté utilisant son expérience peut estimer les temps probables de propagation de la crue. Dans un système plus sophistiqué, les données peuvent être utilisées comme paramètres d'entrée dans un modèle de prévision hydrologique.
- (c) Dans le cadre de la situation décrite au point (b), des délais supplémentaires peuvent être fournis si un système de prévision de la pluviométrie est disponible auprès d'un service météorologique. Si cette prévision peut être utilisable par le modèle de prévision du bassin hydrographique, quelques heures peuvent être ajoutées aux délais de prévision de crue. Cela suppose un degré élevé de coopération officialisée entre le fournisseur du service météorologique et le service d'annonce des crues.

Pour illustrer ce dernier point, dans les bassins hydrographiques à réponse rapide des zones montagneuses du sud de la France, les délais de prévision pluviométrique fournis peuvent varier de 6 à 12 heures et le délai hydrologique (réponse du bassin hydrographique) avoisiner les 10 heures. Ainsi, le service local peut fournir une prévision du risque de crue avec un délai de 15 à 20 heures, qui est ensuite publiée sous forme de carte de vigilance, tel qu'illustré dans la figure ci-contre. Le niveau de vigilance le moins élevé, indiquant la probabilité d'une inondation à faible impact, est indiqué en jaune pour deux bassins hydrographiques.

De nombreux exemples de la présentation des délais et des informations concernant les prévisions et les annonces sont disponibles auprès des services nationaux d'annonce de crues. Des exemples types sont disponibles sur les sites Internet suivants :

- Royaume-Uni : <http://www.environment-agency.gov.uk/homeandleisure/floods>;
- France : <http://www.vigicrues.gouv.fr> ;
- Bangladesh : <http://www.ffwc.gov.bd>;
- États-Unis d'Amérique : <http://water.weather.gov/ahps/>
- Australie : <http://www.bom.gov.au/australia/flood/>

Quelques exemples de prévisions et d'annonce spécifiques sont présentés au chapitre 8.

## 2.2 EXIGENCES CONCERNANT LES DONNÉES

### 2.2.1 Exigences techniques générales

Les détails précis des exigences concernant les données dépendront de la nature spécifique du système d'annonce de crues et de ses objectifs. Ces détails seront abordés lors des chapitres suivants de ce manuel. Les exigences techniques globales d'un système de prévision des crues sont résumées ci-après (Bruen, 1999) :

- (a) Un sous-système de collecte de données en temps réel pour la réception et le traitement des informations pertinentes. Cela inclura les informations météorologiques, les données de débit aux sections de rivières jaugées appropriées (ou les hauteurs d'eau et les courbes de tarage) et au niveau des retenues, ainsi que les mesures d'humidité du sol, le cas échéant. Il pourra être nécessaire d'utiliser des stations de mesure manuelles ou automatiques, des plates-formes de collecte de données terrestres, des radars au sol, des satellites, des capteurs aériens et surtout un Système d'information géographique (SIG) pour présenter ces informations sous un format convivial ;
- (b) L'accès aux résultats d'un module de prévision météorologique numérique, à savoir les modèles de prévision numérique du temps (PNT) pour les données des prévisions météorologiques, par exemple la prévision quantitative des précipitations (PQP), durant les délais nécessaires du modèle de prévision de crue ;
- (c) Un module pour combiner de façon optimale les données provenant de diverses sources et pour fournir un moyen de contrôle pour le réécalage des outils et techniques de mesure, ainsi que pour l'initialisation de la correction des erreurs du modèle;
- (d) Un module de modélisation des bassins hydrographiques, intégré dans une interface

conviviale, pour estimer le débit total à la sortie du bassin hydrographique, aux intervalles de temps requis, y compris une évaluation des incertitudes;

- (e) Un module comprenant un modèle hydrodynamique ou hydrologique de propagation pour estimer le déplacement de l'onde de crue le long du cours d'eau, les hauteurs d'eau, les effets des ruptures de digues et du fonctionnement des retenues, ainsi que l'interaction avec la plaine inondable et les zones inondées, offrant ainsi une prévision des inondations liées à la crue ;
- (f) Un module de correction des erreurs intégrant un algorithme pour optimiser les estimations de débit basées sur la mise à jour des données fournies par le réseau de mesure;
- (g) Un module pour la modélisation des marées ou des estuaires si les effets de remontée influencent la crue ;
- (h) Des moyens de communications, des logiciels SIG et des systèmes d'aide à la décision appropriés, générant des prévisions détaillées à divers niveaux et des prévisions cartographiées indiquant les zones inondées en temps réel.

Certaines considérations générales complémentaires concernant les principaux types de données sont examinées dans les autres sections de ce chapitre.

### 2.2.2 Données hydrologiques

Ces données concernent essentiellement la mesure du débit et de la hauteur d'eau, et les instruments de surveillance doivent être capables d'enregistrer avec exactitude les valeurs maximales de ces deux paramètres. Un système de prévision des crues nécessitera un réseau de stations de mesure. Il existe un grand nombre de stations de mesure équipées d'instruments, allant des simples échelles limnimétriques aux dispositifs de détection Doppler ou à ultrasons pour mesurer la hauteur ou le débit des eaux. La composition du réseau de stations de mesure est déterminée par les exigences en termes de délais et de précision mais aussi par les emplacements où les prévisions doivent être effectuées (points de prévision). Les points de prévision coïncident généralement avec l'emplacement d'une station de mesure, en partie du fait de l'approche de modélisation et en partie pour permettre une vérification opérationnelle. Néanmoins, les points de prévision peuvent également être désignés pour un tronçon spécifique d'une rivière où l'impact des crues est potentiellement élevé, notamment aux abords des petites et grandes villes ou des zones agricoles. Dans le cas d'un point de prévision situé à une station de mesure, un étalonnage précis (relation hauteur-débit) doit être contrôlé régulièrement. Les stations de mesure aux points de prévision doivent avoir des liaisons télétransmises avec le centre de commande opérationnel.

### 2.2.3 Données météorologiques

L'intensité et la durée des précipitations, les prévisions de précipitations et des données historiques pour l'étalonnage des modèles pluie-débit sont toutes des données préalables nécessaires pour développer et opérer un système de prévision et d'annonce des crues. Les données et les prévisions météorologiques sont requises en temps réel pour optimiser les délais de réaction pour la prévision et l'annonce des crues. La distribution des précipitations est la variable principale parmi les données météorologiques et elle provient d'un réseau de pluviomètres ou d'une couverture radar. Ces données fourniront une meilleure estimation des précipitations pour la zone modélisée, soit sur un maillage, soit pour obtenir une moyenne de bassin.

Les techniques traditionnelles de prévision pluviométrique, basées sur des pluviomètres télétransmis et des radars météorologiques au sol (pour indiquer la répartition spatiale), sont toujours largement répandues. Ceci s'explique par le fait que les réseaux se sont développés progressivement à partir de vastes réseaux hydrométéorologiques conventionnels et qu'ils sont considérés comme rentables (Todini, 2001). Les trois principaux avantages liés à l'utilisation de données radar sont :

- (a) Une résolution spatiale plus précise du champ de précipitations ;
- (b) La disponibilité des données en temps réel ;
- (c) La possibilité de suivre les orages annoncés avant qu'ils n'atteignent la limite du bassin hydrographique concerné.

Le radar présente des avantages, notamment lorsque les pluviomètres sont rares et/ou que les orages sont localisés. Cependant, si les orages sont étendus, couvrant simultanément les sites de nombreux pluviomètres, ceux-ci tendent à générer des mesures de précipitations plus précises que le radar. Le radar donnera cependant toujours une meilleure indication de la répartition spatiale que celle obtenue par les méthodes classiques comme les polygones de Thiessen ou l'interpolation par krigeage.

Grâce à l'évolution rapide des technologies, il est fort probable que les capacités accrues des satellites météorologiques permettront bientôt de faire la distinction entre les nuages de glace et les nuages d'eau, entre les nuages bas et le brouillard, et qu'ils fourniront également des informations sur la structure verticale de l'atmosphère.

Les observations en temps réel des données climatologiques sont fréquemment utilisées pour calculer l'évapotranspiration utilisée dans les modèles hydrologiques. Outre les données en temps réel, pour être opérationnel, le modèle hydrologique à utiliser devra être calé avec les données



pluviométriques et climatologiques historiques couvrant une période prolongée de mesure.

Les modèles de prévision climatique numérique aux niveaux mondial, régional et local (modèle climatique régional – MCR ; modèles climatiques locaux ou à domaine limité – MCL) peuvent être utilisés pour fournir les prévisions pluviométriques qui serviront de données d'entrée pour les modèles de prévision de crues. Ces modèles peuvent faire partie de méthodes de prévision complexes pour fournir des PQPs, tel que le Système de prévision d'ensemble à court terme (STEPS – Short-Term Ensemble Prediction System) du Met Office du Royaume-Uni (Bowler et al., 2006), ou en tant que produits à valeur ajoutée dans le cadre de prévisions qualitatives pour faciliter la prise de décision lors de de la gestion d'une alerte de crue. Bien que les PQPs comportent une part d'incertitude considérable et qu'elles peuvent ainsi avoir un intérêt limité pour les modèles hydrologiques, leur utilisation peut prolonger de façon significative les délais de réaction. Elles sont porteuses d'espoirs pour l'avenir, si leur exactitude peut être suffisamment affinée.

#### 2.2.4 Données topographiques

Les données topographiques sont de plus en plus indispensables pour le développement des systèmes de prévision des crues, car les attentes augmentent vis à vis des modèles pour qu'ils fournissent des estimations réalistes de l'étendue des inondations. Il convient de distinguer les informations topographiques «conventionnelles», qui peuvent être obtenues à partir de cartes et utilisées pour délimiter des zones de bassins hydrographiques et les informations plus détaillées qui sont désormais disponibles grâce au modèle numérique d'élévation (MNE). Ces derniers sont disponibles auprès des organismes nationaux et internationaux à diverses définitions d'échelles horizontales et verticales. Les données satellites sont disponibles pour fournir des données au niveau mondial à une résolution horizontale de 90 mètres avec une résolution verticale de  $\pm 2$  mètres. Des données d'une résolution de 20 mètres à l'échelle horizontale et de 0,5 mètre à l'échelle verticale ou mieux encore peuvent être obtenues à partir de relevés effectués par télédétection par laser (ou laser altimétrique)(LIDAR – light detection and ranging) ou par radar aéroporté à visée latérale (SLAR - side-looking airborne radar) (Veneziano, 2002). Ces données MNE haute résolution peuvent être reliées à un SIG pour fournir une visualisation de l'étendue des inondations et de l'infrastructure des plaines inondables.

#### 2.2.5 Autres informations et données

Une large gamme de données et d'informations, ainsi que la façon de les utiliser dans le cadre d'un

système d'annonce de crues, doivent être considérées pour le développement d'un modèle de prévision de crues. Des données physiques sur les bassins hydrographiques, comme des données sur la géologie, le sol et la végétation (utilisation du sol) doivent aussi être utilisées pour estimer les paramètres des modèles hydrologiques dans le cadre du processus de calage. Autres informations utiles :

- (a) Population et données démographiques pour signaler les zones aménagées à risque ;
- (b) Inventaires des biens à risque ;
- (c) Règles de contrôle des retenues et des infrastructures de protection contre les crues ;
- (d) Emplacement des principales infrastructures de transport et de fourniture en électricité et en eau ;
- (e) Évaluation systématique des dégâts post-crue.

### 2.3 INFRASTRUCTURES ET RESSOURCES HUMAINES

#### 2.3.1 Infrastructures

Un système de prévision et d'annonce des crues nécessite un service opérationnel central pour communiquer avec les stations décentralisées et avec toutes les personnes qui sont en relation avec le service. Cette section examine les exigences physiques de base dans le cadre desquelles le service et son personnel doivent opérer.

Les installations d'un service de prévision et d'annonce des crues sont généralement situées physiquement dans des bâtiments appartenant à leur ministère d'attache. Même si le personnel qui opère les services peut avoir ses propres bureaux, il est nécessaire qu'il y ait une salle opérationnelle spécialement prévue à cet effet dans laquelle tous les équipements sont disponibles et qu'un espace soit réservé pour tout le personnel de service. Dans la salle opérationnelle, il doit y avoir un espace adapté pour les bureaux, les terminaux informatiques et les stations de travail, les équipements de visualisation des données, l'imprimante et la photocopieuse. Dans le cas où le service s'appuie sur des communications radio (sans fil) avec les stations extérieures, il est souhaitable que les opérateurs aient leur propre salle pour éviter de perturber les autres travailleurs.

Une salle séparée doit être fournie pour les ordinateurs et l'équipement télétransmis qui sont essentiels aux opérations, et ce afin de minimiser le risque d'endommagement et de garantir des conditions de fonctionnement optimales. Ces conditions doivent inclure :

- (a) La climatisation afin de pouvoir contrôler la température et le taux d'humidité ;
- (b) Des contrôles pour minimiser la pénétration de

- poussière et de saleté ;
- (c) Un équipement monté sur étagère pour faciliter l'entretien et permettre une bonne circulation d'air ;
- (d) Une protection des câbles pour la sécurité des opérateurs et éviter les dommages accidentels.

Un bureau adapté doit être fourni pour le responsable des opérations, avec sa propre ligne téléphonique directe, le fax et accès à Internet, car ce responsable peut avoir à traiter avec des contacts externes de haut niveau en cas d'urgence. Certaines unités disposent également d'une salle de briefing avec des équipements de transmission par radio ou télévision pour le contact avec les médias.

Un centre de prévision et d'annonce des crues doit être accessible au personnel de service à tout moment, en particulier lorsque le personnel doit être rappelé en service en dehors des heures de travail habituelles. Le personnel de service doit disposer des clés, des laissez-passer et des autorisations de sécurité pour éviter que l'accès ne leur soit refusé du fait du dispositif de sécurité. Au sein d'un bâtiment, le centre de prévision et d'annonce des crues peut faire l'objet d'un accès sécurisé uniquement pour le personnel autorisé.

Les installations et l'équipement au sein du centre doivent être très résistants. L'équipement doit disposer d'unités d'alimentation permanente (UPS, dite aussi alimentation sans interruption, ou onduleur, ASI) pour éviter les micro-coupures. Si les alimentations ne sont pas fiables, des générateurs d'appoint doivent être prévus. Les alimentations doivent avoir une capacité suffisante pour assurer l'alimentation et l'éclairage de l'unité pendant éventuellement de nombreuses heures et être configurées pour s'activer automatiquement en cas de baisse ou de perte de courant.

Le centre de prévision et d'annonce des crues doit être localisé de telle sorte que son accessibilité soit garantie. Il ne doit pas être soumis à un risque d'inondations qui pourrait empêcher son accès et il ne faut pas que de l'eau puisse pénétrer dans les locaux au risque d'endommager sérieusement l'équipement. Si l'emplacement doit nécessairement se trouver dans une zone à risque en termes d'inondations, le centre des opérations ne doit pas être situé au rez-de-chaussée du bâtiment.

Même si les installations sont très résistantes, il convient de prévoir un site de secours pour l'installation du centre de prévision et d'annonce des crues afin de garantir un système infaillible pour une opération d'importance nationale. Au Royaume-Uni, des réseaux de gestion de données de secours pour toutes les données hydrologiques et météorologiques ont été établis dans deux centres

situés à deux cents kilomètres de distance, principalement pour éviter les effets d'une panne électrique au niveau national. Dans certains pays, les problèmes de sécurité rendent nécessaire l'existence d'un centre de secours dans un site de haute sécurité, par exemple une base militaire, en cas de troubles lors d'une situation d'urgence.

### 2.3.2 Ressources humaines

Un personnel adéquat et dûment qualifié pour les unités de prévision et d'annonce des crues est impératif, compte tenu du niveau de risque actuel et les impacts potentiels sur les populations, les biens et les infrastructures. Le Bangladesh est un des rares pays dans lequel un centre d'annonce des crues dédié existe depuis 30 ans ou plus, mais cela est compréhensible étant donné l'importance des inondations dans ce pays. Dans de nombreux pays, l'établissement d'un service fiable remonte à un passé bien plus récent. Le Royaume-Uni est un bon exemple : même si des systèmes d'annonce des crues existaient dans ce pays depuis de nombreuses années, principalement sous la forme d'une surveillance manuelle ou automatique des rivières, officiellement très peu de personnes travaillaient de façon dédiée à ces opérations. Un groupe d'ingénieurs avait bien parmi ses attributions des fonctions d'annonce de crues, mais il ne s'agissait pas de leur occupation première et eux, comme les autres opérateurs, se consacraient à des tâches diverses et variées. La majeure partie du personnel missionné temporairement avait une formation éloignée de l'hydrologie et de l'ingénierie fluviale.

La législation et l'évolution du rôle des autorités de gestion de l'eau au Royaume-Uni au cours des 20 dernières années ont apporté des changements tout à fait significatifs. Les descriptions suivantes sont basées sur les structures de l'Agence pour l'environnement au Royaume-Uni, qui possède une organisation à deux niveaux en matière de prévision et d'annonce des crues. Au niveau supérieur régional, la priorité est accordée à la prévision, et l'équipe permanente est responsable de la mise à disposition des données, de la maintenance et du fonctionnement des modèles, ainsi que de la prévision des crues (fluviales et côtières). Une région typique contient au moins trois secteurs. C'est à ce niveau qu'est exercée la responsabilité de réagir aux prévisions et de transmettre les annonces de crues aux populations et aux partenaires professionnels. Lors d'une crue, à la fois la région et les secteurs seront pleinement opérationnels et en liaison permanente. En avril 2009, un troisième niveau plus élevé hiérarchiquement a été ajouté sous la forme d'un Centre national d'annonce des crues, dont le personnel et la gestion sont communs avec le Met Office du Royaume-Uni.

### 2.3.2.1 Exemples de structures d'équipes au Royaume Uni

Dans une Équipe régionale de prévision des crues typique, on dénombre 24 agents de service répartis en quatre équipes de six agents d'astreinte pour faire fonctionner le Centre régional de prévision et de gestion des crues (RFMFC – regional flood management forecast centre). Chacun de ces agents d'astreinte a la responsabilité d'un secteur particulier mais peut travailler sur n'importe quel secteur au besoin. Outre les prévisions de crues, le RFMFC doit gérer les demandes d'informations de l'extérieur. Les agents d'astreinte principaux proviennent de la structure permanente du personnel de gestion dédié à la gestion des risques de crue, qui est surtout composée de professionnels de l'hydrologie ou de la modélisation.

Une Équipe d'annonce des crues de secteur sera responsable d'un ou plusieurs grands bassins hydrographiques. Le personnel de l'équipe se consacrera à plusieurs rôles permanents : contrôles de base, tâches d'exploitation et information. La logistique sur le terrain leur est fournie par le personnel chargé des pannes au niveau local et de la vérification de l'équipement. Ce personnel est également employé dans les équipes plus générales de gestion des risques d'inondation.

### 2.3.2.2 Prévision des crues au niveau national

En avril 2009, l'Agence pour l'environnement et le Met Office du Royaume-Uni ont mis en place un centre opérationnel conjoint pour l'annonce des crues et tous les événements météorologiques extrêmes associés. Cette évolution faisait écho aux graves inondations de 2007, qui ont soulevé des inquiétudes quant à la coordination de haut niveau. Les deux organisations ont entrepris d'associer leurs compétences afin de trouver le meilleur moyen d'évaluer le risque de crue opérationnel, depuis le déclenchement des conditions météorologiques jusqu'aux inondations proprement dites. Les compétences associées de l'Agence pour l'environnement et du Met office sont utilisées pour prévoir les inondations fluviales, maritimes et côtières, ainsi que les précipitations extrêmes qui peuvent provoquer des inondations dites pluviales.

Le Centre de prévision des crues (FFC – flood forecasting centre) fournit les services suivants :

- (a) Service d'alerte aux précipitations extrêmes ;
- (b) Recommandations en matière de crues au niveau national ;
- (c) Service internet.

Puisque le centre doit fournir des recommandations en matière de crues au niveau national, ceci

n'empiète pas sur ses rôles et fonctions de prévision et d'annonce assumés par le biais des accords par région et secteur, tels que décrits aux points 2.3.2.1 et 2.3.2.2.

Le personnel du FFC actuel comprend 27 agents au total. De la même façon, le Centre de prévision et d'annonce des crues du Bangladesh dispose d'un total de 22 membres de personnel, mais il n'emploie aucun météorologue. Le FFC du Royaume-Uni fournit des prévisions météorologiques quotidiennes pour l'Agence pour l'environnement et un avertissement quotidien en matière de crues pour les principaux intervenants civils. Lorsque de fortes précipitations sont prévues ou ont lieu, le centre fournit aussi une gamme de prévisions pluviométriques pour l'Agence pour l'environnement et des bulletins d'alerte aux fortes précipitations pour les intervenants de la sécurité civile. Des alertes et des avis de vigilance sont émis durant les périodes de fortes marées et de tempêtes.

### 2.3.2.3 Exigences générales en matière de recrutement de personnel pour un service d'annonce des crues national

La décision de mettre en place des centres de prévision des crues nationaux et régionaux et la façon dont ils sont reliés entre eux et pris en charge par les Services hydrologiques et météorologiques nationaux seront, en partie, influencées par les structures existantes des services et le partage historique des responsabilités. Il n'y a pas de schéma rigide, mais les structures suivantes doivent être disponibles :

- (a) Prévisionnistes et modélisateurs hydrologiques ;
- (b) Prévisionnistes météorologiques (dans le cas de services de gestion météorologiques et hydrologiques séparés, les météorologues concernés doivent avoir une compréhension spécifique des exigences hydrologiques) ;
- (c) Spécialistes des technologies de l'information et des communications techniques opérationnelles ;
- (d) Communications avec les médias, les populations et le gouvernement ;
- (e) Gestion et administration ;
- (f) Recherche et développement.

Il est désormais reconnu que l'importance de la prévision et de l'annonce des crues en tant que processus de gestion des risques de crues et des impacts nécessite une organisation structurée à plein temps. Il ne peut plus être question de considérer cela comme une mesure d'intervention d'urgence temporaire pour une organisation remplissant d'autres obligations prioritaires, par exemple des entreprises de travaux publics ou des municipalités. L'ensemble du personnel, les salaires et indemnités, les locaux et l'équipement doivent être intégralement financés afin de refléter l'importance des services.

## 2.4 DÉTERMINATION DU CONCEPT OPÉRATIONNEL

Le concept opérationnel définit l'interaction entre les données, la technologie de prévision et les utilisateurs. Il précise la façon dont le service de prévision opérationnel fonctionnera pour garantir que les exigences des utilisateurs soient satisfaites. Il existe de nombreuses façons de configurer un service de prévision opérationnel comme cela est reflété par la variété des structures nationales. Pourtant, il existe un certain nombre de facteurs critiques pour garantir une fourniture de service crédible qui satisfasse les besoins de groupes d'utilisateurs divers et variés. Une fois le concept opérationnel défini, il devient inscrit dans le «mode opératoire» qui détermine le cadre de fonctionnement au jour le jour (en condition de «veille») de même que la façon dont le service de prévision fonctionnera durant un épisode de crue. Les facteurs suivants doivent être mentionnés :

### Mission du centre de prévision

Le mandat officiel et la mission de la, ou des, organisation(s) fournissant le service, probablement via un centre de prévision dédié, sont généralement définis de façon réglementaire. Il est probable que les divers utilisateurs aient des exigences différentes en matière de prévision et d'information. Des exemples d'utilisateurs incluent les services d'urgence, la protection civile ou les responsables des plans d'urgence, les médias, l'agriculture, l'industrie, les sociétés hydroélectriques, les responsables du contrôle des ressources en eau et des ouvrages de protection contre les crues, les organisations de transport maritime et de distribution d'eau (au niveau municipal). Les divers types d'information nécessaires doivent être spécifiés dans des accords individuels et des contrats de service.

### Communications

Cela comprend le matériel et les logiciels nécessaires pour concentrer les données et transmettre les prévisions, de même que les accords avec les sociétés de télécommunications ou les autorités, permettant ainsi de s'assurer que les licences nécessaires pour utiliser les longueurs d'ondes sont bien conformes.

### Fonctionnement du réseau hydrométéorologique

Cette partie concerne la définition du réseau, y compris les stations de mesure de débit et les pluviomètres, le réseau météorologique ainsi que d'autres sources de données nécessaires pour les prévisions, comme le réseau de radars et les produits satellites.

### Organisation du centre de prévision

Il est nécessaire de déterminer l'effectif et le rôle du personnel, par exemple le nombre de techniciens et d'ingénieurs qui travailleront dans le centre durant les opérations de routine et d'urgence. Les rôles et responsabilités du personnel doivent être clairement établis ainsi que la façon dont les tâches opérationnelles doivent être organisées selon les périodes de travail. Les exigences en termes de qualification et de formation des différents types de personnel nécessaires doivent être bien définies. Bien qu'il ne soit pas toujours possible, ou souhaitable, de s'appuyer sur les seules qualifications, il est essentiel que l'ensemble du personnel possède une formation de base solide sur les tâches opérationnelles à accomplir.

**Définition des produits utilisateurs :** Cela couvre les types de produits et d'informations (résultats) qui sont requis pour satisfaire les exigences des utilisateurs. Cela inclut le calendrier et les échéances de diffusion. Il est utile de conserver des exemples de tous les produits générés dans le Mode opératoire à des fins de formation et comme référence lorsque des questions seront posées par les utilisateurs.

### Interaction avec les services de prévisions météorologiques

Cela concerne tout particulièrement tous les pays où le service de prévision de crues est une entité opérant sous la responsabilité d'un ministère distinct de celui du service météorologique. Une étroite coopération entre le service de prévision météorologique et le centre de prévision des crues est essentielle, car ce dernier dépend directement des résultats du premier. La procédure (ou définition du système) d'acquisition des données et des prévisions, et d'analyse est nécessaire en tant que données d'entrée pour les prévisions hydrologiques. Cette procédure doit être définie dans le concept opérationnel.

### Politique de fonctionnement

La politique et le rôle du service de prévision à la fois en conditions opérationnelles et de «veille» doivent être soigneusement discutés. En conditions opérationnelles, c'est-à-dire durant les périodes actives d'annonce des crues, le rôle du service est de collecter les données, d'effectuer les contrôles qualité de l'information, de recevoir et d'analyser les prévisions météorologiques, de faire fonctionner les systèmes de prévision, d'analyser les conditions hydrologiques actuelles et futures et de produire les prévisions devant être transmises aux utilisateurs. Dans le cas d'un événement extrême, le volume de données, ainsi que l'effectif de personnel, augmentent au fur et à mesure que davantage de produits

doivent être fournis à des utilisateurs plus nombreux dans des délais limités. Fréquemment, les heures de fonctionnement doivent être étendues afin de satisfaire la demande croissante de services.

Avant que l'importance vitale de la prévision et de l'annonce des crues ne soit totalement reconnue, il arrivait souvent que les organisations n'incluent pas d'unité de prévision permanente. Du personnel était recruté suivant les besoins de la situation, même si le rôle des personnes clés était défini dans leur description de poste ou de leurs tâches. Dans un centre de prévision permanent, le rôle du personnel durant les périodes sans événement doit être d'entretenir et d'améliorer les fonctionnalités du centre. Ceci doit inclure des activités telles que la mise à jour des données essentielles comme les courbes de tarage, l'évaluation des performances opérationnelles, le calage des modèles, la nécessité d'améliorer les prévisions et la production de retours d'expérience.

Il n'est jamais possible d'assurer une fiabilité totale et continue du matériel, des logiciels et de l'électricité nécessaires aux opérations, même avec des programmes de maintenance sérieux. Les services nationaux d'annonce des crues doivent établir des procédures de sauvegarde pour garantir des services de prévision fiables lorsque cela est nécessaire. Des procédures de sauvegarde pour toutes les composantes opérationnelles sont requises, y compris la collecte de données, les opérations du système de prévision (notamment la sauvegarde du matériel, des logiciels et des données), les messages diffusés, l'alimentation

(alimentations sans coupure et générateurs de secours), l'accès du personnel et la sécurité. Il est fortement recommandé d'établir un autre site pour les opérations de sauvegarde, dans le cas où le site du centre de prévision ne serait plus opérationnel. Cet autre centre doit être situé sur un site complètement différent que le centre habituel pour éviter qu'il ne soit affecté par les mêmes conditions défavorables.

La clé de la fiabilité opérationnelle d'un centre de prévision est l'établissement d'un programme de maintenance sérieux. Il convient de réaliser que cela peut représenter une activité coûteuse, en particulier si le réseau est étendu et difficile d'accès. Tout le matériel et les logiciels doivent être entretenus régulièrement, sinon le système peut ne pas fonctionner en cas de crise. Il est recommandé que l'organisation inclue, outre les prévisionnistes et le personnel technique, un administrateur système responsable de la maintenance du matériel, des logiciels de communication et du système de prévision. Il est également recommandé qu'une partie du personnel soit responsable de l'entretien des produits de diffusion. Par exemple, la proposition de réorganisation du Centre d'annonce des tempêtes au Département météorologique du Bangladesh recommande quatre unités au sein de la structure opérationnelle :

- (a) Modélisation et production de prévisions ;
  - (b) Maintenance de l'instrumentation et des communications sur le terrain ;
  - (c) Gestion du matériel et des logiciels informatiques ;
  - (d) Gestion de la diffusion des produits et du site Internet.
-



## CHAPITRE 3

# MÉTHODES ET MODÈLES DE PRÉVISION DES CRUES

### 3.1 INTRODUCTION

Les attentes concernant les prévisions de crues en termes de magnitude et de délai se sont accrues avec la reconnaissance de l'importance de l'annonce des crues en tant que contribution à la gestion des risques de crues. Cela signifie que les anciennes méthodes de simple extrapolation à partir des données des stations de jaugeage peuvent être insuffisantes (Moore et al., 2006). Alors que «le cœur de tout système de prévision des crues est un modèle hydrologique» (Serban et Askew, 1991), la modélisation des bassins hydrographiques constitue seulement l'un des éléments cruciaux sur lequel reposent l'efficacité et l'efficacité d'un système de prévision et d'annonce des crues intégré. Les étapes

nécessaires à la création d'un modèle de prévision des crues adéquat sont illustrées en Figure 3.1.

Une prévision hydrologique est une estimation de l'état futur d'un paramètre hydrologique, tel que le débit, le volume cumulé, la hauteur d'eau, la zone inondée ou la vitesse d'écoulement moyenne à un site géographique particulier ou sur une section de cours d'eau donnée. Le délai de cette prévision correspond à la durée entre le moment où a été réalisée la prévision (c'est-à-dire l'instant d'origine de la prévision) et celui dans le futur auquel s'applique cette prévision. Les définitions de catégories de délais sont subjectives, suivant la taille du bassin hydrographique au sein d'une région donnée voire même d'un pays. Par exemple, aux

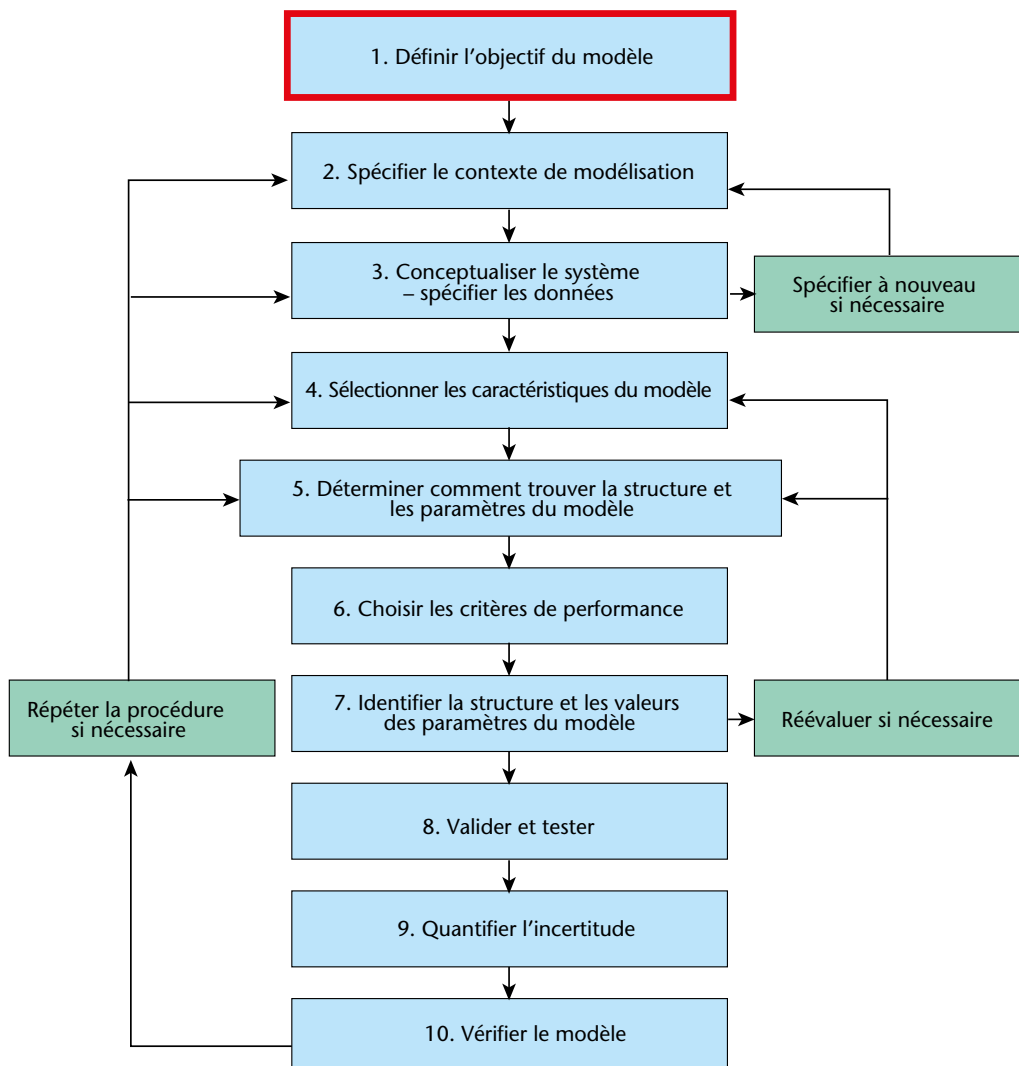


Figure 3.1. Processus de développement d'un modèle de prévision des crues

États-Unis d'Amérique, un délai compris entre 2 et 48 heures est généralement considéré comme une prévision à court terme, entre 2 et 10 jours une prévision à moyen terme, tandis que le délai d'une prévision à long terme dépasse les 10 jours (OMM-N° 49, Volume III, 2007). Cependant, au Royaume-Uni, ou dans des zones dotées de nombreux bassins hydrographiques de taille réduite, le court terme est considéré comme un délai de deux à six heures et le long terme au-delà d'une journée. Les prévisions météorologiques à très courte échéance, appelées «prévisions immédiates», dont les délais varient de quelques minutes à deux heures, reposent généralement sur l'extrapolation des tendances observées les plus récentes. Dans certains endroits, des «prévisions de crues éclair» sont nécessaires, c'est-à-dire lorsque la crue se produit à peine quelques heures après l'épisode de précipitations orageuses qui la génère.

Les modèles pluie-débit sont conçus pour générer les prévisions de crues à partir de données météorologiques entre autres ; ainsi, le choix d'un ou plusieurs modèles à utiliser, ainsi que l'estimation des PQPs pour les délais de prévision sont essentiels à la réussite de la prévision. Il convient de garder à l'esprit que les données météorologiques utilisées dans les modèles de prévision des crues sont entachées d'une part significative d'incertitude, car elles sont «dominées par les erreurs de mesure et de prévision de précipitations» (Moore, 2002). Il existe encore «des problèmes significatifs à résoudre» concernant l'utilisation combinée du radar météorologique et des pluviomètres pour les PQPs (Moore et al., 2005). Tandis que certains modèles de prévision peuvent fonctionner sans les PQPs en vue de générer des délais de prévisions, l'utilisation des PQPs améliore considérablement les prévisions (Goswami et O'Connor, 2007) et favorise l'extension des délais de prévision (Arduino et al., 2005, voir chapitre 1).

Alors que les bassins hydrographiques répondent globalement de façon similaire aux phénomènes hydrométéorologiques, on pourrait s'attendre à ce que la modélisation puisse être précisément adaptée, via un processus de réglage assez simple, pour rendre les modèles plus scientifiques. Cependant, l'approche «taille unique» pour la modélisation des bassins hydrographiques et la prévision ne fonctionne pas. Il existe suffisamment de variabilité dans les facteurs qui influencent l'hydrogramme, ainsi que dans leurs interactions, pour éprouver l'ingéniosité, les capacités et les ressources techniques des modélisateurs. Cela résulte en un choix déconcertant de modèles qui fonctionnent très bien dans certains cas mais mal dans d'autres. Une approche de modélisation modulaire a été suggérée dans le contexte de modèles conceptuels (O'Connell, 1991), à savoir que chaque composante identifiable du processus générateur des

écoulements (par exemple, la fonte des neiges ou les eaux souterraines) peut être représentée comme un sous-élément à inclure dans le modèle, selon les besoins. Au cours des dernières années, des séries de «boîtes à outils de modèles» ont émergé, offrant ainsi un choix de structures et de combinaisons pour les modèles. Elles fournissent des possibilités de modélisation pour les utilisateurs qui ne développent pas les modèles. L'élaboration de modèles est une affaire de spécialistes et, bien que ce soit regrettable, il existe toujours un écart conséquent entre les développeurs de modèles et les utilisateurs.

Le Système hydrologique opérationnel à fins multiples (SHOFM) de l'OMM, qui favorise le transfert de technologies éprouvées, inclut des sections thématiques dédiées aux modèles de prévision de l'écoulement utilisant des données météorologiques mais également des modèles combinant prévision et propagation de l'écoulement. Cette technologie, présentée sous la forme de manuels techniques et de programmes informatiques, a été mise à disposition par les services hydrologiques des pays membres de l'OMM pour figurer dans le SHOFM. Elle comprend des techniques qui ont été développées, testées et utilisées en mode opérationnel de routine par ces organismes. Toutefois, certains d'entre eux doivent être considérés comme des «systèmes anciens», qui peuvent être difficiles à transposer et à maintenir. (Voir : [http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/homs/homs\\_fr.html](http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/homs/homs_fr.html)). Il n'existe pas de procédure précise dans le programme SHOFM pour la mise à jour systématique de ses composantes ou pour la fourniture de formation ou d'aide sur leur utilisation.

Pour être utiles, les modèles de prévision sélectionnés doivent satisfaire certains objectifs, en fonction des exigences des acteurs et des utilisateurs finaux des prévisions. Le degré de complexité des modèles doit être cohérent avec la «capacité de transfert de l'information» réelle (Klemeš, 2002) des données lors du calage et de l'utilisation opérationnelle (O'Connor, 2006). L'augmentation de la complexité des modèles, en termes du nombre de composantes et de paramètres concernés, n'est pas nécessairement justifié ni opportun (Perrin et al., 2001, 2003). Les meilleures pratiques de gestion en matière de systèmes de prévision et d'annonce des crues évoluent vers l'utilisation de modèles distribués à base physique ou au moins d'une suite intégrée de modèles simples fonctionnant simultanément (c'est-à-dire l'approche dite «à modèles multiples») (Malone et al., 2007). Le problème de l'incertitude des prévisions, émanant d'erreurs de données, de l'inadéquation de la structure des modèles et d'une mauvaise estimation des paramètres doit également être résolu.

Dans le monde opérationnel, il n'y a pas eu d'innovation majeure pour la prévision des crues et les progrès récents ne sont pas manifestes (Arduino



et al., 2005). De nombreux modèles, qui ont été appliqués dans des systèmes de prévision et d'annonce des crues opérationnels il y a plusieurs décennies, sont toujours utilisés de nos jours, après avoir uniquement subi quelques améliorations occasionnelles ou une mise à jour visuelle de l'interface, car les prévisions produites par ces modèles sont toujours considérées comme adaptées par leurs utilisateurs finaux. La description de toutes ces méthodes et de tous ces modèles, ainsi que l'élaboration de leur formulation mathématique est clairement hors de propos dans ce manuel. Les principales catégories ou classes de modèles et quelques exemples représentatifs de chaque classe sont indiqués, ainsi que les références appropriées.

Outre la disponibilité d'un très grand nombre de revues et de comptes-rendus de conférences dans ce domaine spécifique de l'hydrologie (par exemple Arduino et al., 2005 ; Todini, 2007), ils existe de nombreux ouvrages qui offrent des analyses approfondies de la modélisation des bassins hydrographiques et de la prévision des crues, bien que seulement quelques publications les plus anciennes se focalisaient sur la prévision et l'annonce des crues en temps réel. L'Internet constitue également une source de matériaux de référence de plus en plus riche, par exemple l'ouvrage-web *Guidelines for reducing flood losses*, et en particulier le chapitre 3 "*Integrated flood forecasting, warning and response system*" ([http://www.unisdr.org/files/558\\_7639.pdf](http://www.unisdr.org/files/558_7639.pdf))

### 3.2 **MODÈLES DE BASSINS VERSANTS BASÉS SUR LES PRÉCIPITATIONS**

Dans le cadre de la prévision des crues, deux formes de précipitations dominent généralement, la pluie et la neige. Tandis que la répartition de l'évapotranspiration dans le temps est un facteur significatif de la modélisation des bassins hydrographiques semi-arides et arides, c'est généralement moins vrai pour les bassins humides, même si pour les événements de petite et moyenne amplitude, l'évapotranspiration est importante pour définir les conditions initiales. La plupart des modèles conceptuels ont une procédure d'évapotranspiration intégrée en tant qu'élément du bilan hydrique. Il a été récemment montré (par exemple Oudin et al., 2005 *a, b*) que, dans le cas de modèles conceptuels globaux qui ont été appliqués aux bassins hydrographiques français, l'estimation de l'évapotranspiration peut être basée sur des formules simples utilisant uniquement la température de l'air. (Les modèles globaux ont des paramètres constants, qui n'évoluent pas dans l'espace et sont généralement décrits par des équations différentielles ordinaires, tandis que les paramètres des

modèles distribués, dont les processus physiques sont décrits par des équations différentielles partielles, peuvent évoluer dans l'espace.) Il est démontré que ces méthodes basées sur les températures sont appropriées dans la mesure où l'efficacité de la simulation n'est pas améliorée de façon significative en utilisant des méthodes plus exigeantes en termes de données, comme l'approche de Penman. Dans le paragraphe 3.2, un aperçu de la modélisation des bassins versants est fourni, avec une référence particulière aux PQPs, à la formulation des modèles mathématiques pour la transformation pluie-débit et, le cas échéant, à la contribution de la fonte des neiges à la génération du ruissellement.

#### 3.2.1 **Surveillance et prévision des précipitations**

Les données de précipitations sont utilisées dans les modèles de prévision sous la forme de données d'entrées de pluie et, le cas échéant, de PQPs. Lorsque la fonte des neiges est un facteur contributif significatif à la formation de crues, une composante fonte des neiges est également nécessaire.

##### 3.2.1.1 **Pluie**

Actuellement, le développement de l'estimation quantitative des précipitations (EQP) et de la modélisation des PQP est limité à une gamme relativement restreinte de résolution temporelle et spatiale (Moore et al., 2005). Les échelles temporelles sont généralement de l'ordre de un à trois jours et les superficies inférieures à 12 kilomètres ne sont habituellement pas disponibles. À l'heure actuelle, la recherche et le développement se focalisent sur l'extension des délais à une période comprise entre 5 et 10 jours, avec des échelles spatiales aussi réduites que 2 kilomètres. Pour que les modèles de bassins hydrographiques de type pluie-débit produisent des prévisions d'une exactitude satisfaisante, la disponibilité et la précision des PQPs sur le délai de prévision attendu sont d'une extrême importance (Toth et al., 2000).

Les trois moyens utilisés pour la fourniture de ces PQPs sont :

- (a) Un réseau télétransmis de pluviomètres conventionnels;
- (b) Des radars météorologiques, qui sont devenus encore plus populaires depuis l'introduction des systèmes à double polarisation et des radars Doppler ;
- (c) Des systèmes de satellites géostationnaires axés sur l'analyse des nuages apparaissant sur les images satellite. Alors que cette méthode est prometteuse, elle nécessite encore des développements avant d'être utilisable d'une façon généralisée dans les systèmes de prévisions des crues opérationnels pour les bassins

hydrographiques de petite et moyenne taille, en particulier dans les régions subtropicales.

Voici des exemples de programmes avec radars hydrologiques fournissant des données aux modèles de prévision des crues :

- (a) Next-Generation Radar (NEXRAD) (États-Unis) qui utilise un réseau d'environ 175 radars météorologiques Doppler en bande S à haute puissance;
- (b) Les produits Nimrod reçus et traités par le système de radar hydrologique (HYRAD) utilisé par l'Agence pour l'environnement du Royaume-Uni ;
- (c) Le réseau de 15 radars en bande C combinés à des données pluviométriques et satellite du Japon ;
- (d) Le système de deux radars en bande C exploités par le bureau météorologique Met Éireann (Irlande).

Voici ci-dessous des exemples largement utilisés de modèles de prévision numérique du temps (PNT) à domaine limité:

- (a) Le modèle haute résolution à domaine limité (HIRLAM) en Suède et en Irlande ;
- (b) Le modèle méso-échelle du Met Office du Royaume-Uni (basé sur le modèle de prévision numérique du temps appelé Unified Model) ;
- (c) Le modèle à domaine limité de Bologne (LAMBO) en Italie ;
- (d) Le modèle méso-échelle nord-américain (NAM, North American Mesoscale Model, anciennement ETA), le Système mondial de prévision (GFS – Global Forecast System), le modèle de prévision à échéance moyenne (MRF – Medium Range Forecast Model) et le modèle à grilles emboîtées (NGM – Nested Grid Model) aux Centres nationaux de prévision environnementale (NCEP) à Washington aux États-Unis ;
- (e) Le système opérationnel mondial de prévision atmosphérique de l'US Navy (NOGAPS – Navy Operational Global Atmospheric Prediction System) au Centre de météorologie et d'océanographie numériques de la marine à Monterey, Californie aux États-Unis ;
- (f) Le modèle global environnemental multiéchelle (GEM – Global Environmental Multiscale) au Centre météorologique canadien de Montréal au Québec ;
- (g) Le modèle spectral régional opérationnel (ORSM – Operational Regional Spectral Model) de Hong Kong en Chine.

### 3.2.1.2 Eaux de fonte

En utilisation opérationnelle, les modèles de fonte des neiges s'appuient de plus en plus sur la télédétection (Maurier et al., 2003). Les procédures utilisant la télédétection pour la prévision du ruissellement des eaux de fonte peuvent être généralement classées en deux catégories, les

approches empiriques et les approches à base de modèles (Engman et Gurney, 1991). Indépendamment des approches empiriques directes, les modèles établis ont été modifiés et de nouveaux modèles ont été développés qui utilisent des données satellitaires sur la couverture neigeuse pour la prévision et la simulation du ruissellement des eaux de fonte.

### 3.2.2 Modélisation événementielle et simulation continue

La modélisation événementielle est effectuée pour simuler soit les crues individuelles résultant d'orages s'abattant sur un bassin hydrographique, soit le débit sortant dans le cas de la rupture d'une digue ou d'un barrage. La procédure traditionnelle pour la modélisation conceptuelle événementielle pour traiter les orages comprend les éléments suivants (DeVries et Hromadka, 1993) :

- (a) Calcul des précipitations moyennes par zone à chaque pas de temps à l'échelle du sous-bassin hydrographique ;
- (b) Détermination de la pluie nette en considérant l'évolution des pertes dans le temps;
- (c) Génération de l'hydrogramme de ruissellement direct de surface issu de la pluie nette;
- (d) Ajout d'un débit de base simplifié au ruissellement de surface généré ;
- (e) Propagation dans les cours d'eau ;
- (f) Propagation dans les réservoirs ;
- (g) Combinaison des hydrogrammes.

De façon déterminante, les conditions initiales ou les états en temps réel doivent être spécifiés ou estimés de façon réaliste dans le cas des modèles événementiels. L'absence de «période de calcul préalable» dans la modélisation événementielle introduit une part de subjectivité et affecte défavorablement la performance du modèle.

Le Système de modélisation hydrologique (HMS – Hydrologic Modeling System) du Centre d'ingénierie hydrologique (HEC – Hydrologic Engineering Center) du United States Army Corps of Engineers (Génie militaire des États-Unis) est l'un des programmes les plus populaires et les plus polyvalents dans la catégorie des modèles événementiels. Les logiciels et la documentation HEC sont disponibles gratuitement et peuvent être téléchargés sur le site Internet HEC (<http://www.hec.usace.army.mil/>), où figure également une liste de revendeurs qui commercialisent et assurent le suivi du système. Un autre exemple, largement utilisé en Australie et ailleurs, est le modèle événementiel de propagation du ruissellement de Burroughs (RORB – Runoff Routing Burroughs Event Model) (Laurenson et Mein) développé à l'Université de Monash (Australie) pour l'estimation des hydrogrammes à partir des précipitations et des autres paramètres liées aux cours d'eau en utilisant une procédure de propagation du

ruissellement (Laurenson, 1962 ; Laurenson, 1964 ; Laurenson et Mein, 1995). Le téléchargement du modèle RORB version 8, publié en 2008, qui est distribué, non-linéaire et applicable à la fois aux bassins hydrographiques urbains et ruraux, est disponible sur le site Internet <http://eng.monash.edu.au/civil/research/centres/water/torb/>. Les informations concernant le modèle RORB sont également disponibles en envoyant un courriel à RORB@eng.monash.edu.au.

Les modèles continus, à la différence des modèles événementiels, prennent en compte en continu (et pas seulement pour les orages individuels) toutes les précipitations qui tombent sur un bassin hydrographique, ainsi que le mouvement de l'eau sur tout le bassin hydrographique jusqu'à sa station de jaugeage à l'exutoire. Ils sont plus complexes car ils doivent simuler à la fois le temps de parcours de l'onde de crue mais aussi la diminution de l'humidité durant les périodes sèches. Hormis les modèles basés sur des hydrogrammes unitaires et les modèles naïfs à réponse linéaire totale simple, la plupart des modèles systémiques théoriques boîtes noires sont de ce type.

Pour les modèles les plus simples, des relations physiquement plausibles ou des formules empiriques sont généralement utilisées pour interconnecter les éléments du sous-processus. En fonction du degré de variabilité spatiale, les relations sont appliquées soit à l'échelle du bassin hydrographique, par exemple dans les modèles globaux, soit à l'échelle de sous-bassins, par exemple dans les modèles semi-globaux ou semi-distribués, ou en développant une grille d'éléments individuels ou de pixels comme dans les modèles distribués. La variabilité verticale est représentée par une zonation du sous-sol ou des couches verticales de sol pour chaque élément de la grille.

### 3.2.3 Mode de fonctionnement des modèles de prévision des écoulements en temps réel

#### 3.2.3.1 Modèles fonctionnant en mode sans mise à jour

Ce type de modèle est généralement considéré comme inefficace dans le contexte de la modélisation en temps réel. Il est important de faire la distinction entre un

modèle pluie-débit fonctionnant en mode simulation (ou en phase de conception) et le fonctionnement du même modèle dans un contexte de prévision des crues en temps réel (Kachroo, 1992). Lorsque le modèle est calé au moyen des données d'entrées (par exemple les précipitations et l'évaporation) et de résultats (par exemple les débits observés), une simulation pure, à des fins de validation, met en œuvre uniquement son application à des données d'entrées observées pour produire les écoulements simulés correspondants.

La prévision de l'écoulement en temps réel se distingue de la simulation par le fait qu'elle implique que la prévision ait lieu en temps réel (défini comme l'origine temporelle de la prévision) à un instant donné pour des échéances futures. D'une manière générale, les prévisions sont réalisées à des intervalles de temps réguliers, pour des délais de un, deux, trois, ..., n pas de temps, avec la prévision «délai 1» correspondant à une prévision «avec un pas de temps d'avance», etc. Clairement, la performance de la prévision décroît au fur et à mesure de l'extrapolation dans le temps, c'est-à-dire qu'elle décroît à mesure que le délai s'accroît.

Une approche consiste à utiliser les EQPs ou les PQPs au cours du délai de prévision d'écoulement sélectionné lors de chaque pas de temps, en plus des valeurs d'entrée réelles jusqu'à l'origine temporelle de chaque prévision, afin de réaliser les prévisions nécessaires. Dans des scénarios de prévision sans mise à jour, le modèle fonctionne comme s'il était en mode de simulation pure, sans mise à jour des prévisions à mesure que les mesures d'écoulement deviennent disponibles en temps réel. Cette approche est limitée, car elle ignore la disponibilité de la séquence de débits observés jusqu'à l'instant d'origine de la prévision qui pourrait être utilisé pour mettre à jour la prévision. Cela provoque inévitablement un écart entre les prévisions simulées et les valeurs de débit observées ultérieurement.

Le manque d'ajustement entre l'hydrogramme de crue prévu, pour un délai donné, et l'hydrogramme observé correspondant, peut être attribué à une ou plusieurs sources d'erreurs de prévisions (voir également le point 3.2.1.1). Ces erreurs comprennent des erreurs d'amplitude, de phase et de forme (Serban et Askew, 1991, Rapport technique de l'OMM-N° 77 (2004)).

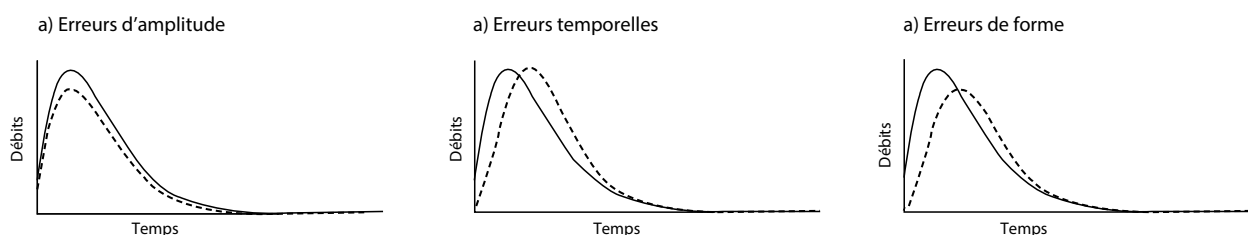


Figure 3.2. Définition des types d'erreurs entre les hydrogrammes mesurés (—) et simulés (---)

Les représentations graphiques de ces trois types d'erreurs sont illustrées en Figure 3.2. Les procédures de mise à jour, qui utilisent des méthodes de rétroaction, visent à minimiser les erreurs d'amplitude, de phase et de forme qui sont observées lorsque les hydrogrammes de crues simulés ne sont pas corrigés en temps réel, ainsi que les erreurs globales de volume.

Les erreurs d'amplitude et de volume reflètent la surestimation ou la sous-estimation du volume de l'hydrogramme de crue. Elles supposent des défaillances structurelles du modèle, soit dans sa composante bilan hydrique, soit dans sa représentation globale, des erreurs dans les données d'entrée et/ou de sortie ou, le plus souvent, une combinaison de ces options. Les erreurs de phase révèlent des inexactitudes dans la chronologie de l'hydrogramme. Même si les volumes des débits de crues sont correctement estimés, ils arrivent soit en retard soit en avance par rapport aux prévisions. Les erreurs de forme peuvent révéler des difficultés à ajuster à la fois le volume et la chronologie. Les erreurs à la fois de forme et de phase reflètent généralement la défaillance de la composante de propagation du modèle pour transférer de manière satisfaisante les volumes de ruissellement générés au cours du temps.

### 3.2.3.2 Modèles avec mise à jour

Cette approche est considérée comme plus efficace et plus adaptée pour les modèles de prévision des crues que les modèles sans mise à jour. Elle inclut une mise à jour des prévisions sur la base des débits récemment observés jusqu'à, et y compris, l'instant d'origine de la prévision de débit. Elle fait également appel aux données externes les plus récentes (par exemple les observations de précipitations et d'évapotranspiration) et, le cas échéant, les PQPs sur le délai des prévisions. Les procédures de mise à jour pour les prévisions de crues en temps réel sur un délai donné tentent de réduire les erreurs entre les valeurs de débit prévues pendant le délai d'échéance non mis à jour et les valeurs correspondantes observées ultérieurement, quelles que soient les sources de ces erreurs.

Il existe toujours un manque d'intérêt de la part de certains utilisateurs, et peut-être même de certains développeurs de modèles, quant à l'importance des contributions relatives de ces divers facteurs à la qualité de l'ajustement des prévisions mises à jour, en particulier avec l'augmentation des délais. Même un modèle pluie-débit dont les performances sont mauvaises en mode simulation, du fait de PQPs mal estimées, peut être corrigé par une procédure de mise à jour efficace et générer des prévisions satisfaisantes (Tangara, 2005). Tandis que l'utilisation d'une procédure de mise à jour efficace peut améliorer de façon significative l'exactitude des prévisions sur des délais courts, pour des délais plus longs, ce résultat

ne peut être obtenu que par l'amélioration du mode de simulation des prévisions.

À l'exception de la procédure de mise à jour des paramètres à chaque pas de temps, les procédures de mise à jour ci-dessus sont «non adaptatives» dans le sens où les valeurs de paramètres du modèle en mode simulation sont conservées jusqu'à ce qu'une quantité suffisante d'enregistrements justifient un recalage. Dans la procédure de «calage adaptatif», le modèle est effectivement recalé à chaque pas de temps, par exemple par filtrage de Kalman (Szollösi-Nagy, 1976 ; Szollösi-Nagy, 1982 ; Szilágyi, 2003), dès que de nouvelles données deviennent disponibles, c'est-à-dire que les valeurs de certains, ou de tous les paramètres ou états, peuvent subir une modification ou une mise à jour à chaque pas de temps. Même si cela peut se révéler efficace pour améliorer les prévisions, il est difficile de justifier une évolution à aussi court terme du modèle pour des raisons physiques si l'on considère la qualité des données généralement disponibles à cette fin. Le calage adaptatif devient extrêmement difficile dans le cas d'un modèle conceptuel complexe ou d'un modèle distribué.

### 3.2.4 Types de modèles de simulation pluie-débit

Il existe de nombreuses bonnes descriptions disponibles dans la littérature de l'évolution de la modélisation pluie-débit. Celle de Todini (2007) est particulièrement utile car elle est exhaustive, actuelle et relativement impartiale. Elle affiche aussi une vraie volonté de rapprocher les deux principales approches de modélisation, à savoir les modèles basés sur les données (à la fois de type empirique boîte noire et de type conceptuel d'«inspiration physique») et les modèles distribués à base physique «guidés par les connaissances» plus scientifiques. Cette étude aborde les forces et faiblesses relatives des différents modèles, et indique les champs et la portée d'application de chaque approche. Les diverses catégories de modèles pluie-débit sont énumérées ci-après :

- (a) Modèles pluie-débit empiriques basés sur les données ;
- (b) Modèles pluie-débit conceptuels globaux «de type physique» ;
- (c) Modèles pluie-débit distribués à base physique ou de processus ;
- (d) Modèles pluie-débit distribués hybrides à base physique/conceptuels ;
- (e) Modèles conceptuels empiriques hybrides.

### 3.2.5 Modèles d'écoulement de fonte de neige fonctionnant en mode simulation

Dans de nombreux pays de régions froides, la contribution des eaux de fonte au débit des crues est significative et nécessite de combiner des modèles de

fonte des neiges continentales et des modèles hydrauliques de cours d'eau gelés. Même dans des pays jouissant d'un climat tempéré, tel que l'Irlande, dont l'amplitude de la variation saisonnière des températures est réduite avec de rares chutes de neige en plaine (au plus quelques jours par an), certaines des crues historiques majeures se sont produites au cours des années où des chutes de neige exceptionnelles se sont combinées à des précipitations extrêmes. Dans de telles circonstances, l'estimation de la fonte des neiges devient une composante essentielle du système de prévision des crues. La complexité de la procédure de modélisation de la fonte des neiges varie d'indices de fonte à une seule variable à des bilans énergétiques complets (Gray et Prowse, 1993). Normalement, les modèles sont spécifiques à chaque bassin versant et un nouveau calage exhaustif est nécessaire s'ils doivent être utilisés pour un autre bassin hydrographique, c'est-à-dire que les valeurs de leurs paramètres ne sont pas «transposables».

### 3.2.6 Modèles de prévision avec mise à jour en temps réel

Il existe de nombreuses façons d'utiliser les débits récemment observés pour la mise à jour des prévisions (Refsgaard, 1997 ; Moore et al., 2005 ; Goswami et al., 2005) et diverses procédures de mise à jour sont disponibles (voir par exemple Xiong et O'Connor, 2002 ; Xiong et al., 2004 ; Shamseldin, 2006). Elles diffèrent dans le détail ou leur mode de fonctionnement, mais, à la base, elles fournissent au modèle de simulation hydrologique un retour d'information à partir des débits les plus récemment observés en vue d'estimer les erreurs et du même coup améliorer la précision des prévisions. Les procédures de mise à jour peuvent être soit continues, c'est-à-dire qu'elles sont appliquées à chaque pas de temps, soit périodiques, avec des recalages périodiques du modèle. Dans le premier cas, la structure et les valeurs des paramètres du modèle de simulation et de la procédure de mise à jour sont généralement conservés tels quels et seules les prévisions résultantes sont modifiées. Dans le second cas de figure, le modèle associé et la procédure de mise à jour sont recalés à des intervalles plus longs. Cela peut se produire, par exemple, lorsqu'une quantité nettement plus importante de données devient disponible ou lorsque les paramètres physiques du bassin hydrographique ou la morphologie de la rivière ont subi des modifications liées à des facteurs anthropiques tels que le drainage des sols, des changements dans l'utilisation des sols ou d'autres conditions. La mise à jour des prévisions en temps réel dans le cadre de la modélisation événementielle est encore plus empirique et subjective en raison de l'incertitude sur les conditions initiales. Un diagramme schématique d'une procédure de mise à jour (d'après Serban et Askew, 1991) est proposé en Figure 3.3. Le lecteur qui souhaite approfondir le sujet peut également consulter

le Rapport d'hydrologie opérationnelle no. 40, 1992 (OMM-N° 779) sur la comparaison simulée en temps réel des modèles hydrologiques.

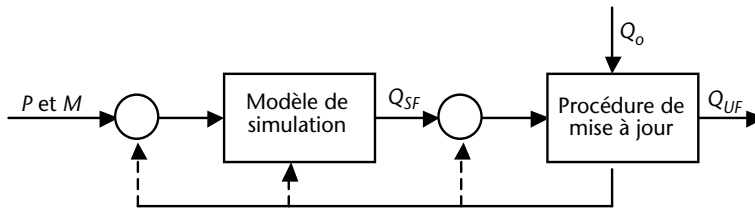
### 3.2.7 Approche de modélisation et de prévision pluie-débit «multi-modèles»

#### 3.2.7.1 Bien-fondé de l'approche multi-modèles

Dans les systèmes de prévision des crues traditionnels, on utilise généralement un modèle pluie-débit principal unique ou un modèle ramifié plus complexe du réseau hydrographique. Ce modèle peut avoir été sélectionné parmi un certain nombre de modèles similaires concurrents pour des raisons sans doute liées à l'efficacité du modèle, au degré de familiarisation avec le modèle, aux particularités du bassin hydrographique et aux données disponibles. Dans cette approche «axée sur les modèles», le prévisionniste peut compter uniquement sur les prévisions du modèle pluie-débit sélectionné. Il existe clairement un danger potentiel à s'appuyer uniquement sur un seul modèle pluie-débit dans ce type de systèmes, car chaque modèle fournit, par ses prévisions, une source importante d'informations qui peuvent différer légèrement de celles des autres modèles calés avec le même ensemble de données. De plus, l'utilisateur du modèle peut être amené à douter de sa crédibilité et perdre confiance si les prévisions ne sont pas cohérentes et raisonnablement précises. Ainsi, il convient de considérer la nécessité de développer des systèmes de prévision des crues plus flexibles. Ceux-ci ne seront pas basés sur un modèle pluie-débit unique, mais utilisera efficacement les prévisions de débit concomitantes d'un certain nombre de modèles pluie-débit, chacun ayant ses forces et ses faiblesses distinctes, afin de générer des prévisions de débit améliorées. La combinaison des informations issues de ces différentes sources de modèles est logiquement censée fournir une prévision plus précise et plus fiable, ce qu'il convient d'appeler un modèle «consensuel». Ces prévisions sont connues dans les publications comme des approches «par combinaison», «par agrégation», «par consensus», «par comité» ou «mixte». Elles divergent des prévisions d'ensemble, qui sont décrites au point 3.2.7.3.

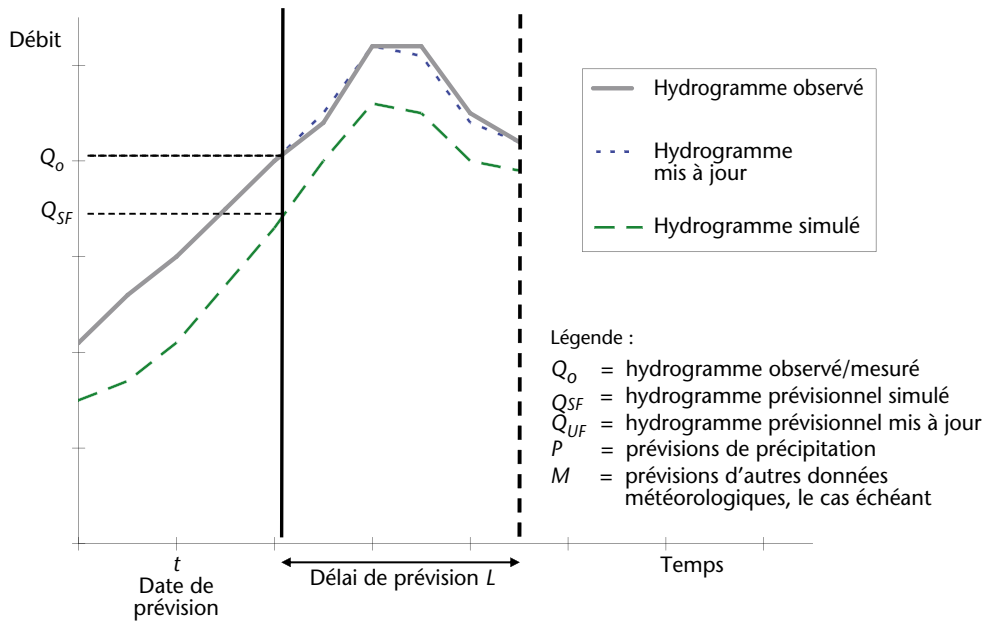
#### 3.2.7.2 Types de systèmes à modèles multiples

Dans un système de prévision multiple, l'ensemble des prévisions de débit des rivières d'un certain nombre de modèles pluie-débit sont utilisés simultanément pour générer une prévision de débit combinée à chaque pas de temps, par agrégation des résultats des différents modèles disponibles, évitant ainsi la dépendance à un modèle unique. Cette approche peut également être appliquée à l'ensemble des prévisions obtenues à partir d'autres



(a) Schéma fonctionnel de prévision avec mise à jour

Source : Serban et Askew, 1991



(b) Illustration de mise à jour

Source : C. Perrin

**Figure 3.3. Diagramme schématique de prévision avec mise à jour**

séries de paramètres du même modèle, qui produisent des performances quasiment équivalentes. Bien que le nombre d'études approfondies sur le développement et les applications des systèmes de prévisions des débits à modèles multiples soit toujours relativement restreint, ces études démontrent les capacités potentielles de l'approche à modèles multiples pour améliorer la précision et la fiabilité de la prévision des débits.

**3.2.7.3 Prévisions d'ensemble ou probabilistes**

Les prévisions d'ensemble ou probabilistes peuvent être considérées comme une catégorie particulière des prévisions à modèles multiples. Elles reposent sur des méthodes de prédiction numérique qui sont utilisées pour essayer de générer un échantillon représentatif des états futurs possibles d'un système dynamique. La prévision d'ensemble est une forme d'analyse de Monte Carlo : les prévisions numériques multiples sont réalisées en utilisant des conditions initiales différentes qui sont toutes plausibles étant donné la série d'observations ou de mesures passées et actuelles. Parfois, l'ensemble de prévisions peut

utiliser des modèles de prévision différents pour des formulations ou des membres différents du modèle de prévision. Les simulations multiples sont utilisées pour prendre en considération les deux sources d'incertitude dans les modèles de prévision : tout d'abord, les erreurs introduites par la nature chaotique des phénomènes ou «leur sensibilité aux conditions initiales» ; ensuite, les erreurs dues aux imperfections du modèle. En utilisant les résultats d'un certain nombre de prévisions dites réalisations, la fréquence relative des événements au sein de l'ensemble peut être utilisée directement pour estimer la probabilité d'un événement météorologique ou de crue. Les prévisions d'ensemble ou probabilistes sont plus largement appliquées à la prévision numérique du temps (PNT) qu'aux modèles hydrologiques. Ceci a pour conséquence que les résultats probabilistes d'un certain nombre de PNT sont utilisés pour fournir le scénario «le plus probable» à employer comme données d'entrée pour le modèle hydrologique. L'application des approches ensemblistes à la fois à la PNT et aux modèles hydrologiques fournirait des résultats avec une large gamme d'incertitudes.

### 3.2.8 Paramètres des modèles hydrologiques

Des paramètres sont utilisés pour exprimer les relations fonctionnelles entre les divers sous-processus, mais également pour définir les sous-processus dans les modèles distribués conceptuels, à base physique et hybrides (à base physique/conceptuels). Dans le cas des modèles boîte noire basés sur les données, notamment les réseaux de neurones artificiels (RNA), les paramètres ou les poids définissent simplement les relations paramétriques entre les données d'entrée et de sortie des modèles. Dans le cas de modèles avec mise à jour des prévisions, si la mise à jour est une procédure distincte de la simulation, par exemple si elle est basée sur des erreurs de simulation, alors chaque mise à jour comportera un ensemble de paramètres différent de celui du modèle de simulation auquel il est associé. Cependant, si la mise à jour est intégrée au modèle de simulation, c'est-à-dire si elle fait partie intégrante de celui-ci, alors les deux ensembles de paramètres sont calés simultanément et la qualité des prévisions ne peut pas être attribuée à un ensemble spécifique.

Deux types de paramètres de modèles peuvent être identifiés. Le premier type a une importance physique directe et peut être déterminé par une mesure directe ou par une estimation indirecte en s'appuyant sur les relations théoriques ou empiriques qui relient ces paramètres aux caractéristiques observables (mesurables) du bassin versant. Idéalement, pour la modélisation à base physique, tous les paramètres des modèles devraient être de ce type. Le second type ne peut être mesuré directement mais doit être calé, généralement par optimisation automatique, en recherchant dans la gamme probable ou possible, c'est-à-dire entre les limites physiques ou les seuils, en faisant correspondre les données du modèle et le débit observé correspondant. Dans la pratique, la plupart des modèles «à base physique» nécessitent, dans une certaine mesure, un calage ou, tout du moins, des réglages fins de leurs paramètres. Par contraste, les paramètres des modèles boîte noire, que ce soit dans le cadre d'une simulation, d'une mise à jour ou d'une combinaison des deux, n'ont pas de signification physique et doivent tous être calés. (Pour une explication systématique et exhaustive du calage des modèles et de l'incertitude des paramètres lors du processus de calage, voir Duan et al., 2003, et Vrugt, 2004.)

## 3.3 MODÈLES DE PROPAGATION

### 3.3.1 Généralités

La procédure mathématique de propagation d'une crue via le stockage concentré dans un réservoir ou

réparti le long du tronçon d'un cours d'eau, permet d'estimer les changements de magnitude, de vitesse et de forme d'un hydrogramme de crue à l'entrée d'un ou de plusieurs points le long d'un cours d'eau à mesure que l'onde de crue progresse d'amont en aval. L'hydrogramme entrant sur une section amont peut résulter du ruissellement généré par les précipitations de la zone contributrice en amont, d'un lâcher d'eau depuis un réservoir, ou encore d'un glissement de terrain dans des réservoirs. L'hydrogramme sortant de la section en aval est caractérisé par un pic proportionnellement moins élevé, un temps de base plus long et un décalage entre les pics des hydrogrammes à l'entrée et à l'exutoire ou, en d'autres termes, une atténuation du phénomène (Mutreja, 1986). Il existe de nombreux traitements ayant fait leurs preuves en matière de propagation, y compris ceux de Dooge (1986), Beven et Wood (1993), Fread (1993) et Singh (1996).

Les techniques de propagation sont généralement classées soit dans la catégorie hydrologique soit dans la catégorie hydraulique, ainsi qu'illustré en Figure 3.4.

Différents types de modèles de propagation ont été développés couvrant une large gamme de besoins en termes de complexité et de calcul. Comparée à la propagation hydrologique, qui est principalement empirique et se focalise sur la relation entre les hydrogrammes aux sections en amont et en aval d'un tronçon de cours d'eau, la propagation hydraulique fournit une description à base physique des dynamiques du débit, par exemple la vitesse et la profondeur en fonction de la distance et du temps. Toutefois, la propagation hydraulique nécessite des informations détaillées sur les tronçons du cours d'eau et des efforts de calcul nettement plus conséquents. En préambule à l'exploration des possibilités d'utiliser la propagation d'onde dynamique à deux dimensions, Rehman et al. (2003) fournit une comparaison fort utile des techniques de propagation hydrologique et hydraulique appliquées aux modèles hydrologiques, mentionnant la limitation des modèles hydrologiques du fait de l'agrégation simplifiée des paramètres. De bonnes études documentaires de ces modèles sont disponibles dans Fread (1993) et le Rapport technique de l'OMM-N° 77 (2004).

### 3.3.2 Propagation hydrologique

Les modèles de propagation hydrologique peuvent être généralement répartis en deux groupes : tout d'abord, les modèles à seuil utilisés pour le stockage concentré ou le stockage global, comme les réservoirs ou les lacs ; ensuite, les modèles à stockage distribué utilisés pour les rivières et les lacs longs et étroits. Dans les deux catégories, les modèles peuvent être soit linéaires soit non linéaires et soit paramétriques soit non paramétriques. Bien que certains auteurs

(par exemple Fread, 1993) considèrent les modèles systémiques boîte noire comme une catégorie de modèle de propagation à part, cette distinction est peut-être inutile car elle repose surtout sur le fait de savoir si le modèle puise ses origines dans la théorie des systèmes ou s'il peut être interprété comme tel. Dans le cas de la propagation hydrologique, contrairement à la propagation hydraulique abordée ci-dessous dans ce paragraphe, tous les paramètres sont globaux et applicables uniquement au tronçon de cours d'eau pour lequel ils ont été déterminés. Il convient de noter les particularités suivantes des deux groupes :

(a) Pour la propagation des crues en présence de réservoirs à seuils, le niveau de la surface de l'eau dans le réservoir de stockage est calculé à tout moment. L'élévation du niveau de surface de l'eau évolue dans le temps et le débit sortant du réservoir est supposé, de façon unique et sans hystérésis, être fonction de l'élévation du niveau de surface de l'eau et donc du stockage d'eau dans le réservoir. Cette méthode peut être utilisée pour les réservoirs avec des déversoirs de trop-plein non contrôlés, de types à seuil profilé, à seuil épais et en forme de puits. Elle peut également être étendue aux évacuateurs contrôlés par vannes si le débit peut être exprimé suivant une fonction connue de l'élévation du niveau d'eau et du degré d'ouverture des vannes

(Fread, 1993). Les méthodes «Puls modifiée», «Runge-Kutta» et «Intégration trapézoïdale itérative» sont des exemples de méthodes de propagation par seuil.

(b) Pour les modèles de propagation avec stockage distribué utilisé pour les rivières, on considère un profil de la surface de l'eau en pente, généré par le passage d'une onde de crue. La méthode de propagation la plus populaire de ce type est la méthode Muskingum. On part de l'hypothèse d'une relation stockage-débit suivant laquelle le stockage total est la somme du stockage en prisme (débit de base) et du stockage en coin (additionnel) dans le tronçon. Cette méthode fournit des résultats raisonnablement précis pour des crues lentes à modérées se déplaçant dans des rivières ou des canaux à pente douce à soutenue. Dans cette catégorie, les autres méthodes de propagation de type stockage incluent les méthodes «Kalinin-Miljukov» et «lag and route (délai et propagation)».

3.3.3 Propagation hydraulique

Dans le cas de la propagation hydraulique monodimensionnelle, le débit est calculé en fonction du temps à plusieurs coupes verticales simultanément le long du tronçon du chenal concerné. Cette approche est basée sur la solution des équations

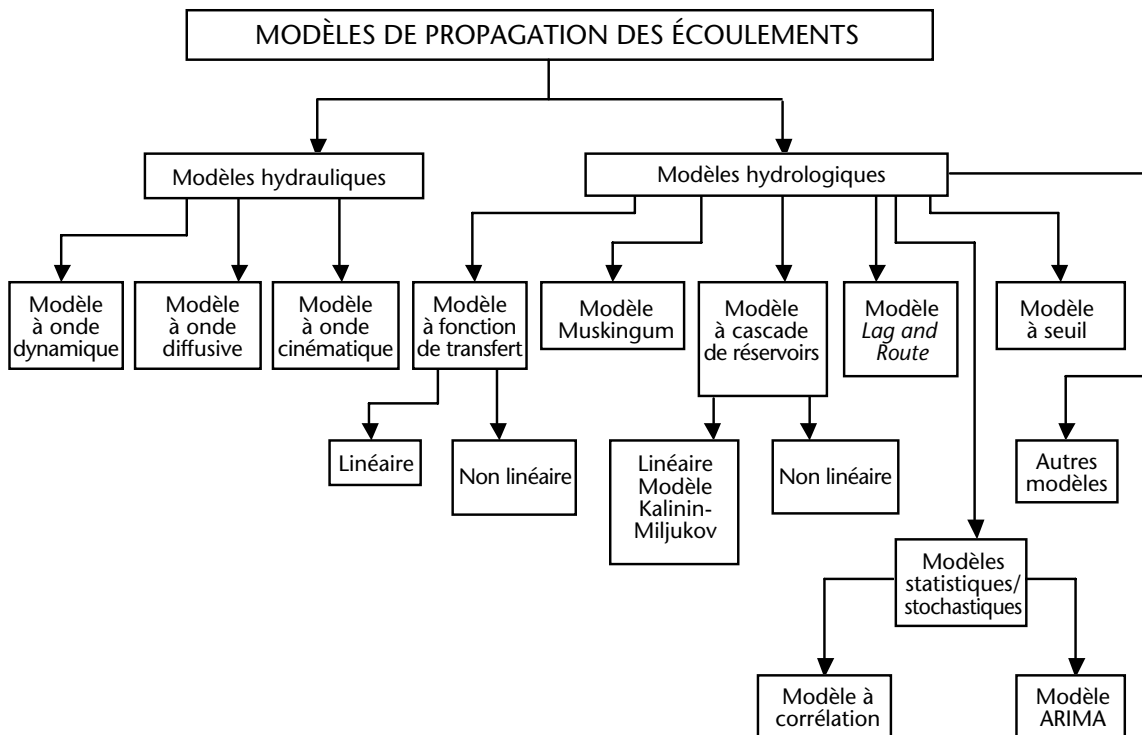


Figure 3.4. Classification des modèles de propagation des écoulements



monodimensionnelles de Saint-Venant pour les écoulements à surface libre, à savoir les équations «de continuité» ou de «conservation de la masse» :

$$\frac{\partial y}{\partial t} + D \frac{\partial V}{\partial x} + D \frac{\partial y}{\partial x} = q_b \quad (3.1)$$

et, sous une forme adimensionnelle, l'équation de mouvement connue sous le nom d'équation «dynamique» ou «de quantité de mouvement» :

$$S_f = S_o - \frac{\partial y}{\partial t} - \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial y}{\partial t} \quad (3.2)$$

où :

- $g$  = est l'accélération due à la pesanteur ;
- $y$  = est la hauteur d'eau ;
- $V$  = est la vitesse ;
- $q_b$  = est le débit à une section de largeur  $b$  ;
- $t$  = est le temps ;
- $S_o$  = est la pente au bas du chenal ;
- $S_f$  = est la perte de charge due au frottement.

Les hypothèses utilisées sont :

- (a) L'écoulement est monodimensionnel ;
- (b) La longueur  $L$  du tronçon considéré pour la propagation est de nombreuses fois plus importante que la hauteur d'eau  $y$  ;
- (c) Les accélérations verticales sont négligeables et la distribution verticale de la pression de l'onde est hydrostatique ;
- (d) La densité de l'eau est constante ;
- (e) Le lit et les berges du chenal sont fixes dans le temps ;
- (f) La pente du lit du chenal est relativement douce (Fread, 1993).

La propagation hydraulique basée sur les équations de Saint-Venant complètes est appelée «propagation dynamique». Les modèles de propagation dynamique les plus communément utilisés sont la «méthode des caractéristiques» et la «méthode directe». Pour la méthode des caractéristiques, la paire d'équations de Saint-Venant et leurs relations de cohérence correspondantes sont d'abord transformées en un ensemble équivalent de quatre équations différentielles ordinaires. Celles-ci sont ensuite approximées par des schémas aux différences finies pour obtenir la solution. Bien qu'étant séduisante conceptuellement, cette méthode offre peu d'avantages par rapport aux méthodes directes plus simples pour de nombreuses applications pratiques. Les méthodes directes peuvent être «explicites» ou «implicites». Dans la méthode explicite, les équations différentielles sont transformées en un ensemble d'équations algébriques qui sont résolues séquentiellement pour la vitesse et la profondeur inconnus à chaque coupe verticale et à chaque pas de temps. Dans la méthode implicite, les équations

différentielles sont transformées en un ensemble d'équations algébriques qui sont résolues simultanément, à chaque pas de temps, pour tous les segments de calcul. La méthode implicite est généralement privilégiée à la méthode explicite en raison de son efficacité de calcul. Les méthodes des éléments finis sont également utilisées à la place des différences finies pour résoudre les équations de Saint-Venant, mais elles sont plus appropriées pour les calculs de débit bidimensionnels ou tridimensionnels. Alors que l'équation dynamique complète est nécessaire pour la résolution des problèmes d'écoulement rapidement modifié, incluant des grandes valeurs du Nombre de Froude, comme dans le cas d'une «rupture de barrage», des formes plus simples conviennent pour une propagation normale. Ainsi, les formes simplifiées des équations de Saint-Venant, connues sous le nom d'équations «de diffusion» et «cinématique», sont largement utilisées.

Pour un traitement plus détaillé des méthodes de propagation dans les canaux hydrauliques, y compris les variations à paramètres variables et non linéaires de la méthode Muskingum-Cunge et d'autres approximations à onde diffusive présentées comme des cas spécifiques (par exemple, le modèle Koussis, qui utilise la forme modifiée et améliorée «concordante discrète» du modèle Muskingum de Nash, ainsi que le modèle Kalinin et Milyukov), voir Singh (1996), Knight et Shamseldin (2006).

### 3.4

#### **MODÈLES MIXTES DE BASSINS VERSANTS ET DE PROPAGATION**

Les modèles de bassins versants sont utilisés pour simuler la réaction du bassin hydrographique pour générer un débit à un point donné qui, selon le type de modèle et d'échelle utilisés, peut être l'exutoire d'une unité de réponse hydrologique (HRU – Hydrologic Response Unit), c'est-à-dire une parcelle de terrain ou un élément de grille du modèle distribué, un sous-bassin hydrographique ou le bassin hydrographique dans sa totalité. Ce débit est ensuite propagé de façon appropriée à l'aide de différentes procédures, selon le type de modèle et l'échelle d'application, afin d'obtenir le débit simulé au point ciblé du bassin hydrographique.

En agrégeant les paramètres, les modèles de bassins hydrographiques du type «boîte noire» ne tiennent explicitement compte ni du bilan hydrique, ni de la propagation du débit qui font partie du processus hydrologique réel permettant de transformer les données d'entrée en données de sortie. À l'inverse, ils considèrent la procédure dans son ensemble de

façon intégrée par le biais d'expressions systémiques théoriques linéaires ou non linéaires. Sous cette forme, les modèles conceptuels intègrent généralement une propagation explicite des composantes de débit générées par leurs divers modules de bilan hydrique, incluant un ou plusieurs éléments de propagation. Pour certains modèles, les composantes de débit générées sont propagées par un ou plusieurs éléments de stockage, par exemple un système en cascade (comprenant une série de réservoirs linéaires), avec un réservoir linéaire unique en parallèle. Par exemple, dans le modèle conceptuel de calcul de l'humidité du sol et de propagation (SMAR – Soil Moisture Accounting and Routing), le système de réservoirs équivalents en cascade de Nash est utilisé en parallèle avec un réservoir linéaire unique, le premier pour propager le ruissellement à réaction rapide et le second pour propager le débit des eaux souterraines à réaction lente. Dans le cas du modèle classique à réservoirs de Sugawara (Sugawara, 1995), il n'y a pas de processus explicite de propagation du débit. Dans ce cas, les données de sortie des quatre réservoirs de stockage sont considérées comme correspondant à l'écoulement de surface, l'écoulement intermédiaire, l'écoulement de la couche inférieure et le débit de base respectivement, ces écoulements devenant les composantes du débit total à l'exutoire du bassin hydrographique. Bien que les réservoirs fournissent une forme de délai, cela est souvent insuffisant et (comme c'est le cas pour de nombreux autres modèles) un délai explicite doit être introduit.

Des éléments de propagation sont incorporés dans les modèles distribués conceptuels et à base physique. Par exemple, dans le modèle conceptuel Xinanjiang (Zhao et al., 1980 ; Zhao et Liu, 1995), les composantes calculées pour l'écoulement retardé et pour les eaux souterraines sont propagées par l'intermédiaire de réservoirs linéaires et sont ensuite ajoutées à la composante d'écoulement de surface pour générer le débit entrant vers le réseau de chenaux. La propagation par le réseau de biefs dans un sous-bassin hydrographique est représentée par la convolution de ce débit entrant avec un hydrogramme unitaire empirique ou par le modèle *lag and route*, le résultat de cette convolution étant le débit sortant du sous-bassin hydrographique. Enfin, le débit sortant du sous-bassin hydrographique est propagé par le modèle Muskingum à biefs successifs afin de générer le débit à l'exutoire du bassin versant. Les autres modèles distribués incluent le TOPMODEL (Beven et Kirkby, 1979 ; Beven, 1997 a, b), ainsi que le modèle d'approximation et d'intégration topographique cinématique (TOPKAPI – TOPographic Kinematic Approximation and Integration): Ciarapica et Todini, 2002 ; Todini et Ciarapica, 2002). Sur le Danube, le Service de prévision hongrois possède une expérience de plusieurs décennies quant à l'utilisation du modèle

de propagation des crues appelé modèle en cascade linéaire discret.

### 3.5 MODÈLES SPÉCIFIQUES

#### 3.5.1 Marées de tempête

Les marées de tempêtes sont causées par la combinaison de basses pressions atmosphériques et de vents forts, qui provoquent l'élévation du niveau de la mer à l'abord du littoral. Une chute de pression de 10 hectopascal provoque une élévation du niveau de la mer de 10 centimètres, suivant la topographie des fonds marins et la rapidité avec laquelle la dépression se déplace. Loin du littoral et en eaux profondes, l'augmentation du niveau de la mer en raison des basses pressions (par exemple lors d'un cyclone) restera limitée. Près du littoral, les effets dynamiques prennent une autre envergure et amplifient l'effet des marées de tempête. Par exemple, une augmentation du niveau de la mer de six mètres a été observée à l'arrivée de l'ouragan Hugo sur le littoral des États-Unis en 1989 alors qu'en pleine mer, l'élévation était inférieure à un mètre.

Deux types de modèles (statistiques et dynamiques) peuvent être utilisés pour prévoir les marées de tempêtes. Les modèles statistiques nécessitent des enregistrements en continu du niveau de la mer sur une période relativement longue, car cela permet au modèle d'opérer des réglages fins sur la base d'un certain nombre de paramètres de prévision atmosphériques. Bien que ce type de modèle soit rapide à calculer, des prévisions ne peuvent être effectuées que pour les endroits où les mesures ont été prises. Comme les méthodes de calcul ont évolué, les modèles dynamiques sont désormais utilisés pour prévoir les marées de tempêtes sur l'ensemble d'un littoral. L'utilisation de modèles numériques pour la prévision des marées de tempêtes est désormais une technique bien établie et constitue la base des méthodes de prévision opérationnelles. Les modèles déterministes, d'autre part, sont basés sur la résolution d'équations représentant les différentes composantes des processus physiques. Ces modèles doivent être ajustés conformément aux événements passés, la valeur de certains paramètres étant modifiée selon les caractéristiques physiques de l'environnement (par exemple la force de frottement) et les caractéristiques de l'écoulement (par exemple la turbulence). Les calculs nécessaires prennent beaucoup de temps et les utilisateurs doivent avoir une solide expérience pour savoir les utiliser.

Les mêmes types de modèles sont utilisés pour les estuaires. Certains services de gestion ou de prévision du niveau des eaux utilisent surtout les modèles statistiques pour établir une corrélation entre ce qui se

produit à l'embouchure d'un estuaire et sur d'autres sites sensibles. C'est le cas de l'estuaire de la Gironde en France, où le Service de prévision des crues – SPC utilise entre autres un modèle statistique pour réaliser ses prévisions à Bordeaux, sur la base des enregistrements effectués au niveau de l'embouchure au Verdon. Ces modèles peuvent être utilisés seulement dans la région couverte par les événements mesurés.

Toutefois, les nouvelles technologies ont permis le développement de nouveaux modèles déterministes qui, par le passé, auraient été difficiles à utiliser dans le cadre d'un modèle de prévision. Les modèles sont monodimensionnels, bidimensionnels et même tridimensionnels. Ce sont les mêmes que ceux utilisés en pleine mer, mais ils tiennent compte des forces de frottement sur les fonds et les rives des estuaires, ainsi que de la modification de la densité de l'eau provoquée par la coexistence de l'eau salée et de l'eau douce et de la présence d'une forte concentration de limon.

### 3.5.2 **Crues éclair**

Les crues éclair sont des crues pendant lesquelles le niveau des eaux augmente rapidement en raison de précipitations excessives ou de la rupture d'un barrage. Les crues éclair dues aux précipitations sont des événements de crue exceptionnels qui se développent dans les quelques heures qui suivent l'événement de précipitation qui les génère, souvent dans les régions montagneuses ou dans des zones présentant de vastes surfaces imperméables (voir 3.5.3). Même si la plupart des crues éclair observées sont liées aux précipitations, les ruptures de barrages naturelles (par exemple de la glace ou des amas de débris temporaires) ou causées par l'homme peuvent aussi provoquer un afflux massif de volumes d'eau retenus sur une courte période de temps, avec des conséquences catastrophiques en aval.

Les crues éclair peuvent être extrêmement destructrices et on estime que pratiquement la moitié des dégâts dus aux inondations chaque année aux États-Unis et 80 pour cent des victimes liées aux crues dans ce pays au cours de la décennie 1995-2005 ont été causés par des crues éclair (NOAA-NWS, 2005). À l'échelon international, le nombre de victimes liées aux crues éclair est proportionnellement très élevé par rapport aux autres formes de crues. Jonkman (2005) indique que le nombre de victimes s'élève à quatre pour cent du total de personnes affectées par les crues éclair, tandis que les victimes liées aux autres types de crues représentent moins d'un pour cent des personnes affectées. Certaines projections des impacts du changement climatique indiqueraient une intensification des événements de précipitation à l'origine des crues éclair.

Les crues éclair doivent être traitées comme un événement hydrométéorologique, plutôt que comme un événement hydrologique uniquement, pour pouvoir disposer de temps de réaction raisonnables. Une coopération en temps réel des services météorologiques et hydrologiques est nécessaire pour disposer de systèmes fiables de prévision et d'annonce des crues éclair. De la même façon, les services de prévision et d'annonce des crues éclair doivent être opérationnels en continu (24 heures par jour, 7 jours sur 7). Les modèles numériques performants pour la prévision des crues éclair nécessitent l'utilisation intensive et réactive des informations de précipitation et de débit locales, ainsi que des systèmes vraiment couplés (ou même des modèles) pour la prévision à court terme de ces composantes (par exemple, voir Georgakakos, 1986). Une prévision précise et fiable nécessite des données et des prévisions exactes à de petites échelles spatiales. Il est nécessaire de prendre en compte les types d'erreurs associées à la surveillance en continu grâce aux plates-formes de télédétection (radars et satellites) et aux prévisions spatialement localisées générées par les modèles hydrologiques distribués. Une communication efficace et en temps voulu sur l'incertitude des prévisions est très importante pour les prévisions de crues éclair (voir par exemple NRC, 2006).

### 3.5.3 **Crues urbaines**

D'ici l'année 2025, la population urbaine mondiale devrait atteindre le chiffre de 5,5 milliards, représentant ainsi 61 pour cent de la population totale de la planète. L'urbanisation continue des plaines inondables naturelles a provoqué beaucoup de morts et de dégâts aux biens et la tendance s'accroît de façon alarmante (NRC, 1991 ; Chagnon, 1999). La nécessité d'améliorer la gestion de l'eau dans les zones urbaines à l'échelon planétaire devient de plus en plus pressante (OMM, 1994 ; Pielke et Downton, 2000 ; Dabberdt et al., 2000). Un volume considérable de documentation est disponible en matière d'hydrologie et de gestion de l'eau en milieu urbain (voir par exemple les études réalisées dans Urbonas et Roesner, 1993 ; Kovar et Nachtnebel, 1996 ; Dabberdt et al., 2000). Les caractéristiques spécifiques de l'hydrologie en milieu urbain sont, tout d'abord, l'existence de larges superficies imperméables ou quasi-imperméables, et ensuite, la coexistence des systèmes d'évacuations naturels et technologiques (par exemple, les égouts, les digues, les pompes et bassins de rétention). Par conséquent, la génération du ruissellement de surface par la pluie est extrêmement variable et hétérogène, et le débit d'eau et de contaminants aux exutoires est accentué vers des valeurs plus élevées sur les hydrogrammes. Une grande variabilité spatio-temporelle des précipitations se traduit par une extrême variabilité spatio-temporelle du ruissellement, car les bassins

hydrographiques urbains n'atténuent pas suffisamment ces fluctuations. Les techniques des systèmes d'évacuation et les améliorations des systèmes naturels de drainage des eaux expliquent le fait que les pics de débit se produisent plus tôt et sont plus élevés. En ce qui concerne les impacts hydrologiques, le problème de la prévision et de la gestion des crues s'aggrave pour les événements considérés comme ayant une période de retour comprise entre 5 et 100 ans (entre 20 et 1 pour cent de chance d'occurrence lors d'une année donnée) et les problèmes associés en matière de qualité de l'eau peuvent être sérieux.

En raison de ces caractéristiques, une résolution spatiale et temporelle très élevée pour les données, les modèles et le suivi, des grandes zones urbanisées sont nécessaires pour une gestion des crues efficace (voir par exemple Dabberdt et al., 2000). Ainsi, des données radar météorologiques combinées avec des données de pluviomètres automatiques in situ (Cluckie et Collier, 1991 ; Braga et Massambani, 1997 ; Georgakakos et Krajewski, 2000), un SIG, un modèle numérique de terrain et des modèles hydrologiques distribués (Kovar et Nachtnebel, 1996 ; Riccardi et al., 1997) sont nécessaires pour développer des systèmes de prévision et de gestion du ruissellement urbain. Dans les zones où une forte extension des zones urbanisées est associée à un terrain vallonné et à des orages de convection (Kuo, 1993), le besoin de développer des systèmes capables d'une résolution très élevée sur de vastes zones urbanisées est d'autant plus grand.

Les crues urbaines peuvent résulter de deux causes. Tout d'abord, les zones urbaines peuvent être inondées par les rivières qui les traversent (crue fluviale) et ceci peut être surveillé au moyen de prévisions spécifiques concernant la hauteur des rivières. Ensuite, les crues urbaines peuvent se produire sous la forme de crues éclair saturant les réseaux de drainage (inondations pluviales). Dans ce cas, d'intenses précipitations s'abattant sur les zones urbaines peuvent provoquer des inondations des rues et des propriétés dans les zones basses, les anciennes voies navigables, les passages souterrains et les dépressions du réseau routier. Bien souvent, ce type d'inondations est accentué par la présence de débris et d'obstructions dans les tuyaux, les canaux ou encore les exutoires des bassins de rétention. Des plans d'annonce des crues similaires à ceux utilisés dans le cas de crues éclair peuvent être employés, incluant des systèmes locaux d'annonce des crues éclair automatisés ou des systèmes d'annonce généralisés basés sur des directives nationales en matière de crues éclair. Il est également possible d'adapter les estimations en matière de crues éclair au milieu urbain sur la base de modèles numériques de terrain à très haute résolution spatiale, des réseaux d'évacuations des eaux (naturels et technologiques) et des ouvrages hydrauliques existants.

### 3.5.4 Gestion des crues au moyen de réservoirs

Les réservoirs écrêteurs de crue, le cas échéant, peuvent jouer un rôle crucial dans la gestion des crues. Pour que le fonctionnement de ces réservoirs soit optimal, des estimations fiables des débits de crue entrants prévus sont nécessaires sur la période requise pour le remplissage et la vidange des bassins de rétention.

Pour la plupart des réservoirs, dont l'objectif premier est l'approvisionnement en eau, les opérations de gestion des crues sont une composante importante de leur gestion. Le niveau d'abaissement minimum de l'eau est fixé à partir de considérations de conception afin d'obéir aux objectifs en matière d'utilisation de l'eau. La plupart des crues se produisent généralement durant la saison humide, et même si le bassin de rétention est plein, un certain effet d'atténuation de l'hydrogramme de crue entrant se fera sentir en raison de la taille du bassin, le débit sortant étant relâché par des évacuations soit contrôlées soit non contrôlées. Les bassins sont conçus avec des caractéristiques spécifiques définies par le stockage et le débit sortant jusqu'à un niveau d'eau maximum. Toutefois, dans le cas de crues de très grande ampleur, cette capacité prévue peut être dépassée et il se peut que des lâchers d'eau doivent être effectués. En fonction de la situation de crue dans la région en aval du barrage, qui peut être déjà critique durant la saison humide, de tels lâchers d'eau au niveau des réservoirs peuvent avoir des effets dévastateurs, d'où la nécessité d'une gestion et d'une surveillance efficaces.

Les méthodes de contrôle sont conçues sur la base d'une analyse risques-avantages, et les politiques d'exploitation ou les règles opérationnelles sont élaborées pour obtenir un maximum de bénéfices de cette infrastructure de stockage. Il n'était pas rare par le passé de baser les règles opérationnelles sur les connaissances actuelles du stockage disponible dans le réservoir et, en l'absence de prévisions de débits entrant, d'inclure des estimations de l'incertitude pour améliorer le niveau de protection contre les crues par une gestion plus efficace du réservoir.

À l'inverse, lorsque le rôle premier d'un réservoir est la gestion des crues, le réservoir est maintenu au niveau le plus bas possible pour contenir tout débit de crue entrant. Les eaux de crue sont évacuées graduellement du réservoir suivant la capacité du chenal en aval pour propager en toute sécurité le débit relâché. Après le passage d'une crue, dont l'hydrogramme est modifié par la rétention temporaire, le débit entrant suivant est évacué continuellement sans stockage jusqu'à ce qu'une nouvelle crue apparaisse.

Pour gérer les débits de crue avec un bassin multifonctions, il est impératif que des prévisions du débit entrant soient disponibles. Il est nécessaire que ces prévisions soient intégrées à celles des zones riveraines en aval, car des inondations, indépendantes de tout lâcher d'eau du réservoir en amont, peuvent se produire au même moment dans ces régions. Le scénario de crue en aval du réservoir doit être étudié pour décider les quantités d'eaux de crue à évacuer pour éviter une aggravation de la situation en aval. Généralement, l'objectif de ces opérations de gestion des crues n'est pas nécessairement de retenir le pic de crue entrant au niveau du réservoir. Il s'agit plutôt de garantir la meilleure atténuation possible pour un ou plusieurs sites en aval avec un décalage acceptable.

Dans le cas d'une cascade de plusieurs réservoir dans une rivière ou de réservoirs situés au niveau des différents affluents de la rivière en question, l'exploitation devient plus complexe, mais fournit également davantage de flexibilité. Dans de tels cas, tous les réservoirs doivent être considérés comme tous les éléments d'un seul et même système, car une coordination globale de tous les réservoirs permettra une gestion plus efficace.

De nombreuses références concernant les modèles et les techniques d'exploitation des réservoirs sont disponibles dans la documentation (par exemple, pour le développement d'un modèle de prévision des lâchers d'eau au niveau des réservoirs, Bowles et al., 2004 ; pour un modèle mensuel pour un seul réservoir, Mariño et Mohammadi, 1985 ; pour le fonctionnement quotidien d'un système à réservoirs multiples mais aussi pour le fonctionnement d'un réservoir multifonctions, Mohammadi et Mariño, 1984 ; pour l'optimisation de systèmes de réservoirs multifonctions à grande échelle, Bonazountas et Camboulives, 1981 ; pour une technique visant à déterminer les règles opérationnelles, Rohde et Naparaxawong, 1981 ; pour une utilisation optimale d'un réservoir multifonction par un modèle de programmation dynamique, Güitrón, 1981).

### 3.6 DISPONIBILITÉ DES MODÈLES

Des modèles peuvent être développés en interne par les centres ou les instituts de prévision des crues si les installations requises existent. Toutefois, il devient de plus en plus rare que de tels développements aient lieu en raison de la complexité de la modélisation et des systèmes de gestion nécessaires. Plus communément, le développement peut être confié à un consultant spécialisé, ce qui, outre les frais de développement et d'application, impliquera également des

frais de licence permanents pour l'utilisation du modèle, et des contrats permanents pour la logistique et les mises à jour. Une autre source de modèles bien établis est l'Internet. Des téléchargements, à titre gratuit, sont possibles dans la plupart des cas. Cependant, ces sources ne fournissent généralement pas la logistique, la formation et le développement.

Voici une liste de sites Internet de logiciels de modélisation dignes d'intérêt :

- [http://www.wmo.int/pages/prog/hwrp/homs/homs\\_fr.html](http://www.wmo.int/pages/prog/hwrp/homs/homs_fr.html) (SHOFM de l'OMM);
- <http://toolkit.ewater.com.au/> (Boîte à outils de modélisation des bassins hydrographiques eWater);
- <http://hydrologicmodels.tamu.edu/models.htm> (United States Bureau of Reclamation Hydrological Modelling Inventory – Inventaire de la modélisation hydrologique du Bureau de la gestion des ressources en eau des États-Unis);
- <http://www.efas.eu/> (Système de prévision des crues européen).

Aux États-Unis, le modèle Sacramento est utilisé par le Service météorologique national (NWS) pour les analyses de crues, et en particulier la version «ALERT» pour la prévision des crues en temps réel. Au Canada, plusieurs modèles continus, avec les composantes de cumul de neige et de fonte des neiges associées, sont utilisés pour la gestion des grands systèmes de réservoirs interconnectés.

Au Royaume-Uni, la tendance n'est plus aux agences de gestion des bassins versants individuelles développant leurs propres modèles mais plutôt à un système plus intégré, connu sous le nom de «système à architecture ouverte». Dans ce système, les structures principales sont fournies par un grand spécialiste de la modélisation des crues, mais il est néanmoins possible d'intégrer certains systèmes existants (systèmes développés antérieurement). Afin d'accroître les délais pour les prévisions de crues, le système est associé aux modèles de prévision numérique du temps (PNT) les plus récents du Met Office du Royaume-Uni. Le dernier de ces modèles est le STEPS, qui combine les données de prévision numérique du temps et les données pluviométriques par radar.

En Allemagne, et tout particulièrement pour le Rhin, le Main et le Lech, des techniques basées sur les modèles continus sont utilisées et dans certains cas, comme par exemple pour le Rhin à Coblenz et Kaub, des filtres de Wiener sont utilisés. En France (par exemple pour la Loire, la Seine, la Garonne et la Saône), ce sont les modèles événementiels basés sur des techniques d'identification des fonctions de transfert développées à l'Université de Grenoble qui prédominent (Nalbantis et al., 1988).

En Italie, le modèle ARNO, qui incorpore la méthode de propagation parabolique linéaire sur les pentes des bassins hydrographiques et dans les chenaux, a été utilisé pendant de nombreuses années comme élément central du Système opérationnel européen de prévision des crues en temps réel (EFFORTS). Ce système, développé à l'origine pour la rivière Fuchun en Chine, a été appliqué avec succès au fleuve du Danube en Allemagne ainsi qu'à plusieurs rivières italiennes. Au cours des dernières années, le modèle TOPKAPI, un modèle distribué à base physique, a été incorporé au système EFFORTS dans le cadre du Projet intégré des mesures de précipitations à capteurs multiples (MUSIC – Multi-sensor Precipitation Measurements integration Project). Il est opérationnel sur les rivières Arno et Reno, ainsi que sur neuf autres rivières italiennes de tailles plus réduites.

Dans la plupart des pays d'Europe de l'Est, l'utilisation de modèles continus a été développée sous l'action du système SHOFM de l'OMM, par l'intermédiaire duquel la plupart des programmes informatiques pluie-débit (CLS, Natale et Todini, 1977 ; SACRAMENTO ; modèle des écoulements et de gestion des réservoirs (SSARR – Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation) ; TANK ; IPA continu, Sittner et al., 1969) ont été mis à disposition, soit directement soit dans le cadre de projets de coopération internationaux (OMM – Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD)).

Au Bangladesh, le Centre de prévision et d'annonce des crues (FFWC) utilise largement les techniques SIG pour afficher l'état du niveau d'eau et des précipitations qui rentrent dans le modèle de prévision des crues MIKE 11 FF. Le centre utilise un modèle monodimensionnel totalement hydrodynamique (MIKE 11 HD) incorporant toutes les principales rivières et plaines inondables, qui sont reliées à un modèle conceptuel global pluie-débit (MIKE 11 RR), qui, à son tour, génère des débits entrants en provenance des bassins hydrographiques secondaires du pays. En République de Corée, un Système de prévision et d'annonce des crues coréen (KFMWS – Korean Flood Monitoring and Warning System) basé sur un SIG a été développé dans un environnement B/S pour cinq grandes rivières depuis 1987, et le système a été récemment étendu à la gestion des crues de plusieurs rivières secondaires.

La Commission du fleuve Mékong (MRC) utilise actuellement des modèles mathématiques (SSARR, régression, RNA) pour fournir une prévision de crues sur trois jours durant la saison des pluies pour plus de 20 sites le long du fleuve principal, sur la bases de données quotidiennes en provenance de 37 stations hydrologiques et 22 stations pluviométriques.

La Chine a grandement développé ses systèmes de prévision des crues en interne à partir de plusieurs modèles différents. Durant la période des crues, le Centre national de prévision des crues du Ministère des ressources en eau réalise des prévisions de crues en temps réel toutes les six heures, sur la base de quelque 3 000 stations pluviométriques réparties sur l'ensemble du pays, pour les sept grandes rivières (y compris, le Yangzi Jiang, le Fleuve Jaune, le Hai He et la rivière des Perles) à l'aide du Système national chinois de prévision des crues (CNFFS – China National Flood Forecasting System). De nombreux modèles de prévision des crues différents sont employés dans ce système, y compris le modèle Xinanjiang (Zhao et al., 1980 ; Zhao, 1992 ; Zhao et Liu, 1995), d'autres modèles tels que IPA, Sacramento, Tank, SMAR (Tan, 1996), ainsi que le Système linéaire mixte contraint (SCLS – synthetic constrained linear system), tels qu'indiqués dans le tableau.

#### Modèles de prévision des crues employés par le CNFFS

1. Modèle Xinanjiang	10. Modèle SMAR
2. Modèle IPA, modèle IA	11. Modèle NAM
3. Modèle de débit Jiangwan	12. Modèle Tank
4. Modèle de crue de tempête Hebei	13. Modèle Sacramento
5. Modèle Shanbei	14. Modèle SCLS
6. Modèle Xinanjiang pour les régions semi-arides	15. Méthode d'indice pour la courbe de récession
7. Modèle Liaoning	16. Méthode à courbe de récession
8. Modèle à double courbe de récession	17. Méthode à hydrogramme unitaire
9. Modèle à double cumul de l'excédent du ruissellement	

Aux États-Unis, le Service météorologique national de l'Administration américaine pour les océans et l'atmosphère (NOAA) est responsable de la fourniture des prévisions des crues et des inondations au niveau national. Le Service météorologique national utilise son Système de prévisions fluviales (NWSRFS – National Weather Service River Forecasting System), qui comprend plus de 30 modèles hydrologiques utilisés dans les prévisions opérationnelles de 13 Centres de prévisions fluviales. Outre le NWSRFS, de nombreux autres modèles de prévisions des crues éclair sont utilisés par les Bureaux de prévisions météorologiques (WFOs – Weather Forecast), qui travaillent 24 heures sur 24, sept jours sur sept, pour fournir des prévisions et des annonces de crues au niveau national et pour certains sites spécifiques.

# CHOIX DES MÉTHODES OU MODÈLES APPROPRIÉS EN MATIÈRE DE PRÉVISION DES CRUES

### 4.1 FACTEURS AFFECTANT LE CHOIX

#### 4.1.1 Généralités

Le principal facteur qui détermine le choix d'une méthode ou d'un modèle pour la prévision des crues est la compréhension et la définition correcte des objectifs pour lesquels la méthode ou le modèle sera utilisé(e). Une fois que le champ d'application pour lequel le modèle est élaboré a été bien défini et compris, c'est la disponibilité des données qui conditionne la sélection du type d'approche de modélisation. Les approches vont des méthodes statistiques simples aux modèles à processus physiques extrêmement détaillés.

Pour la prévision des crues en temps réel, les facteurs supplémentaires suivants doivent être considérés lors de la sélection d'un modèle :

- (a) Le choix d'un délai de prévision plutôt que d'un temps de concentration (ou d'un temps de parcours lorsqu'il s'agit de propagation) ;
- (b) La robustesse de l'approche, dans le sens où, s'agissant de prévisions en temps réel, de soudaines instabilités ou de grosses erreurs de prévision doivent être évitées à tout prix, y compris en ayant recours à des approches légèrement moins précises ;
- (c) Le temps de calcul nécessaire, dans la mesure où la prévision doit être disponible à temps pour les gestionnaires de crues et les intervenants qui en dépendent pour garantir l'efficacité de leurs décisions. Fréquemment, cette exigence décourage l'utilisation d'approches sophistiquées et précises qui demandent beaucoup de temps.

#### 4.1.2 Choix du modèle approprié

Il n'existe pas de type spécifique de modèle qui soit plus approprié que les autres pour la prévision des crues (consulter l'examen des types de modèles du chapitre 3). Chaque catégorie de modèles possède ses propres avantages et désavantages. En règle générale, le modèle de prévision doit être utilisé pour réduire l'incertitude de prévision. Toutefois, il faut aussi trouver un équilibre entre le modèle considéré le plus fiable par le décideur et, si le décideur n'a pas d'opinion tranchée, le modèle considéré comme le plus satisfaisant d'après les connaissances scientifiques du développeur. Il existe également des considérations pratiques à prendre en compte, notamment les limitations liées aux moyens financiers et à la disponibilité commerciale d'un modèle particulier proposé sur le marché, qui est fourni par un accord de financement. Dans de tels cas, il faut tenir compte de la durée de vie estimée du modèle, du cycle de

passation des marchés de l'organisation ainsi que du fait que les systèmes logiciels sont rapidement périmés. Il existe un certain nombre de problèmes spécifiques qui peuvent limiter l'utilisation d'un type d'approche de modélisation par rapport à un autre, et ceux-ci sont abordés dans les Encadrés 4.1 à 4.3.

#### Encadré 4.1. Modèles basés sur des données

Les modèles basés sur des données sont généralement simples et faciles à caler, mais de nombreux utilisateurs finaux craignent que ces modèles puissent être moins fiables au-delà de la gamme de données historiques sur laquelle ils sont basés. Les modèles basés sur des données doivent être utilisés de préférence dans les cas où :

- (a) Le prédicand, c'est-à-dire le paramètre à prévoir, se trouve sur une section de rivière jaugée (une extension de leur utilisation à des sections transversales non jaugées est pratiquement impossible) ;
- (b) Des séries temporelles de données relativement longues sont disponibles qui comprennent la plus grande partie de l'amplitude de la variabilité du prédicand dans le temps ;
- (c) L'intervalle nécessaire pour obtenir la prévision est relativement court par rapport au temps de concentration (ou temps de parcours) du bassin hydrographique jusqu'à la section transversale concernée.

#### Encadré 4.2. Modèles (hydrologiques) conceptuels

Les modèles conceptuels sont les plus largement utilisés pour la prévision des crues. Cela est surtout dû au fait qu'ils sont facilement compréhensibles par les gestionnaires de crues (généralement des ingénieurs de génie civil) dans la mesure où ils essaient de décrire de façon rationnelle les différents composants du cycle hydrologique. Cela est possible grâce à l'utilisation de simples analogues de processus, tout en évitant le jargon «ingénieur système» typique des modèles basés sur des données. Les modèles conceptuels continus doivent être utilisés dans les cas où :

- (a) La variable à prévoir, se trouve sur une section de rivière jaugée (une extension de leur utilisation à des sections transversales non jaugées est souvent difficile) ;
- (b) Des séries temporelles de données sont disponibles sur une longue durée, qui comprend la majeure partie de l'amplitude de variabilité de la variable à prévoir dans le temps ;
- (c) L'intervalle nécessaire pour obtenir la prévision est du même ordre de grandeur que le temps de concentration (ou temps de parcours) jusqu'à la section transversale concernée.

Les modèles événementiels (à ne pas confondre avec les modèles continus) doivent être limités aux cas où les conditions initiales sont connues et n'ont ainsi pas d'impact variable significatif sur la réponse, par exemple lorsque les crues se produisent toujours à la même période de l'année parce que la teneur en humidité du sol est élevée.



### Encadré 4.3. Modèles à base physique

Pour les modèles à base physique, les différentes parties du cycle hydrologique sont plus spécifiquement représentées par des calculs mathématiques du processus physique, par exemple par l'écoulement des fluides dans les rivières et par des écoulements en milieu poreux dans les aquifères. En particulier, les modèles distribués spatialement doivent être utilisés dans les cas où :

- (a) Des données géomorphologiques et hydromorphologiques suffisantes sont disponibles ;
- (b) Il existe une exigence particulière pour extrapoler les prévisions à des sites non jaugés ;
- (c) Le temps de calcul du modèle est suffisamment court pour permettre des prévisions en temps voulu ;
- (d) Les données pluviométriques sont disponibles sous forme distribuée spatialement (par exemple sous forme de pixels provenant des signaux radar) ;
- (e) Les données pluviométriques distribuées spatialement indiquent une variabilité marquée sur différentes parties du bassin hydrographique.

#### 4.1.3 Modèles globaux et distribués

Les premiers modèles hydrologiques conceptuels ont toujours été des modèles globaux. Ceci reflétait la limitation des ressources de calcul disponibles à cette période, le manque de description spatiale des caractéristiques géomorphologiques des bassins hydrographiques et la limitation des mesures pluviométriques ponctuelles qui pouvaient être aisément regroupées en moyennes spatialisées. Depuis une dizaine d'années, de nombreux aspects ont changé. Les estimations pluviométriques radar sont le plus souvent disponibles sous formes de pixels basés sur une grille de dimensions variables, 1 à 5 kilomètres étant la taille normalement utilisée. Les modèles numériques de terrain (MNT) de plusieurs kilomètres carrés, généralement basés sur des grilles comprises entre 50 et 500 mètres (0,0025 à 0,25 kilomètres carrés), sont désormais disponibles pour de nombreux pays, de même que des cartes sur les types et l'utilisation des sols. La capacité et la rapidité des ordinateurs s'étant accrues de façon exponentielle, les grandes séries de données et formules peuvent maintenant être traitées dans des délais très courts. Une règle empirique (loi de Moore) montre que la vitesse des ordinateurs double tous les 18 mois, et les microprocesseurs actuels ont une capacité supérieure à celle des premiers ordinateurs centraux. Cela a permis le développement récent de grands modèles distribués qui peuvent également opérer en temps réel, quoique les exemples de modèles entièrement distribués de prévision en temps réel opérationnels restent encore rares. La plupart des modèles hydrologiques opérationnels utilisés sont de type global, généralement configurés sous forme de modèles semi-distribués afin de représenter de

grands bassins hydrographiques complexes (par exemple, les modèles Sacramento, NAM, Xinanjiang et ARNO).

Bien que l'intérêt suscité par les modèles distribués à base physique se soit accru, seul le modèle TOPKAPI est actuellement opérationnel pour la prévision des crues sur plusieurs rivières italiennes (l'Arno, le Tibre, le Reno et le Pô, entre autres). L'utilisation d'un modèle distribué, à la place d'un modèle global, présente l'avantage d'un usage optimisé des informations pluviométriques distribuées qui sont désormais fournies par les radars météorologiques et par les modèles de prévision numérique du temps (PNT), même si les modèles globaux fonctionnent, quant à eux, plus rapidement. La nature physique des paramètres des modèles distribués permet généralement un calage plus rapide, à partir des mesures physiques ou des équations, que le calage des paramètres des modèles globaux, réalisé soit par des techniques de tâtonnements (dites "essai-erreur"), soit par des techniques automatiques d'optimisation des paramètres.

Une considération importante pour comparer les deux types de modèles est leur capacité d'extension à des bassins hydrographiques non jaugés. Il a été démontré que, du fait de l'agrégation, les paramètres des modèles globaux perdent leur signification physique et sont difficiles à corrélérer de façon cohérente avec les caractéristiques géomorphologiques d'un bassin. À l'inverse, les paramètres des modèles distribués à base physique peuvent conserver la signification physique jusqu'à une certaine taille de pixel (généralement, toutefois, pour des surfaces de quelques kilomètres carrés seulement) et peuvent être extrapolés à d'autres bassins hydrographiques. En résumé, bien que la tendance aille vers l'utilisation de modèles distribués à base physique, il n'existe aucun réel obstacle à l'utilisation de modèles semi-distribués, ou même globaux, à en juger par la qualité du produit fini en termes de fiabilité des services.

## 4.2 ÉTUDES HYDROLOGIQUES À RÉALISER POUR APPUYER LE DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE

### 4.2.1 Généralités

Lors du développement d'un nouveau système de prévision et d'annonce des crues, il est plus probable qu'un modèle pré-existant soit utilisé, plutôt qu'un nouveau modèle spécifique soit développé de zéro. Cependant, les modèles disponibles devront toujours être adaptés pour satisfaire les exigences des utilisateurs, et une parfaite compréhension de l'hydrologie du bassin



hydrographique sera nécessaire, pour appuyer les besoins lors du calage et de la vérification, détaillés dans les sections suivantes. Les systèmes de prévision et d'annonce des crues sont généralement opérés par des organismes de gestion des bassins hydrographiques nationaux et régionaux, et ces derniers sont des acteurs de longue date de la collecte et du traitement des données hydrologiques, c'est-à-dire les données décrivant les divers aspects du cycle de l'eau. Néanmoins, il arrive souvent que les données historiques n'aient pas été collectées dans le but de l'étude des crues, et ce problème doit être traité pour fournir une base claire pour la modélisation des crues. Cette section vise à établir une bonne compréhension de l'hydrologie des crues, des besoins en données et de la nécessité de réévaluer les données historiques.

#### 4.2.2 Compréhension de l'hydrologie des crues

Lors de l'élaboration des modèles et des systèmes de prévision des crues, il est fondamental de comprendre les causes des inondations dans tout bassin hydrographique ou tout bassin fluvial donné. La taille, la forme et la structure topographique des bassins hydrographiques conditionnent le type de réponse apportée face au facteur déclenchant principal des inondations qu'est la quantité de précipitations.

L'aménagement, la géologie, les sols et la végétation affectent la vitesse de réponse du bassin hydrographique aux précipitations, et les pertes par le sol ainsi qu'une recharge plus profonde sont aussi des caractéristiques majeures de la genèse des crues. L'extension de l'urbanisation joue aussi un rôle important, non seulement du fait de l'ajout de zones imperméables, mais également en raison des modifications des systèmes de drainage des eaux urbaines par les égouts, des passages couverts et des tronçons de rivières canalisés, qui interagissent en augmentant la rapidité du temps de parcours de l'onde de crue dans le bassin hydrographique. L'influence des mécanismes de contrôle des rivières et des systèmes d'évacuations des eaux pluviales peuvent également ajouter des éléments d'incertitude, par des obstructions, un débordement des structures et la disparition de la capacité de stockage.

Toutes les caractéristiques ci-dessus peuvent être paramétrées, dans une plus ou moins grande mesure, par des modèles hydrologiques et hydrauliques de complexité variable. Elles sont abordées en détail au chapitre 3 et aussi aux points 4.3 à 4.7 ci-dessous. Des formes plus simples d'estimation des crues peuvent être réalisées au moyen d'équations multivariées, qui nécessitent des estimations des principales composantes des crues extraites à partir d'informations

cartographiques ou d'autres données spatialisées. Il est essentiel pour les hydrologues de crues, comme étape préliminaire à une modélisation plus détaillée, d'acquérir une bonne compréhension de la nature des bassins hydrographiques concernés. Les informations sur la taille et la forme des bassins hydrographiques peuvent être obtenues à partir de relevés topographiques simples. Les caractéristiques naturelles peuvent être obtenues à partir de cartes géologiques, de l'utilisation et de la composition des sols, et de la végétation. Dans les modèles plus détaillés, les caractéristiques et structures des ouvrages anthropiques doivent être identifiées et leurs caractéristiques du point de vue opérationnel doivent être déterminées à partir des rapports de conception et des manuels de fonctionnement.

La nature des précipitations à l'origine des inondations doit être parfaitement comprise à la fois dans le contexte des événements et de la climatologie saisonnière. Les principaux types de précipitations qui génèrent des inondations sont :

- (a) Les précipitations extrêmes sur une courte durée (souvent très localisées) ;
- (b) Les précipitations de longue durée sur un vaste territoire ;
- (c) Les chutes et la fonte de neige ;
- (d) Les précipitations saisonnières de longue durée (climat de mousson).

Ces différents types de précipitations provoqueront des réactions diverses et variées sur un bassin hydrographique donné, et l'importance relative de l'impact des différents types d'événements doit être évalué afin de définir l'approche la plus appropriée pour l'élaboration d'un système d'annonce des crues. Dans les régions où des précipitations saisonnières régulières et conséquentes sont la norme, un réseau fixe d'observation du niveau des précipitation et des rivières peut être établi comme la base d'un système d'annonce des crues. Les éléments de ce réseau peuvent être répartis pour fournir une représentation spatiale régulière ou situés à des endroits clés par rapport aux risques de crue.

Lorsque les précipitations sont moins régulières, et souvent intrinsèquement plus variables à la fois en quantité et en répartition spatiale, l'approche axée sur un réseau fixe et représentatif est moins pertinente. Ces conditions, typiques des climats plus arides, sont également plus difficiles à modéliser avec les modèles hydrologiques et hydrauliques habituellement disponibles. Les problèmes typiques rencontrés dans les zones arides ou semi-arides sont les suivants :

- (a) Des précipitations très localisées, qui peuvent ne pas être mesurées par les pluviomètres, en particulier s'ils sont peu denses ;
- (b) Des rivières très saisonnières, avec des débits et des niveaux d'eau extrêmement variables.

- Celles-ci sont difficiles à mesurer par moulinet que ce soit au niveau d'ouvrages ou de sections jaugées, car les sections des cours d'eau évoluent durant et après chaque événement de crue ;
- (c) Les cours d'eau intermittents, qui subissent des pertes considérables par le lit au niveau des tronçons inférieurs ;
  - (d) Les modifications majeures du cours des rivières et la destruction des instruments de mesure par les crues ;
  - (e) Des problèmes de maintenance et de performance des équipements de surveillance dans des conditions difficiles, en particulier la poussière et la chaleur.

Dans de telles conditions, les techniques modernes de télédétection peuvent s'avérer plus utiles que l'instrumentation conventionnelle. Il est possible

d'utiliser des systèmes de surveillance par satellite ou radar pour l'observation des précipitations. Les conditions des rivières devront être observées en des emplacements adaptés pour les sites à risque, mais il est impératif que ceux-ci fournissent des délais de réaction adéquats, car la rapidité des crues est également un point commun des régions arides et semi-arides.

La compréhension de l'historique des crues dans tout bassin hydrographique est très importante. Outre les informations récupérées à partir des archives de données collectées spécifiquement à des fins hydrologiques et météorologiques, il faut également utiliser d'autres sources d'information comme les archives générales, en particulier les journaux et les photographies. Des archives historiques plus anciennes sont disponibles auprès des autorités municipales, des archives nationales et même des

#### Encadré 4.4. Description typique d'une partie des archives du bassin hydrographique de la rivière Great Ouse dans le nord de l'Angleterre

Année	Mois	Détails
1866	11	15-17 novembre 1866 : «L'Ouse est montée de 4,5 mètres environ au-dessus de son niveau ordinaire à York».
1866	11	15-17 novembre 1866 : «L'Aire est montée à un niveau record à Leeds».
1866	11	15-17 novembre 1866 : L'observateur des précipitations à Halifax (Well Head) a noté : «Le 15 et le 16, 82 mm de pluie, et entre le 13 et le 17, 108 mm, d'où des crues destructrices dans l'ensemble des vallées du West Riding et du Lancashire. Dans la vallée de la Calder, de mémoire d'habitant, la crue a été sans précédent, et aucun repère de crue n'est aussi haut que les niveaux qui viennent d'être observés». (rivière Calder)
1872	6	18 juin 1872 : L'observateur des précipitations à Otterburn-in-Craven a noté : «Les destructions des écluses, des passages couverts et des petits ponts sur les cours d'eau coulant le long des versants des vallées de la Ribble et de la Wharfe ont été catastrophiques aujourd'hui». (rivière Wharfe; cours supérieur de la rivière Ribble)
1872	6	24 juin 1872 : L'observateur des précipitations à Thorganby (Thicket Priory) a remarqué : «(...) ces orages continus ont provoqué les crues les plus fortes enregistrées depuis 42 étés». (rivière Derwent, Yorkshire)
1872	9	26-28 septembre 1872 : Orage et crues dans le Nord Yorkshire.
1900	7	12 juillet 1900 : «La rivière Bradford Beck a inondé une superficie d'environ 4420 hectares. À Bradford Exchange, 33 mm de précipitations ont été enregistrés entre 15 h 10 et 18 h 00 (...) dans les tronçons supérieurs de la Beck, un orage violent s'est abattu avant que l'orage ne gagne la partie basse de la ville (...) l'orage a longé la vallée et atteint Bradford Exchange à 15 h 10 ; 1 heure et 25 minutes après qu'il ait atteint Brayshaw à trois miles environ de là. Sur les collines aux pentes abruptes, 84 mm de pluie sont tombés en trois heures. À Bradford Exchange, 22 mm de pluie sont tombés en 20 minutes. Cet énorme excédent d'eau a submergé les ouvrages d'Amblers ainsi que tous les autres ouvrages sur la Beck, inondé tous les magasins et les entrepôts situés dans la partie basse de la ville, a transformé Market Street, Forster Square, etc. en rivières, occasionnant de graves dégâts (...) sur un vaste périmètre. D'une manière générale, ce sont des scènes de chaos et de dévastation inédites qu'a connues la ville. À Shepley, Bingley, Morton, Ilkley, des zones basses ont été inondées sur des miles à la ronde – des arbres déracinés, d'énormes blocs de rochers emportés. À Ilkley, des ponts et des maisons ont été balayés. À Bingley, la ligne de chemin de fer des Midlands gisait sous une mer d'eau. À Sunnydale ou Morton Beck, un bassin hydrographique d'environ 400 hectares sur lequel 102 mm de pluie se sont abattus en 2 heures, un bassin de rétention désaffecté vieux de 60 ans avec déversoir d'environ 9 mètres de large et 90 cm de profondeur, qui n'avait jamais été plein de l'avis de tous, s'est retrouvé non seulement plein, mais submergé sous 23 cm d'eau environ suite au débordement sur toute la longueur de la digue, soit l'équivalent d'environ 1730 mètres cubes par minute».
1901	11	11-12 novembre 1901 : L'observateur des précipitations à Todmorden (Fielden Hospital) a noté : «Fortes pluies ayant provoqué l'une des pires crues connues ; de nombreuses zones de la ville ont été noyées sous plus ou moins un mètre d'eau». (rivière Calder)

registres d'institutions religieuses. Les repères de crue sur les ponts et les bâtiments sont aussi des renseignements capitaux pour la compréhension des comportements de crue des bassins hydrographiques et de leurs impacts potentiels. Ces données d'archives non techniques sont utiles en cas de manque d'informations spécifiques, mais elles sont également précieuses pour vérifier la fiabilité de données enregistrées. Les analyses de crues sont trop souvent basées, malheureusement, sur les archives les plus facilement disponibles, c'est-à-dire sous format électronique, et ignorent les nombreuses et précieuses informations qui peuvent être glanées par des enquêtes plus détaillées.

La Société hydrologique britannique en collaboration avec l'Université de Dundee a réalisé un site Internet, Chronology of British Hydrological Events (British Hydrochronology) (<http://www.dundee.ac.uk/geography/cbhe>). Il s'agit d'une source publique d'informations hydrologiques qui vise à renseigner sur l'étendue spatiale des événements, et peut permettre d'évaluer leur degré de gravité relatif. Les informations typiques d'une partie des archives du bassin hydrographique de la rivière Great Ouse dans le nord de l'Angleterre sont présentées dans l'Encadré 4.4. Les données complètes fournissent de nombreuses informations historiques détaillées qui viennent appuyer les relevés instrumentaux, et qui permettent aussi de mieux comprendre la cause et les impacts des événements de crue.

D'anciennes éditions de cartes topographiques peuvent aussi être utiles car elles indiquent la localisation des collectivités et des voies de communication avant les évolutions modernes. Les anciennes cartes peuvent indiquer les plaines et les points de passage des cours d'eau avant l'expansion non maîtrisée des villes et de la plupart des infrastructures techniques et routières, qui ont bien souvent ignoré la présence des zones inondables. Les anciennes cartes peuvent également indiquer les différents lits que les rivières ont occupés sur une période historique récente. Ces informations peuvent permettre de révéler l'instabilité dynamique des rivières, ce qui laisse présager la possibilité d'une modification du tracé d'un cours d'eau ou d'une défaillance majeure du détournement d'une rivière lors d'un événement extrême.

La vigilance concernant le risque de crues et les mesures d'intervention nécessaires en matière de prévision et d'annonce des crues doivent être déterminées sur la base d'études approfondies. Cette tendance s'est caractérisée dernièrement par l'adoption de l'approche «Source-Vecteur-Cible», tel qu'illustré en Figure 4.1.

La compréhension de l'hydrologie de crue doit couvrir la zone depuis le bassin hydrographique et le réseau des cours d'eau jusqu' aux «objectifs cibles». Ceux-ci peuvent aller de la collectivité rurale clairsemée et mal desservie située dans des

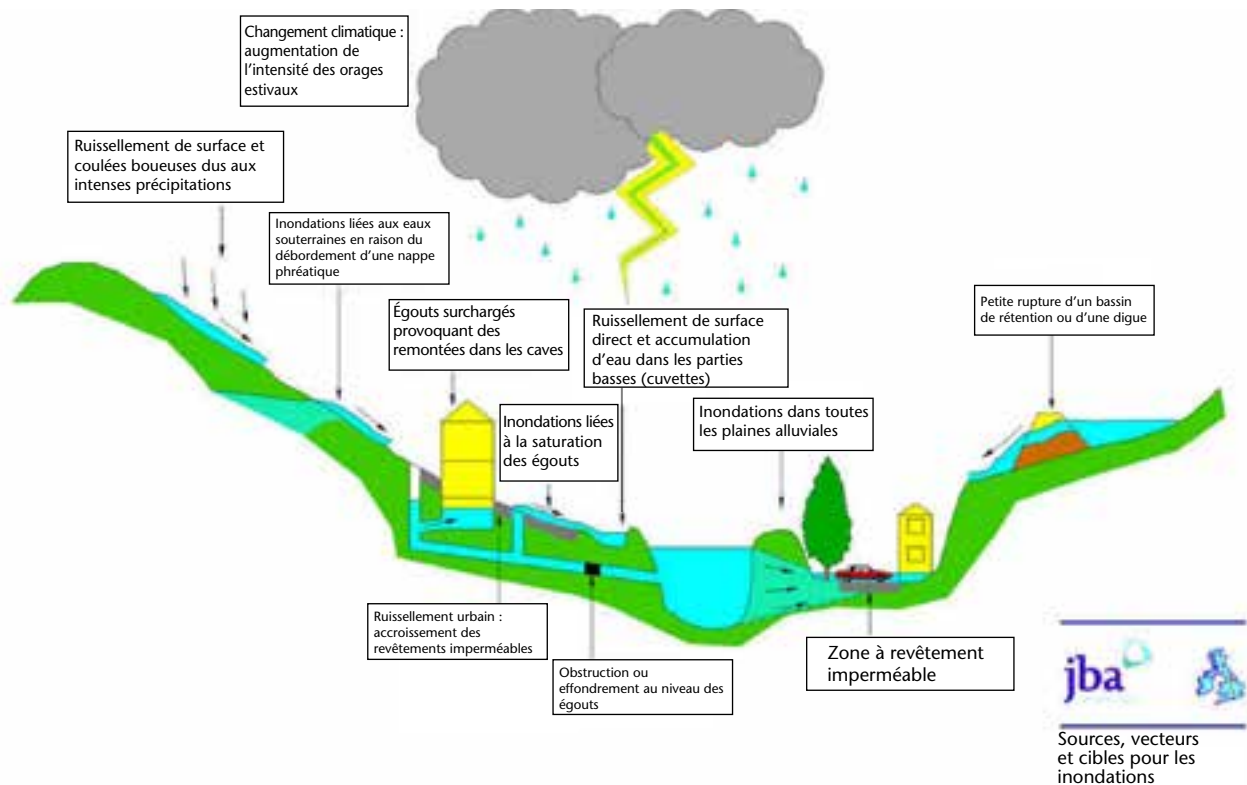


Figure 4.1. L'approche Source-Vecteur-Cible

plaines inondables soumises à des inondations majeures, aux grands centres urbains présentant une forte concentration d'infrastructures de grande valeur et d'importance parfois critique, par exemple les hôpitaux. Les deux situations impliquent des exigences d'échéances spécifiques quant à la réception des informations d'annonce en termes de localisation et de magnitude potentielle des inondations. Les différents objectifs peuvent nécessiter des approches spécifiques pour fournir les informations indispensables à une réponse efficace. Par exemple, les populations rurales des plaines inondables auront besoin de temps pour déplacer leur bétail et leurs biens sur les hauteurs ou dans les abris prévus à cet effet. Dans les zones urbaines, du temps est nécessaire pour organiser de la fermeture des routes et des déviations, installer les barrières anti-crues temporaires et éventuellement pour évacuer les populations.

Une caractéristique souvent négligée en matière d'hydrologie des crues est la compréhension de la façon dont les eaux de crues baissent une fois le pic de crue passé. Cet élément est important à connaître pour autoriser l'accès, dans un premier temps, aux véhicules et équipements d'urgence nécessaires pour débiter les premiers travaux de reconstruction, puis pour permettre aux occupants de revenir chez eux. La plupart des systèmes d'annonce des crues comprennent un signal «feu vert» ou «danger écarté» en lien avec le niveau des rivières. Toutefois, de nombreuses zones de grands bassins hydrographiques, en particulier dans les deltas, peuvent rester inondées même lorsque la décrue s'est amorcée. Les bassins hydrographiques avec une forte contribution des eaux souterraines peuvent rester inondés pendant des périodes prolongées.

#### 4.2.3 Exigences concernant les études analytiques sur les crues

La majeure partie de la sous-section précédente fournit une approche qualitative à la compréhension des inondations. Les études quantitatives des crues s'appuient fortement sur les mesures et les calculs. La connaissance qualitative doit toujours être utilisée comme une «vérification de la réalité». L'analyse des crues est fondamentalement nécessaire pour identifier les caractéristiques de l'hydrogramme de crue pertinentes pour le bassin hydrographique concerné. En effet, l'hydrogramme traduit l'intégration complète des caractéristiques des précipitations et des bassins hydrographiques. Lorsque l'hydrogramme de crues est considéré par rapport à la capacité des chenaux et à la topographie des plaines inondables, alors la nature bidimensionnelle de la hauteur d'eau ou du débit en fonction du temps peut être considérée suivant une troisième dimension spatiale. Les informations nécessaires pour les analyses de crue sont obtenues grâce aux éléments suivants :

- (a) Des pluviomètres à enregistrement quotidien ;
- (b) Des limnigraphes à des sections jaugées ou à des ouvrages de mesure pour obtenir les données de débit des rivières ;
- (c) Des données climatologiques, en particulier pour fournir une estimation des pertes par évaporation et du bilan hydrique ;
- (d) Une cartographie de la topographie générale et de l'utilisation des sols afin de définir les caractéristiques des bassins hydrographiques ;
- (e) Une étude topographique détaillée de la rivière et de la plaine inondable adjacente (le corridor fluvial ou la plaine inondable fonctionnelle) ;
- (f) Une identification des zones à risque, qui peuvent nécessiter une étude topographique plus détaillée et une mesure plus précise du débit.

Ces données fournissent la base des études de modélisation, du calage des modèles et de l'identification des exigences relatives au système d'annonce des crues. Bien que similaires aux études de crues générales, les systèmes opérationnels de prévision et d'annonce des crues nécessitent une connaissance précise du délai de l'onde de crue et de sa vitesse de déplacement. Il est ainsi indispensable d'avoir accès à des informations (tout du moins, pour les précipitations et l'écoulement) en provenance de divers parties du bassin hydrographique, en particulier des données des tronçons supérieurs. Les exigences suivantes peuvent être considérées comme essentielles :

- (a) Mesures des précipitations et de l'écoulement en provenance des parties principales supérieures du bassin hydrographique (bassin versant), afin de pouvoir déterminer de façon anticipée la formation d'une crue ;
- (b) Mesures des précipitations, de l'écoulement et le délai à proximité des principaux points de confluence au sein du système hydrologique, afin d'identifier le temps de parcours et l'importance relative des différents points de contribution du bassin hydrographique ;
- (c) Mesures du niveau des rivières, des écoulements et caractéristiques des plaines inondables en amont des zones à risque ;
- (d) Identification des problèmes d'obstruction au niveau des systèmes de drainage dans les zones basses, qui nécessitent des relevés précis en matière de niveau d'eau et de délai ;
- (e) Données pluviométriques locales dans les zones d'encombrement au niveau des systèmes d'évacuation et dans les zones urbaines, afin d'identifier les risques de crues pluviales.

Il n'est ni possible ni rentable d'équiper chaque sous-bassin hydrographique au sein d'une zone menacée de crue. Si un échantillon suffisant d'observations est obtenu à partir de bassins hydrographiques représentatifs, par exemple, des zones urbaines, rurales, vallonnées et de plaine, alors des relations peuvent être établies pour modéliser le

comportement des bassins hydrographiques non jaugés. La plupart des modèles du marché qui servent de base pour les systèmes d'annonce des crues ont la possibilité d'utiliser des données pour calibrer les algorithmes et les paramètres des modèles et contiennent des techniques d'optimisation pour les appliquer à des bassins hydrographiques non jaugés.

Les analyses de crues nécessiteront de nombreuses années de données au cours desquelles suffisamment d'événements en termes de magnitude et d'impact ont été observés pour élaborer un modèle efficace. Cela nécessitera des données à la fois générales et spécifiques. Toutefois, les besoins du grand public pour un service d'annonce des crues sont souvent tels que le temps manque pour des études et des analyses approfondies. En fait, la plupart des systèmes d'annonce des crues modernes basés sur des modèles ont évolué à partir de systèmes manuels, qui fonctionnaient à partir d'observations sur le terrain et de techniques graphiques simples pour déterminer les prévisions de niveau, les temps de parcours et les corrélations station-station. Les systèmes modernes s'appuient principalement sur une approche évolutive visant à maintenir et optimiser le système d'annonce des crues, tel que discuté au point 4.2.4.

#### 4.2.4 **Besoins continus en données pour aider la modélisation**

Un modèle d'annonce des crues ne fournit qu'une représentation unique d'un système complexe, qui évolue dans le temps dans une mesure plus ou moins importante. Les cours d'eau et les systèmes hydrologiques évoluent morphologiquement dans le temps par le biais de cycles d'érosion et de dépôts à court et long termes. Les caractéristiques des bassins hydrographiques évoluent avec le temps, parfois de façon très significative, en particulier en ce qui concerne l'utilisation des sols, l'urbanisation, la modification de la couverture forestière et la construction de structures de gestion des cours d'eau majeures (barrages, bassins de rétention, structures de protection contre les crues). Ainsi, les paramètres descriptifs de base des bassins hydrographiques utilisés pour élaborer les modèles nécessitent d'être vérifiés et actualisés et un nouveau calage devra être éventuellement effectué.

À mesure que de nouveaux événements se produisent, les paramètres des modèles devront être modifiés et affinés. Il est particulièrement important de déterminer toute différence de comportement des crues durant des séries d'inondations «normales» et lorsque des événements extrêmes se produisent. Les événements de longue durée et à large portée géographique peuvent également produire des réponses différentes sur les systèmes interdépendants

de bassins hydrographiques et de réseaux de cours d'eau par rapport à un événement de moindre amplitude sur un seul bassin hydrographique. Tout cela nécessite que les modèles soient fréquemment vérifiés et recalés, en particulier au cours des premières années de fonctionnement des modèles. Ainsi, il ne faut certainement pas fermer de stations d'observations lorsque le modèle et le système d'annonce initial fonctionnent. L'importance d'une logistique et d'un investissement continu dans les modèles doit être affirmée avec force auprès des contrôleurs financiers du système de prévision et d'annonce des crues.

Une révision périodique des performances des systèmes de prévision et d'annonce des crues et un recalage des modèles sont recommandés selon le principe standard des bonnes pratiques. Après chaque événement, il est recommandé de vérifier les performances des observations sur le terrain et de noter les périodes de défaillance des instruments ou des transmissions de données. Si cela est effectué chaque fois, il devient simple d'identifier tout élément particulièrement sensible du réseau et d'affiner les programmes de maintenance.

Lorsque la mesure du débit revêt une grande importance (par opposition aux simples mesures de niveau), une attention toute particulière doit être accordée à l'étalonnage des sections de mesure des rivières jaugées. Concernant les rivières à lits mobiles, communément situées dans les tronçons supérieurs et les zones deltaïques actives, une mesure fréquente du débit est nécessaire afin de vérifier et de réétalonner la courbe de tarage. Il est essentiel que la courbe de tarage la plus actuelle soit utilisée, et cela peut entraîner un éventuel recalage du modèle hydrologique d'annonce des crues.

Les sections de rivières les plus stables peuvent également être modifiées par une forte crue via l'érosion ou la formation de dépôt et doivent donc être aussi vérifiées. Parfois, la seule façon de déterminer si des problèmes de données existent, par exemple des données de débit ou de pluviométrie erronées, est en constatant des résultats problématiques au niveau du modèle. La solution immédiate ne doit pas être de recalculer le modèle pour produire un ajustement plus adapté mais de réaliser une enquête minutieuse afin de trouver la cause à la fois au niveau des observations et de la modélisation.

Les structures de jaugeage, telles que les déversoirs ou les sections équipées de stations à ultrasons utilisées pour l'estimation du débit, sont conçues pour des conditions spécifiques et peuvent ne pas être adaptées pour la mesure des débits de crue, en particulier lors d'un dépassement des berges. Les estimations des forts débits doivent être réalisées par extrapolation de la courbe de tarage au moyen

d'une équation mathématique, ou par un modèle hydrodynamique du cours d'eau et de la plaine inondable adjacente. Ces deux méthodes requièrent que les sections transversales des rivières et des plaines inondables soient surveillées précisément, et que les valeurs correctes de rugosité soient appliquées à la couverture végétale. Une certaine attention doit être accordée aux variations saisonnières de la couverture végétale sur la plaine inondable ou de la croissance des herbes dans le lit de la rivière.

Il arrive communément que les contrôles des instruments sur le terrain et des sites soient réalisés par une unité d'hydrométrie générale au sein de la structure de gestion de l'eau. Leur programme d'inspection est préparé sur la base de conditions «normales», et peut être effectué à des intervalles annuels voire plus longs. Il est peu probable que cela soit suffisant pour les objectifs opérationnels d'un système de prévision des crues. Des accords spécifiques peuvent être établis entre les unités d'annonce des crues et les unités d'hydrométrie pour permettre des visites d'inspection et de mesure supplémentaires. Il est fortement recommandé que le personnel de direction de l'équipe de prévision des crues procède à une inspection de site suite à des événements de crue majeurs, ou à la fin de la saison des crues, comme cela est réalisé par le Centre de prévision et d'annonce des crues du Bangladesh.

#### 4.3 **CALAGE DU MODÈLE ET EXIGENCES CONCERNANT LES DONNÉES**

##### 4.3.1 **Principaux objectifs**

Idéalement, l'objectif du calage est de supprimer les erreurs systématiques éventuelles et d'éliminer tous les bruits éventuellement présents dans le modèle. En réalité, en raison des contraintes liées à la quantité et à la qualité des données, et de postulats simplistes qui peuvent être inhérents au modèle, il faut prendre soin de trouver le bon équilibre entre les objectifs du calage et les statistiques de l'ajustement du modèle. Parfois, ces dernières peuvent être un peu moins exigeantes en vue d'obtenir une cohérence spatiale des paramètres.

D'une manière générale, il existe trois principaux objectifs lors du calage des modèles hydrologiques conceptuels sur toute la surface d'un bassin hydrologique pour des applications de prévisions des cours d'eau :

- (a) Générer une bonne reproduction de l'hydrogramme observé à chaque point clé de prévision du système hydrographique : l'objectif est de réaliser un ajustement qui contienne le moins d'erreurs systématiques possibles, de

sorte que toutes les erreurs soient aléatoires. Cela comprend tous les types d'erreurs systématiques : les erreurs systématiques globales, les erreurs systématiques liées à l'amplitude des débits, les erreurs systématiques saisonnières, les erreurs systématiques liées aux conditions spécifiques des bassins hydrographiques, par exemple la neige et l'humidité du sol. Le total des erreurs aléatoires dans les résultats de prévision devrait dépendre largement des erreurs aléatoires associées aux variables d'entrée, notamment les précipitations. Les erreurs sur la quantité de précipitations, caractéristiques de la variabilité spatiale typique de cette donnée, sont la raison principale pour laquelle les modèles globaux ne génèrent pas de résultats satisfaisants dans toutes les régions.

- (b) Les paramètres des modèles doivent jouer leur rôle prévu : les modèles conceptuels ont été conçus pour avoir une base physique et les paramètres contrôlent des parties de modèles qui représentent des composantes spécifiques du processus global. Les effets de chaque paramètre sont conçus pour être reflétés dans des parties spécifiques de l'hydrogramme simulé, par exemple la vitesse de montée, les valeurs du pic et le volume de crue. Pour être cohérent avec la base physique d'un modèle, et pour produire des résultats qui non seulement reproduiront au mieux la gamme complète des observations historiques, mais permettront très probablement aussi d'extrapoler correctement au-delà de ce qui a été observé dans les données d'archive disponibles, chaque paramètre doit être utilisé comme prévu. Cela signifie que les paramètres ne doivent pas être ajustés ou pondérés intuitivement pour modifier les données statistiques finales.
- (c) Il convient de procéder à une modification réaliste des paramètres d'une zone (tronçon supérieur, zone localisée ou sous-division d'un réseau de drainage) à une autre au sein du bassin hydrologique et par rapport à d'autres bassins hydrologiques adjacents : une modification des paramètres d'une zone à l'autre doit être explicable sur la base de changements au niveau des facteurs physiographiques, des conditions climatiques ou de la réponse hydrographique. Non seulement cet objectif est raisonnable d'un point de vue physique, mais s'il est respecté, il devient beaucoup plus facile de surveiller et de comprendre les variations observées au cours des activités opérationnelles, ainsi que de procéder à des ajustements aux variables d'état.

##### 4.3.2 **Méthodes de calage**

Le calage des modèles pour la modélisation hydrologique et hydraulique a été traité par diverses approches, principalement en relation avec le type

de modèle choisi. Pour des raisons de clarté, il est important de souligner ce qui est entendu par "calage des modèles". En général, cela signifie que, sous réserve du choix d'un modèle spécifique, ses paramètres seront ajustés pour que les valeurs prédites par le modèle se rapprochent des valeurs observées. Il est également important de reconnaître que les paramètres des modèles n'ont pas strictement une signification physique, mais que ce sont des grandeurs entachées d'incertitudes qui reflètent toutes les sources d'erreur. Dans ce cas, l'estimation des paramètres, et par conséquent le calage des modèles, perdent leur signification originelle, et la densité de probabilité entière des paramètres doit être déterminée, tel que décrit aux points 4.7.2 et 4.7.3. Par ailleurs, si nous considérons que les paramètres d'un modèle à base physique ont une signification physique claire et ne sont que légèrement affectés par l'échelle de représentation, les valeurs des paramètres ne devraient pas être estimées mais fixées pour refléter les connaissances a priori. Ceci vient du fait que l'estimation des paramètres (en particulier lors de l'utilisation des techniques par les moindres carrés) tend à écarter les extrêmes parmi les valeurs prédites, puisque la méthode vise généralement à préserver les moments centrés des quantités observées.

Il existe deux méthodes de base pour le calage des modèles hydrologiques. Une estimation a priori des paramètres est disponible pour de nombreux modèles. Une estimation initiale des paramètres des modèles à base physique, tels que le modèle Sacramento, peut être réalisée en les reliant à des caractéristiques physiques du bassin, telles que la végétation, les sols et la géométrie du bassin, et peut être utilisée afin de prédéfinir quelles valeurs des paramètres sont vraisemblables. Dans de nombreux exemples, cela peut être la seule approche possible pour définir les paramètres des modèles en raison de l'absence de données fiables :

- (a) La méthode par tâtonnements (essais et erreurs) : La connaissance du modèle par l'utilisateur et la façon dont chaque paramètre affecte les résultats sont utilisées pour contrôler les changements apportés aux valeurs des paramètres. Les décisions concernant les paramètres à modifier sont prises principalement en comparant les valeurs simulées aux valeurs observées, en particulier les hydrogrammes. Cette procédure est surtout efficace lorsque des logiciels graphiques interactifs sont disponibles pour visualiser les résultats et apporter des modifications aux paramètres. Ce calage est terminé lorsque l'utilisateur détermine de façon subjective que les objectifs ont été atteints.
- (b) Optimisation automatique des paramètres : Avec cette méthode, divers algorithmes informatiques sont utilisés pour réaliser la meilleure simulation des valeurs observées, par exemple les algorithmes

de Newton, Rosenbrock, Simplex ou d'autres algorithmes génériques. Ces algorithmes contiennent des stratégies pour modifier les valeurs des paramètres spécifiés par l'utilisateur en vue d'obtenir un ajustement optimal. Généralement, l'utilisateur peut appliquer des limites à l'amplitude au sein de laquelle les valeurs de paramètres peuvent varier, en vue d'obtenir des résultats physiquement plus réalistes.

La qualité du résultat final peut souvent être déterminée par une fonction unique, statistique et objective, comme la minimisation de l'erreur quadratique moyenne d'un jeu de données quotidiennes. Parfois, une série d'étapes est nécessaire au cours de laquelle différents groupes de paramètres et différentes fonctions d'objectif sont utilisés à chaque étape. Pour certaines approches, des fonctions multi-objectives sont utilisées pour essayer de trouver des ensembles de paramètres qui produiront des résultats acceptables basés sur divers critères. L'utilisateur a alors la possibilité de choisir de façon subjective parmi ce groupe d'ensembles de paramètres. L'optimisation automatique est utilisée principalement pour le calage de bassins hydrographiques individuels, principalement dans les petits bassins amonts dotés d'un bon degré d'homogénéité. Les stratégies disponibles pour l'utilisation d'une optimisation automatique sont limitées pour les grands bassins versants.

La plus grande différence entre les deux méthodes est que la méthode par essais et erreurs permet à l'utilisateur de maintenir une appréciation subjective de la base physique des modèles, tandis que la méthode automatique repose sur divers algorithmes pour réaliser le meilleur ajustement statistique des valeurs des paramètres. La façon d'utiliser les deux méthodes dépend de la situation concernée. Le plus gros obstacle pour une utilisation réussie de la méthode par tâtonnements est le temps nécessaire pour développer une connaissance de la structure du modèle et la façon d'isoler les effets de chaque paramètre. Ainsi, pour un bassin versant individuel, les méthodes d'optimisation automatique peuvent, dans de nombreux cas, permettre d'obtenir une bonne simulation du débit, et ce plus rapidement que la méthode par tâtonnements. Pour une large zone comme un grand bassin versant complet, la méthode par tâtonnements peut être utilisée de façon plus efficace que les méthodes d'optimisation automatique, car elle produit des ensembles de paramètres pour des sous-bassins hydrographiques individuels distincts qui répondent à tous les objectifs visés.

#### 4.3.3 Étapes de base en matière de calage

Lors du calage de tout modèle hydrologique sur un bassin versant, il est recommandé de suivre cinq étapes:

- (a) Réunir des informations et des données : Cela

inclut toutes les données historiques disponibles, ainsi qu'identifier quelles sont les données disponibles en temps réel. Cela suppose d'obtenir :

- (i) Des cartes et des jeux de données qui décrivent les caractéristiques physiographiques comme la topographie, la végétation, ainsi que les sols ;
- (ii) Des analyses de la variabilité des quantités comme les précipitations, les températures, l'évaporation et la couverture neigeuse ;
- (iii) Des informations concernant les ouvrages et leurs effets sur le débit ;
- (iv) Des données concernant les dérivations d'eau vers ou hors du bassin versant, ou entre les sous-bassins au sein du même bassin hydrologique et les éventuels effets de l'irrigation.

Des informations sont également nécessaires sur les besoins actuels et éventuellement futurs en matière de prévision. Après avoir réuni toutes ces informations et données, les valeurs pertinentes doivent être évaluées et mises en forme pour un traitement ultérieur.

- (b) Évaluer la variabilité spatiale des paramètres hydrologiques : L'étape suivante du processus de calage concerne l'analyse des informations et des données réunies et la détermination de l'évolution des divers paramètres hydrologiques au sein du bassin hydrologique. Parmi ces paramètres se trouvent les variables comme les précipitations, la température, l'évaporation, la couverture neigeuse, ainsi que des caractéristiques telles que la topographie, la végétation, les sols et la géologie. La variabilité spatiale des conditions au sein du bassin hydrologique, ainsi que la localisation de toutes les installations de surveillance existantes et les sites menacés de fortes crues, sont des facteurs très importants pour déterminer quelles stations de débit doivent être incluses dans le calage. La compréhension de la variabilité climatique dans le temps peut déterminer les méthodes utilisées pour analyser et traiter les données historiques. Il peut être également nécessaire de déterminer si un grand bassin versant doit être subdivisé par tranches d'altitude ou en fonction de différences majeures de la géologie, des sols ou de la végétation. Cette analyse de la variabilité spatiale sera aussi très utile pour prévoir comment les paramètres des modèles peuvent varier sur le bassin hydrologique. Elle peut également servir de base pour la sélection des valeurs initiales des paramètres et pour attribuer des valeurs aux paramètres des modèles pour des parties du bassin hydrologique qui ne peuvent pas être calées en raison du manque de données adéquates.
- (c) Analyser les données historiques et les préparer pour les utiliser dans les modèles

hydrologiques: Les objectifs à ce stade sont de réaliser des estimations correctes qui reflètent les caractéristiques statistiques des phénomènes, tels qu'ils se produisent. Il est nécessaire de s'assurer dans la mesure du possible qu'il existera un minimum d'erreurs systématiques entre les données validées obtenues à partir des données historiques et les données opérationnelles. La vérification des données d'archive en termes de cohérence, d'exactitude et de fiabilité est une autre étape importante concernant l'analyse de préparation au calage des modèles. Le contrôle de la validité des séries temporelles de données, en particulier les données de pluviométrie et de débit, est nécessaire pour que des valeurs réalistes des paramètres puissent être déterminées. Les analyses types incluent la production de valeurs spatialisées moyennes pour les précipitations, les températures et l'évaporation pour la partie des bassins versants située à l'amont de chaque point de simulation. Les analyses des séries temporelles peuvent être nécessaires pour mettre en évidence la structure statistique, en particulier concernant l'amplitude et la variabilité des types de données. L'analyse peut également montrer s'il est nécessaire de subdiviser le bassin versant, non seulement de façon semi-intuitive sur la base de raisons topographiques ou géologiques, mais aussi par ce que peut révéler une forme différente de l'hydrogramme de crue. Cette étape inclut également l'ajustement des données de débit, afin de tenir compte des dérivations et autres facteurs. Cela contribue à la création d'un hydrogramme « corrigé », permettant ainsi un calage direct avec les autres données du bilan hydrologique. Les calculs du bilan hydrologique régional ou des bassins hydrographiques constituent une part importante de cette étape visant à garantir que les composantes des modèles qui représentent le cycle hydrologique soient physiquement raisonnables et cohérentes.

- (d) Sélectionner les points de débit et la période d'observation pour le calage : La détermination de l'endroit où le débit doit être simulé durant le processus de calage dépend d'un certain nombre de facteurs. Ceux-ci incluent la disponibilité des données historiques sur les débits dans le cours d'eau et au niveau des ouvrages, ainsi que la localisation des points de prévision actuels et futurs, y compris ceux nécessaires pour satisfaire les besoins des utilisateurs. La durée d'observation à utiliser pour le calage dépend de la période d'observation des données historiques, en particulier concernant les précipitations et les débits. Ces séries de données comportent invariablement un historique d'augmentation à partir de quelques stations initiales, via des périodes d'extension du réseau, et bien souvent, par la suite, un déclin lié à des facteurs tels que la rationalisation, un changement d'organisme



exploitant et le fait que des sites deviennent inappropriés. Le but doit être d'identifier une période adéquate lorsqu'un maximum de données de bonne qualité est disponible sur une grande partie du bassin hydrographique à modéliser. Il est également essentiel d'établir l'influence des changements physiques qui se sont produits au sein du bassin hydrologique sur la période de données sélectionnée. Ceux-ci peuvent inclure la construction d'ouvrages de contrôle ou de dérivations, des hausses et des baisses de la superficie irriguée, ainsi que les modifications concernant la végétation et l'utilisation des sols. Il est nécessaire de faire la distinction entre la période de données utilisée pour analyser le comportement du bassin hydrographique et la période utilisée pour le calage proprement-dit. Dans le premier cas, une période aussi longue que possible doit être utilisée, ceci dépendant de la période disponible d'observations historiques, de la cohérence du réseau historique dans le temps et du type de produits de prévision à générer. Dans le second cas, la période d'observation à utiliser pour le calage est généralement un sous-ensemble des archives historiques complètes, et doit couvrir une période de quelques années pendant laquelle une proportion élevée de tous les types de données est disponible. La période de calage est généralement issue des archives les plus récentes, dont l'indice de confiance est élevé (bien que cela ne soit pas toujours le cas, car de nombreux pays affichent, malheureusement, une baisse de la disponibilité et de la qualité des données au cours des dernières années).

- (e) Mettre en œuvre les résultats du calage pour une utilisation opérationnelle : Cette étape finale dans le processus intègre les résultats de l'analyse des données et le calage du modèle dans les systèmes opérationnels. Il est nécessaire de s'assurer que la mise en œuvre opérationnelle des résultats ne produise pas d'erreurs systématiques entre l'application opérationnelle et les simulations des événements passés générées durant le calage. Les responsables du système opérationnel doivent toujours s'efforcer de réduire le plus possible les variations aléatoires par l'utilisation de nouvelles sources de données, de méthodes dynamiques d'analyse des données et de techniques d'ajustement des modèles en temps réel. Des biais peuvent se produire en raison de différences au niveau des réseaux de données, des types de données et des méthodes de traitement des données et aussi du fait de modifications opérationnelles apportées aux variables d'état.

#### 4.3.4 Données requises

Les points (a) et (b) ci-après concernent le type et la durée des données requises pour le calage du modèle :

- (a) Types de données : Les données nécessaires au

calage d'un modèle hydrologique conceptuel sur l'ensemble d'un bassin versant ou hydrographique, sont, comme indiqué précédemment, des informations de base et des données (statistiques) historiques. Les informations de base incluent les données normalisées et les données climatologiques spatialisées, qui peuvent être représentées sous la forme de cartes de distribution, par exemple des cartes d'isohyètes. Elles incluent également des informations spatialisées (géographiques) et physiques sur la nature du système hydrologique, la couverture de végétation, l'utilisation des sols, la classification des sols et la géologie. Une fois encore, les cartes ou les couches des SIG sont un moyen pratique de conserver ces données. Les informations concernant l'environnement bâti et les ouvrages de régulation des rivières peuvent être également représentées de cette façon. Les données historiques incluent, comme mentionné précédemment, tous les jeux de données hydrométéorologiques pertinents. Elles sont généralement conservées sous la forme de jeux de données de séries temporelles, où un type de donnée peut être une observation ou une estimation horaire, quotidienne ou mensuelle. Les séries temporelles historiques peuvent être analysées pour fournir les caractéristiques statistiques de toute variable, et peuvent être utilisées, dans le cadre d'une méthodologie rigoureuse, pour estimer des valeurs extrêmes en dehors de la période d'observation des données (analyse des événements extrêmes). Les données historiques peuvent aussi être utilisées pour reconstituer des événements majeurs de tempête et fournir des informations sur la profondeur, la superficie et la durée, ce qui aidera à définir les structures du modèle et les systèmes de fourniture de données en temps réel.

- (b) Durée d'observation des données historiques : Il n'existe aucune règle stricte qui impose une durée optimale d'observation pour le calage d'un modèle de prévision à partir des séries de données historiques. En général, les longues durées de série de données sont préférées, car une large gamme de conditions a pu être incluse. Habituellement, les services météorologiques et hydrologiques visent des «périodes standard» d'environ 30 ans. Une distinction doit être faite entre les exigences à respecter lors du développement des modèles pour les études hydrologiques générales et l'objectif plus spécifique d'un modèle de prévision des crues. Les éléments suivants doivent être considérés :

- (i) Plus la période d'observation est longue, plus les chances sont grandes que les bruits sur les données soient aléatoires, d'où des valeurs non-biaisées des paramètres. Dans les zones où les résultats des modèles sont généralement limités, une période d'observation plus longue est nécessaire

pour recenser suffisamment d'événements et minimiser les erreurs dues à la forte variabilité spatiale des précipitations typique de ces régions. Dans les zones où les résultats du modèle ne sont généralement pas satisfaisants, il est peu probable qu'une durée d'observation quelconque soit suffisante pour déterminer les valeurs des paramètres avec un indice de confiance significatif. Il est recommandé que, outre la période utilisée pour caler les paramètres du modèle, une autre période soit utilisée pour vérifier ces résultats de calage. Idéalement, cette période doit être au moins aussi longue que la période de calage : la période de validation recommandée par l'OMM est de deux ans. La vérification est discutée plus en détail au point 4.4.

- (ii) Dans les zones de bassins hydrographiques où les caractéristiques physiques sont restées plus ou moins constantes sur la période utilisée pour générer la série temporelle de données, toute portion de la période qui contient une variabilité suffisante des conditions hydrologiques peut être utilisée pour caler les modèles. Toutefois, dans les zones où des changements significatifs se produisent au niveau de la végétation ou de l'utilisation des sols, la partie de la période d'observation qui doit être utilisée pour caler les modèles est celle qui reflète le plus fidèlement les conditions actuelles.

#### 4.3.5 Exigences générales

Il existe un certain nombre d'autres facteurs qui sont importants pour mener à bien un processus de calage à grande échelle d'une façon raisonnablement efficace et pour la production de résultats de bonne qualité. C'est une fausse idée de considérer que, si un modèle disponible commercialement doit être utilisé comme base d'un modèle de prévision de crue, cela constitue une solution «au rabais». Parmi les exigences les plus importantes, figurent les connaissances, l'expérience, le travail d'équipe et la gestion des personnes impliquées. Il est nécessaire de maximiser les bénéfices des outils informatiques disponibles et de suivre les procédures et stratégies éprouvées :

- (a) Connaissance et expérience : Il est important, au moment de commencer à travailler sur le calage du modèle, qu'un temps suffisant soit alloué aux membres de l'équipe pour apprendre le processus de modélisation et comprendre les caractéristiques des bassins hydrographiques pour lesquels le modèle est élaboré. Cette stratégie produira ses effets positifs lorsque les opérateurs utiliseront les modèles et les procédures pour générer des prévisions opérationnelles. Ceux qui auront acquis un bon niveau d'expérience auront la mission de former ceux qui découvrent les méthodes de calage

du modèle. Si une personne reçoit une formation appropriée, les bonnes directives et une période de temps suffisante pour acquérir de l'expérience (de l'ordre de six mois), elle devrait être en mesure de devenir un membre productif d'une équipe de calage.

- (b) Travail d'équipe : Le processus complet de calage et de mise en œuvre du modèle nécessite l'utilisation de personnes compétentes dans les domaines de l'analyse de données, de la détermination des paramètres pour les modèles de propagation, de la modélisation hydrodynamique des cours d'eau, du fonctionnement des ouvrages de rétention, des procédures opérationnelles et de l'utilisation de SIG. Ainsi, le calage nécessite un effort d'équipe et il est important, pour qu'il soit réalisé avec succès, de disposer de personnes compétentes polyvalentes et d'utiliser au mieux les capacités de chaque membre de l'équipe pour atteindre l'objectif final.
- (c) Conduite de projet : Il est aussi important que l'équipe dispose des compétences nécessaires en termes de conduite de projet et que les résultats du projet soient soigneusement suivis et évalués. C'est généralement à une personne expérimentée et dotée d'une bonne connaissance de tous les aspects de la procédure de calage, mais ayant aussi une vision globale des besoins des modèles finaux, que revient le rôle de conduire le projet. Elle doit également posséder les compétences de chef de projet nécessaires pour travailler avec les autres membres de l'équipe et être capable de communiquer clairement sur les objectifs, la progression et les ressources nécessaires avec les supérieurs hiérarchiques de l'organisation, dont les préoccupations majeures sont les réalisations et les résultats.
- (d) Outils informatiques : Pour que le processus de calage global soit effectué de façon efficace, un certain nombre d'outils informatiques doivent être disponibles et utilisés correctement. Ces outils incluent des programmes d'analyses statistiques pour le traitement des données, des applications SIG pour afficher les informations et générer de nouveaux champs de données et des programmes d'interface graphique interactifs qui permettent à l'utilisateur de mieux comprendre les résultats des modèles et d'interagir avec les modèles et les données.
- (e) Suivre les procédures et les stratégies éprouvées : Innover est parfois nécessaire durant le processus de calage, mais beaucoup de méthodes ont déjà été tentées et testées et, dans la plupart des cas, les procédures sont intégrées dans des programmes préétablis. La plupart des procédures et des stratégies pour le développement des modèles ont été testées, d'où une grande efficacité des procédures et une probabilité accrue de générer des résultats cohérents et de qualité. Il vaut mieux respecter ces procédures et tirer parti de l'expérience acquise que d'essayer

d’inventer de nouvelles méthodes. C’est pour toutes ces raisons qu’un certain nombre de modèles «standards» disponibles internationalement sont utilisés comme la base de la plupart des systèmes de prévision des crues nationaux et régionaux. Les principaux fournisseurs de ces suites de programmes incluent l’Institut d’hydraulique danois (DHI) Deltares (anciennement Delft Hydraulics), HR Wallingford et le Corps des ingénieurs de l’armée des Etats-unis (United States Corps of Engineers). Tout en bénéficiant de leurs nombreuses années d’expérience, ces fournisseurs sont également en mesure de gérer la logistique, le dépannage et la maintenance des modèles.

4.4 VÉRIFICATION DES MODÈLES

4.4.1 Critères de vérification du modèle numérique

La période de validation utilisée pour la vérification doit être suffisamment longue pour incorporer plusieurs événements de crue observés. Elle doit donc s’étendre sur au moins deux années. Un certain nombre de méthodes statistiques sont disponibles pour déterminer le succès ou non de la vérification, et celles-ci peuvent être appliquées à tous les points d’estimation des modèles. Les méthodes d’analyses communément utilisées sont :

L’erreur quadratique moyenne : 
$$EQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{Q}_i - Q_i)^2}{N}} \quad (4.1)$$

L’erreur moyenne absolue : 
$$EMA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\hat{Q}_i - Q_i}{Q_i} \right| \quad (4.2)$$

La variance expliquée : 
$$VE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{Q}_i - Q_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{Q}_i - Q_i))^2}{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (4.3)$$

Le coefficient de Nash-Sutcliffe : 
$$NASH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{Q}_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (4.4)$$

Coefficient  $R^2$ : 
$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})(\hat{Q}_i - \hat{\bar{Q}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (\hat{Q}_i - \hat{\bar{Q}})^2}} \right]^2 \quad (4.5)$$

- où :
- $i$  = le pas de temps;
- $N$  = le nombre total de pas de temps considérés ;
- $\hat{Q}_i$  = le débit calculé au pas de temps  $i$  ;
- $Q_i$  = le débit observé au pas de temps  $i$  ;
- $\bar{Q}$  = le débit moyen observé ;
- $\hat{\bar{Q}}$  = le débit moyen calculé.

Comparer des hydrogrammes fournit une évaluation qualitative des simulations, car la représentation graphique permet une comparaison rapide entre les niveaux simulés et observés pendant une période de temps. Cela permet de réaliser des comparaisons utiles des niveaux de déclenchement des alertes et des délais de prévision. La représentation exacte du volume de crue est également importante, dans la mesure où elle démontre l’efficacité du modèle pour mettre en relation les réponses liées aux précipitations et au ruissellement, et dans le cadre de la modélisation des crues, en particulier dans le cas d’un débordement. Les caractéristiques de forme des crues modélisées et observées peuvent être testées grâce aux paramètres suivants :

- (a) Différence des pourcentages au pic de crue entre des valeurs observées et simulées :

$$Q_{\max} [\%] = \frac{\hat{Q}_{\max} - Q_{\max}}{Q_{\max}} * 100 \quad (4.6)$$

- où :
- $Q_{\max}$  = le débit maximum observé ;
- $\hat{Q}_{\max}$  = le débit maximum simulé.

- (b) Différence de phase du débit maximum (en heures) :

$$\Delta t_{\max} [h] = \hat{t}_{\max} - t_{\max} \quad (4.7)$$

- où :
- $t_{\max}$  = le moment (heure) auquel le débit maximum observé atteint la section de contrôle ;
- $\hat{t}_{\max}$  = le moment (heure) auquel le débit maximum simulé atteint la section de contrôle ;

Pour les événements de crue sélectionnés, il est également recommandé de tester les performances du modèle en définissant un seuil de hauteur d’eau au-dessus duquel seront comparés le temps et le volume des hydrogrammes observés et calculés. Cela peut être effectué pour un niveau d’alerte ou de danger proposé ou existant, ou pour une catégorie de dépassement du débit, par exemple le niveau dépassé par 10 pour cent des valeurs de débit.

- La différence volumétrique peut être évaluée comme suit :

$$\Delta V [\%] = \frac{|\hat{V} - V|}{V} * 100 \quad (4.8)$$

- (la différence en pourcentage entre les volumes observés et calculés)

Volume de contrôle = 
$$1 - \left| \frac{\sum \hat{V}}{\sum V} - \frac{\sum V}{\sum \hat{V}} \right| \quad (4.9)$$

Chiew et McMahon = 
$$1 - \left( \frac{\sum (\sqrt{\hat{V}} - \sqrt{V})^2}{\sum (\sqrt{V} - \sqrt{\hat{V}})^2} \right) \quad (4.10)$$

$$\text{Willmott} = 1 - \frac{\sum (\hat{V} - V)^2}{\sum \left( \left| \hat{V} - \bar{V} \right| + \left| V - \bar{V} \right| \right)^2} \quad (4.11)$$

où :

$V$  = le volume observé ;

$\hat{V}$  = le volume simulé correspondant ;

$\bar{V}$  = le volume moyen observé.

#### 4.4.2 Critères graphiques de vérification du modèle

Comme alternative aux critères de vérification numérique, plusieurs critères de vérification graphique ont été préconisés pour leur rapidité à identifier la qualité de l'ajustement. Ces critères de vérification graphique vont des simples graphiques des valeurs observées et prévues, aux diagrammes de dispersion des deux quantités, en passant par divers types de courbe. Ces méthodes sont importantes et doivent toujours être utilisées comme contrôle de base. Elles permettront aussi aux agents de mieux comprendre le modèle et la signification des données.

#### 4.4.3 Critères de vérification des prévisions

La vérification des prévisions est quelque peu différente de la vérification des modèles décrite ci-dessus, et fait figure depuis quelques temps déjà de caractéristique bien établie parmi les bonnes pratiques météorologiques. Un certain nombre de critères existent pour vérifier les prévisions et l'évaluation est utilisée pour améliorer les modèles et développer la confiance dans les décisions prises sur la base des prévisions. Une sélection de critères, ainsi que leur raison d'être, est résumée dans un document rendu public sur le site Internet du Bureau météorologique australien : [http://www.cawcr.gov.au/staff/eee/verif/verif\\_web\\_page.html](http://www.cawcr.gov.au/staff/eee/verif/verif_web_page.html).

La communauté hydrologique a récemment commencé à adopter certains de ces critères. Les exemples incluent les indices de comparaison, tels que la probabilité de détection (PD), le taux de fausses alarmes (TFA), la caractéristique de performance (courbe ROC - Relative Operating Characteristic) et l'indice d'efficacité de Brier. Des progrès ont également été réalisés concernant l'évaluation de la valeur économique des prévisions, par exemple grâce à l'indice de valeur relative. Il est recommandé que l'utilisation de ces techniques devienne plus répandue parmi les praticiens de l'annonce des crues, afin d'obtenir une perspective complète de l'utilité des modèles hydrauliques et hydrologiques et d'améliorer les décisions opérationnelles.

Des «mesures continues» telles que les erreurs systématiques (erreur moyenne), l'erreur quadratique moyenne (EQM) et l'erreur moyenne absolue (EMA) mesurent les différences entre les quantités

prévisionnelles et réelles en termes numériques. Il n'existe pas de mesure absolue de ce qui constitue un «bon» ou un «mauvais» score. Cependant, après une période d'utilisation, il peut être décidé des plages de scores acceptables pour l'application en question. Les méthodes fourniront un moyen grâce auquel des ensembles successifs de résultats indiqueront si l'exactitude des mesures s'améliore ou non.

Dans le cas de prévisions reliées à un seuil, soit une quantité soit une période temporelle, par exemple une prévision de pic de crue, alors des mesures appropriées seront utilisées sur la base d'un tableau de contingence ou d'une approche par «valeurs catégoriques». Ces mesures peuvent inclure le taux de succès (TS) ou la probabilité de détection PD, le taux de fausses alertes TFA (qui est de  $1 / \text{la probabilité d'apparition [PA]}$ ), et l'indice de menace (IM) dit aussi indice de succès conditionnel. Ces mesures permettent d'établir un indice cible, par lequel un niveau idéal de réussite, par exemple de 75 pour cent, pourrait être défini en termes de nombre de succès, d'échecs et de fausses alarmes. Les explications suivantes sur les mesures et leur utilisation sont empruntées à un rapport du Met Office du Royaume-Uni (Golding, 2006) :

Indice de menace :  $\text{IM} = \text{succès} / (\text{succès} + \text{fausses alarmes} + \text{échecs})$  : L'IM est une combinaison des taux de succès et de fausses alarmes, qui accorde une pondération équivalente aux échecs et aux fausses alarmes, mais ignore les rejets corrects. Il est donc guidé par les «événements», mais ne tient pas compte des rapports coût-pertes potentiellement élevés qui peuvent survenir suite à des événements extrêmes. Cet indice peut constituer un indicateur général utile pour mesurer la capacité à prévoir un événement inhabituel. Dans le cadre d'une utilisation normale, un seuil de 33 pour cent est souvent défini pour un système de prévision fonctionnel, avec un TS de 50 pour cent et un TFA de 50 pour cent.

Probabilité d'apparition :  $\text{PA} = \text{succès} / (\text{succès} + \text{fausses alarmes})$  ;  $1/\text{PA} = \text{TFA}$  : si l'événement est prévu, l'intérêt réside dans la probabilité qu'il se produise réellement (ou de façon équivalente dans le TFA, à savoir la probabilité pour qu'il ne se produise pas). Pour un événement à fort impact, les fausses alarmes sont plus acceptables que les échecs, de sorte qu'une probabilité d'occurrence inférieure est acceptable. D'autre part, si la PA est trop faible par rapport à l'action à entreprendre, elle sera ignorée (le syndrome de «l'homme qui criait au loup»). Dans le rapport de Golding (cité ci-dessus), celui-ci remarque qu'il est peu probable qu'une PA inférieure à 10 pour cent soit considérée comme utile.

Taux de succès ou probabilité de détection :  $\text{PD} = \text{succès} / (\text{succès} + \text{échecs})$  : si l'événement n'est pas prévu, aucune mesure d'atténuation ne peut être prise

et la prévision ne présente donc aucun intérêt potentiel. Si l'impact de l'événement est de grande ampleur, et une mesure d'atténuation est applicable dans le cadre de la prévision, le TS est la mesure critique. Dans le rapport de Golding, on suppose que, quelles que soient les autres mesures, un TS inférieur à 33 pour cent (c'est-à-dire deux échecs pour chaque succès) est inutile à des fins de prévision des crues.

#### 4.5 SOURCES D'INCERTITUDE DANS LA PRÉVISION DES MODÈLES

Les prévisions des modèles sont inévitablement affectées par les différentes sources d'erreurs, qui peuvent être résumées comme suit :

- (a) Les erreurs concernant les modèles ;
- (b) Les erreurs concernant les paramètres des modèles ;
- (c) Les erreurs concernant les conditions aux limites ;
- (d) Les erreurs concernant les conditions initiales ;
- (e) Les erreurs d'observation ;
- (f) Les erreurs des prévisions en entrée du modèle.

En théorie, le degré de gravité et l'influence de chacune de ces erreurs doivent être pris en compte pour obtenir une prévision non-biaisée avec une variance minimale. Du point de vue de la théorie statistique, il est reconnu combien il est important de tenir compte et éventuellement d'éliminer les erreurs présentes dans les prévisions. Selon l'approche statistique, chaque source d'erreurs doit être décrite via sa fonction de densité de probabilité et marginalisée par rapport à la probabilité de prévision. Malheureusement, la plupart des fonctions de densité de probabilité pertinentes sont non seulement inconnues mais aussi extrêmement difficiles à déduire. Même le choix du modèle induit un degré d'erreur. Cette section traite des différentes sources d'erreur et d'incertitude quelle que soit leur utilisation réelle en matière de prévision.

##### 4.5.1 Erreurs concernant les modèles

Les modèles sont toujours des représentations simples et schématiques de la réalité : même les modèles les plus sophistiqués intégreront inévitablement une erreur de schématisation. En outre, les structures des modèles peuvent également être fausses, par exemple lorsqu'un modèle linéaire est utilisé pour l'approximation d'un phénomène non linéaire. Cela suppose qu'une erreur de modèle, plus ou moins grande, sera toujours inhérente à tout modèle. En général, les erreurs de modèles peuvent, dans une plus ou moins grande mesure, être compensées intégralement ou partiellement par le calage des paramètres et cela peut être l'une des raisons pour lesquelles les paramètres estimés peuvent être en contradiction avec les valeurs plausibles du point de vue physique.

##### 4.5.2 Erreurs concernant les paramètres des modèles

Si l'on considère que la structure des modèles représente le comportement physique d'un système aussi efficacement que possible à son échelle de représentation, alors on peut également considérer qu'un résultat positif est possible en fournissant au modèle des valeurs plausibles du point de vue physique pour les paramètres. Ces valeurs nécessiteraient juste quelques ajustements pour s'adapter à l'échelle non infinitésimale pour laquelle les équations fondamentales sont généralement dérivées. Cela est, par exemple, le cas d'un modèle de propagation des crues : les «n» de Manning peuvent être plus ou moins établis sur la base des matériaux connus et de la nature du lit de la rivière et de la plaine inondable. Dans le cas présent, l'incertitude des prévisions sera «conditionnée» à la structure du modèle ainsi qu'à ses paramètres. Toutefois, si les paramètres sont estimés sans tenir compte de la complexité de leurs caractéristiques statistiques, ils deviendront inévitablement moins performants et engloberont toutes les incertitudes.

##### 4.5.3 Erreurs sur les conditions aux limites

Les erreurs sur les conditions aux limites, également définies d'une manière générale comme des conditions invariantes dans le temps, affectent aussi gravement les prévisions, en particulier lors de l'utilisation de modèles à base physique, pour lesquels la description du terrain, les sections transversales et les déclivités des cours d'eau ainsi que l'élévation des digues peuvent radicalement modifier les résultats. Une fois encore, les erreurs de conditions aux limites peuvent être compensées par l'estimation des paramètres.

##### 4.5.4 Erreurs sur les conditions initiales

Les erreurs sur les conditions initiales peuvent non seulement affecter les résultats des modèles à base physique, comme dans le cas des modèles de propagation des crues ou d'inondations, mais également occasionner de très graves erreurs ou des incertitudes de prévision dans le cas de modèles pluie-débit. Par exemple, quel que soit le type de modèle (basé sur des données, conceptuel ou à base physique) utilisé, la teneur en humidité du sol au déclenchement d'un événement peut modifier le débit prévu d'un ordre de grandeur. Ce type d'erreur est plus grave pour les modèles événementiels, pour lesquels il est extrêmement difficile de déduire l'humidité du sol exacte. Avec les modèles continus utilisant une mise à jour explicite du bilan hydrique du sol, les effets sont moins marqués.

#### 4.5.5 Erreurs d'observation

Les données d'entrée issues des observations ou des estimations obtenues par l'ajustement de relations sont une autre source majeure d'erreurs. Les données d'entrée peuvent inclure les précipitations distribuées ou globales, les niveaux d'eau ou le débit estimé par une courbe de tarage ou une équation de déversoir. Les erreurs sur les précipitations spatialisées moyennes peuvent déjà facilement représenter entre 20 et 30 pour cent, tandis que les mesures de niveau d'eau et de débit peuvent être biaisées ou affectées par les erreurs des instruments.

Pour estimer correctement les valeurs «réelles» des paramètres d'un modèle à base physique, il est nécessaire de représenter toutes les quantités incertaines en termes de fonctions de densité de probabilité, ainsi que l'interaction ou l'effet cumulé de toutes les fonctions de probabilité. Cela est pratiquement impossible.

#### 4.5.6 Données de prévision

Une autre incertitude importante concernant la prévision des crues est le fait que les prévisions météorologiques sont caractérisées par leurs propres erreurs significatives. Il est peu probable que celles-ci puissent être intégrées efficacement dans le calcul de la probabilité prédictive conditionnelle du modèle de prévision des crues. Il existe un certain nombre de documents sur ce sujet, mais aucun consensus définitif concernant la meilleure façon de prendre en compte cette incertitude n'a encore été conclu.

La pratique météorologique évolue désormais progressivement vers la fourniture de prévisions d'ensembles. Les prévisions d'ensembles comprennent un certain nombre de projections pluviométriques futures à partir d'un point de départ où les conditions initiales sont soumises à des modifications différentes mais physiquement possibles. Les sorties peuvent suggérer un «résultat le plus probable», ainsi qu'un éventail de résultats possibles. La probabilité de prévision de la méthode des ensembles n'est pas fixe, par exemple concernant le rapport entre l'intensité pluviométrique maximum et moyenne, mais le format des données permet une évaluation de la probabilité des résultats (la prévision) dans chaque cas.

### 4.6 ASSIMILATION DES DONNÉES

#### 4.6.1 Objet

Dans le cas de la prévision des crues en temps réel, un grand nombre d'observations doivent être recueillies en temps réel. Ces observations incluent

un certain nombre de variables devant être utilisées dans les modèles ou des informations complémentaires visant à fournir un ajustement des modèles. Le but de l'assimilation des données est l'incorporation de ces informations dans les variables d'état des modèles ou dans les paramètres des modèles pour améliorer les performances des prévisions.

#### 4.6.2 Techniques disponibles

Diverses techniques sont disponibles pour l'assimilation des données. Les plus communément utilisées sont le filtre de Kalman (FK), le filtre de Kalman étendu, le filtre de Kalman d'ensemble, ainsi que le filtre à particules. Des techniques supplémentaires sont également utilisées pour la météorologie et la modélisation des eaux souterraines. Concernant les applications météorologiques, des techniques variationnelles, dénommées 3-Var ou 4-Var, sont largement utilisées pour gérer les nombreuses variables d'état concernées. Ces techniques, pas très différentes des filtres de Kalman, peuvent aussi être utilisées dans le cas de modèles hydrologiques distribués, par exemple pour intégrer des images satellite des conditions d'humidité du sol. Étant donnée l'importance du filtre de Kalman dans la mise à jour en temps réel des modèles prévisionnels, il est considéré utile de fournir les éléments de base indiqués ci-dessous.

Le filtre de Kalman (Kalman, 1960) est l'extension récursive du filtre de Wiener appliqué aux processus linéaires (ou linéarisés localement dans le temps) stationnaires et non stationnaires. Sa dérivation d'origine provient de la formulation classique espace-états des systèmes dynamiques en temps discret:

$$x_t = \Phi_{t-1,t} x_{t-1} + \Gamma_t \eta_t \quad (4.12)$$

(dénommée équation «modèle» ou «système»);

et,

$$z_t = H_t x_t + \varepsilon_t \quad (4.13)$$

(dénommée équation «de mesure»);

où :

$x_t [1,n]$  est le vecteur d'état, notamment le vecteur contenant toutes les variables d'état  $n$  utilisées pour représenter le système dynamique ;

$\Phi_{t-1,t} [n,n]$  est la matrice de transition d'état, qui peut varier à chaque pas de temps ;

$\eta_t [1,p \leq n]$  est un processus gaussien aléatoire inconnu indépendant du temps, doté d'une matrice de la moyenne  $\bar{\eta}_t$  et des covariances  $Q_t$ , utilisée pour représenter l'erreur du modèle, tandis que la matrice  $\Gamma_t [n,p]$  est une matrice appropriée pour corrélérer les dimensions ;

$z_t [1, m \leq n]$  est le vecteur de mesure, notamment le vecteur contenant les observations  $m$  et la matrice  $H_t [n, m]$  est une matrice appropriée pour corrélérer les dimensions ;

$\varepsilon_t[1, m]$  est l'erreur de mesure, représentée comme un processus gaussien aléatoire et indépendant du temps avec une matrice de la moyenne  $\bar{\varepsilon}_t$  et des covariances  $R_t$ , qui est également considérée comme étant indépendante de l'erreur du modèle  $\bar{\eta}_t$ .

Pour des raisons de simplicité, suivant la dérivation d'origine de Kalman (1960), le terme de «contrôle» a été omis de l'équation du modèle, tandis qu'un terme d'erreur de mesure a été ajouté. Le filtre de Kalman vise à trouver  $\hat{x}_{t|t}$ , l'estimateur non biaisé du minimum de la variance de l'état inconnu  $x_t$ , accompagné de la matrice de covariance d'erreurs  $P_{t|t}$  conditionné par la connaissance d'un estimateur d'état non-biaisé a priori  $\hat{x}_{t|t-1}$ , accompagné de sa matrice de covariance  $P_{t|t-1}$  (qui représente pleinement le processus stochastique dû à l'hypothèse des erreurs gaussiennes) et les toutes dernières mesures modifiées par le bruit  $z_t$ , accompagnées de leurs statistiques d'erreurs de mesure (une fois encore, la moyenne et la covariance sont suffisantes du fait de l'hypothèse gaussienne). Cette estimation est obtenue au moyen des équations suivantes :

À chaque pas de temps, les estimations de l'état et la covariance des erreurs sont extrapolées à partir de l'étape précédente :

$$\hat{x}_{t|t-1} = \Phi_{t|t-1} \hat{x}_{t-1|t-1} + \Gamma_t \bar{\eta}_t : \text{extrapolation d'état} \quad (4.14)$$

$$P_{t|t-1} = \Phi_{t|t-1} P_{t-1|t-1} \Phi_{t|t-1}^T + \Gamma_t Q_t \Gamma_t^T$$

: extrapolation de la covariance d'erreurs (4.15)

Puis, les quantités suivantes sont estimées :

$$v_t = z_t - \bar{\varepsilon}_t - H_t \hat{x}_{t|t-1} : \text{dénommé l'«Innovation»} \quad (4.16)$$

$$K_t = P_{t|t-1} H_t^T (H_t P_{t|t-1} H_t^T + R_t)^{-1}$$

: dénommé le «Gain de Kalman»

(4.17)

Enfin, les estimations a priori peuvent être mises à jour pour inclure les toutes dernières mesures :

$$\hat{x}_{t|t} = \hat{x}_{t|t-1} + K_t v_t : \text{mise à jour de l'état} \quad (4.18)$$

$$P_{t|t} = (I - K_t H_t) P_{t|t-1}$$

: mise à jour de la covariance des erreurs (4.19)

La difficulté principale pour appliquer le filtre de Kalman est que les conditions d'optimalité ne sont satisfaites que lorsque la matrice de transition d'état  $\Phi_{t-1,t}$ , ainsi que les statistiques d'erreurs des modèles et des mesures ( $\bar{\eta}_t$ ,  $Q_t$ ,  $\bar{\varepsilon}_t$  et  $R_t$ ) sont tous connus. Une solution a été trouvée au problème d'estimation des statistiques d'erreurs inconnues lorsque l'Innovation est indépendante du temps, une condition associée avec l'optimalité du filtre de Kalman. L'estimation des paramètres de la matrice de transition d'état (généralement dénommés «hyper-paramètres») s'est avérée être un problème nettement plus complexe. Plusieurs approches peuvent être trouvées dans la littérature pour résoudre le problème de l'estimation non linéaire provoqué par l'estimation simultanée des valeurs d'état et des paramètres. Ces approches vont du développement du filtre de Kalman dans l'espace des paramètres jusqu'à l'utilisation du filtre de Kalman étendu pour les vecteurs d'état élargis aux paramètres, ou de l'utilisation du maximum de vraisemblance jusqu'à la méthode des moments et aux approches bayésiennes complètes. Suivant la méthode des variables instrumentales, Todini a réalisé que l'estimation de l'état postérieur  $\hat{x}_{t|t}$  est la meilleure méthode variable instrumentale possible, car elle est totalement indépendante du bruit de mesure, et elle est également un estimateur de la variance minimale de l'état réel inconnu en raison de l'optimalité du filtre de Kalman. De même, Todini a développé une technique d'estimation (mutually interactive state parameter) en utilisant deux filtres de Kalman conditionnés l'un par l'autre: l'un dans l'espace de l'état conditionné par les estimations de paramètres de l'étape précédente, et l'autre dans l'espace des paramètres conditionné par les estimations d'état obtenues au cours des précédentes et des dernières mises à jour. Cette méthode d'estimation a récemment été reconnue comme plus efficace que la méthode des moments et très proche de la méthode du maximum de vraisemblance, mais nettement moins exigeante en termes de temps de calcul, tandis qu'une approche bayésienne, nécessitant l'utilisation de l'échantillonneur de Gibbs pour générer des distributions postérieures, a dû être abandonnée en raison de ses exigences démesurées en termes de temps de calcul.

Des exemples utiles de l'application des filtres de Kalman pour les estimations d'état et des paramètres d'un modèle de type seuil à variable exogène autorégressive (autoregressive exogenous variable) avec entrée multiple/sortie unique sont disponibles dans Georgakakos (1986) avec la mise à jour des paramètres du modèle Sacramento au moyen d'un filtre de Kalman étendu.

## 4.7 COUPLAGE DES MODÈLES DE PRÉVISIONS MÉTÉOROLOGIQUES ET DES MODÈLES HYDROLOGIQUES

### 4.7.1 Considérations générales

Le but ultime de la prévision des crues est de fournir des prévisions exactes des conditions hydrologiques à partir d'une situation météorologique prévue. Actuellement, les prévisions déterministes et probabilistes, ou les prévisions d'ensemble quantitatives de précipitations, ainsi que d'autres paramètres météorologiques prévus (comme la température) peuvent être utilisés comme données d'entrée pour les modèles hydrologiques afin d'en tirer des prévisions hydrologiques à l'aide de méthodes de modélisation numérique. Le couplage des prévisions météorologiques en tant que données d'entrée des modèles est un processus important qui nécessite d'être intégré pour produire des prévisions hydrologiques significatives. Sachant que les prévisions météorologiques deviennent de plus en plus utiles en tant que données d'entrée pour la modélisation hydrologique, les Services hydrologiques nationaux (SHN) et les Services météorologiques nationaux (SMN) doivent développer une étroite coordination et collaboration pour optimiser la qualité et la valeur des produits et des services météorologiques proposés à la communauté d'utilisateurs des ressources en eau.

La science intégrée dans les modèles météorologiques, climatiques et hydrologiques a connu de réels progrès au cours de la dernière décennie en raison de la rapide évolution de la vitesse et de la capacité des ordinateurs. Cela permet de coupler des modèles météorologiques et hydrologiques directement et cette avancée doit être considérée comme une approche distincte relative à l'utilisation des résultats des modèles météorologiques en tant que données d'entrée sous forme discrète dans les modèles de prévisions hydrologiques. En 2002, le Met Office du Royaume-Uni a confié à HR Wallingford la mission de préparer un état des lieux des capacités existantes et futures pour le couplage direct des modèles météorologiques et hydrologiques (HR Wallingford, 2002). Ces systèmes sont définis comme des prévisions hydrologiques mondiales (GHF). Les prévisions hydrologiques mondiales sont globales dans le sens où elles peuvent être mises en œuvre à n'importe quel endroit dans le monde et à tout moment, sous réserve des infrastructures nécessaires pour l'exploitation des modèles hydrologiques disponibles. Le terme "prévisions hydrologiques globales" est appliqué uniquement aux cas où les modèles météorologiques sont intégrés dans la formule, avec une intervention limitée entre la prévision numérique du temps (PNT) et la prévision

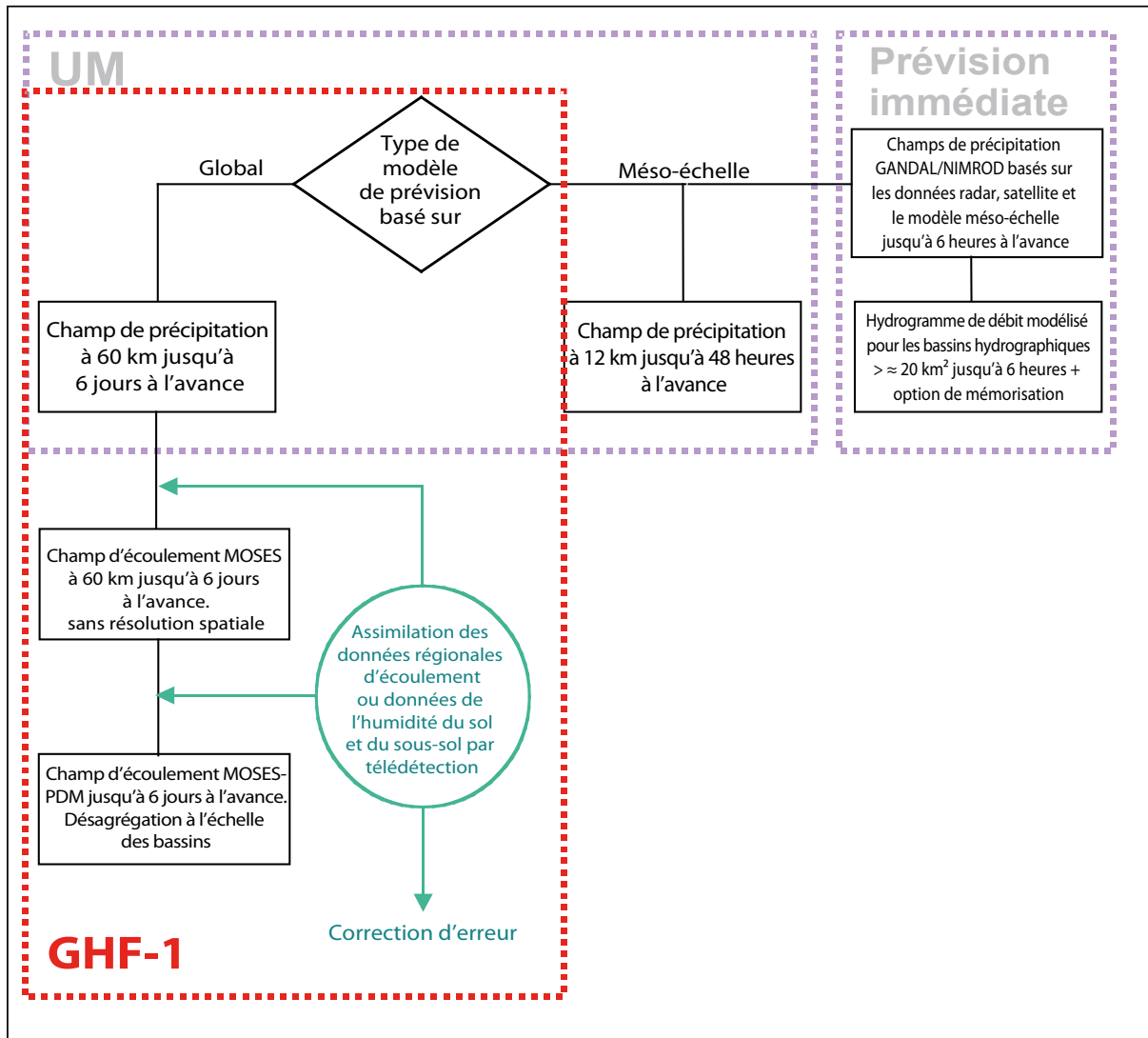
hydrologique. Cela les distingue de la situation commune où un bureau de prévision hydrologique utilise des prévisions météorologiques, numériques ou autres, pour émettre des avis d'alerte généralisée ou pour activer d'autres activités de prévision «déconnectées» du modèle.

Trois cas de couplage de base peuvent être envisagés, suivant la source des données d'entrée : le modèle global, le modèle méso-échelle et les systèmes de prévision immédiate. Ils diffèrent en termes d'échelle géographique et, par conséquent, ils fonctionnent avec des délais allant des plus longs aux plus courts. Un certain nombre de variantes basées sur ces méthodes de couplage de base peuvent être identifiées, comme :

- (a) Le nombre et la «profondeur» des paramètres hydrologiques supplémentaires (débit, hauteur, zone inondée) ;
- (b) La disponibilité de données de terrain et la façon dont elles sont assimilées ;
- (c) L'utilisation faite des présentations de résultats d'ensemble et probabilistes.

Tandis que le pas de temps horaire utilisé par les modèles de prévision numérique du temps (PNT) répond à la plupart des exigences temporelles pour la prévision des crues, leur échelle spatiale limite beaucoup leur application. Ce problème, commun à toutes les prévisions hydrologiques globales (GHF), émane des équations sous forme discrète utilisées pour décrire les processus atmosphériques, en particulier les précipitations. Les perturbations aux longueurs d'onde similaires aux côtés du maillage du modèle sont déformées de telle sorte que seules les caractéristiques pluviométriques de quatre mailles ou plus sont bien représentées (Golding, 2006). Cela suppose que la zone minimum de bassins hydrographiques pouvant être modélisée explicitement par le modèle global est d'environ 50 000 kilomètres carrés, et pour le modèle méso-échelle d'environ 2 500 kilomètres carrés. En Europe, seuls les grands fleuves comme le Rhin, le Rhône ou le Danube remplissent les critères précités. Il existe de réels avantages à utiliser les prévisions hydrologiques globales (GHF) pour les bassins hydrologiques continentaux, car ils peuvent permettre d'éviter les problèmes de partage de données transfrontalières si les capacités de transfert de données internationales sont pleinement utilisées. Pour illustrer ce problème, mentionnons les fortes restrictions concernant la disponibilité des données pluviométriques et hydrologiques sur le Gange en Inde pour l'organisation responsable des systèmes de prévision des débits au Bangladesh.





UM (Unified Model) : United Kingdom Met Office Unified Model (modèle global du Bureau météorologique du Royaume-Uni)

Figure 4.2. Représentation schématique de la première option des prévisions hydrologiques globales, le modèle (GHF-1)

De brefs récapitulatifs concernant l'approche de couplage des modèles aux trois échelles sont présentés dans les deux sous-sections suivantes.

#### 4.7.2 Prévisions hydrologiques mondiales basées sur le modèle mondial

La Figure 4.2 donne une illustration schématique de la façon dont le modèle GHF pourrait utiliser les résultats du modèle intégré du Met Office du Royaume-Uni (UM modèle mondial  $1^\circ \times 1^\circ$ ), y compris les résultats du sous-modèle du Schéma d'échange de surface du Met Office (MOSES) qui décrit les processus en surface au sein du modèle UM. Les modèles MOSES intègrent des échanges verticaux de chaleur et d'humidité entre la surface (y compris la végétation) et l'atmosphère, et incluent aussi quatre réservoirs d'humidité du sol pour modéliser le mouvement vertical et latéral des

eaux souterraines. Les modèles intégrant un modèle d'humidité à distribution de probabilité, (PDM) ou TOPMODEL, sont intégrés dans la zone de sol supérieure du logiciel MOSES, fournissant ainsi une représentation statistique de la variabilité de la couverture et des propriétés des sols au sein du maillage.

Le transport latéral peut être interprété comme un ruissellement et est disponible soit comme un maillage total soit comme une distribution de fréquence conformément aux règles fixées par la PDM ou TOPMODEL : X étant la proportion des cumuls dans les mailles, Y la proportion du ruissellement. En mode «modélisation du climat», le ruissellement des mailles du UM est cumulé le long des trajectoires d'écoulement au moyen du schéma de résolution Oki et Sud après l'application des coefficients de retard appropriés. Des

informations sur le schéma Oki et Sud sont disponibles auprès de P. Cox du Met Office, au Centre Hadley (Royaume-Uni).

Le modèle hydrologique choisi pour le Système de vigilance des crues européen (European Flood Awareness System - EFAS) est le modèle LISFLOOD, développé par Deltares (ex. Delft Hydraulics). Il s'agit d'un modèle basé sur une grille d'un kilomètre couvrant les principales rivières d'Europe occidentale. Il utilise les prévisions pluviométriques sur 4 à 10 jours du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT) comme données d'entrée. Le modèle LISFLOOD simule le ruissellement et les crues dans les grands bassins hydrologiques résultant de précipitations extrêmes. Il s'agit d'un modèle pluie-débit distribué prenant en considération les influences de la topographie, de la quantité et de l'intensité des précipitations, de la teneur initiale en humidité des sols, de l'utilisation des sols et du type de sol.

Les résultats issus du modèle LISFLOOD sont des séries temporelles de débit aux exutoires et sous-exutoires définis par l'utilisateur des bassins hydrographiques. En outre, des cartes des zones d'entrée de l'eau, des précipitations totales, d'interception totale et d'infiltration totale peuvent être générées en fin de simulation, ainsi qu'une série de cartes indiquant les évolutions dans le temps de certaines variables, telles que la profondeur d'eau au niveau de chaque pixel. Le modèle LISFLOOD a été élaboré lors de deux études pilotes des dangers d'inondation dans le bassin hydrographique de la Meuse, couvrant plusieurs régions de la France, de la Belgique et des Pays-Bas, mais aussi dans le bassin de l'Oder, couvrant plusieurs régions de la République tchèque, de la Pologne et de l'Allemagne.

La prévision des crues pour les grandes rivières peut donc s'appuyer sur l'utilisation directe du modèle intégré anglais. Toutefois, il convient de garder à l'esprit que les périodes de montée et de descente des hydrogrammes des grandes rivières sont de l'ordre de plusieurs semaines. Ainsi, dans de rares circonstances, l'ajout d'une prévision de cinq jours issues du modèle hydrologique mondial GHF-1 peut présenter un avantage significatif.

Bien qu'il soit théoriquement possible de concevoir des modèles hydrologiques mondiaux de type GHF-1 en mode automatique, l'importance des erreurs est telle que cela nécessiterait inévitablement des données de terrain pour effectuer au début de la période de prévision un rapprochement avec la réalité. Des données de débit hydrologique en temps réel sont une condition préalable indispensable à la correction des erreurs. Il existe deux initiatives internationales qui peuvent contribuer à fournir

cela : le Système mondial d'observation du cycle hydrologique (WHYCOS) et le Centre mondial données sur l'écoulement (GRDC) sis à l'Institut hydrologique fédéral allemand (BfG) de Coblenche. Le WHYCOS a été lancé en 1993 par l'OMM et la Banque mondiale, en vue d'établir un réseau mondial d'observatoires hydrologiques pour la fourniture d'informations de qualité cohérente, transmises en temps réel ou en temps quasi-réel aux bases de données nationales et régionales. Le champ d'application peut également inclure l'utilisation de la télédétection par satellite pour mettre à jour la distribution de l'humidité du sol. L'intervalle de survol des radars qui sont adaptés à ces applications est de l'ordre de plusieurs jours, mais cela peut suffire pour une situation à évolution lente sur un grand bassin hydrographique.

#### 4.7.3 **Prévisions hydrologiques globales basées sur les modèles méso-échelle et la prévision immédiate**

La Figure 4.3 illustre un exemple de prévision hydrologique globale (GHF) basé sur un modèle du Met Office du Royaume-Uni ou un modèle méso-échelle similaire. Généralement, un modèle méso-échelle fournit des prévisions horaires des précipitations qui sont mises à jour toutes les six heures. Les modèles méso-échelle utilisent des méthodes de calcul complexes et reposent, dans une large mesure, sur une assimilation intensive des données. Par conséquent, les prévisions ne peuvent être disponibles que dans un délai de trois heures après l'heure des observations. Malgré cela, on considère qu'un ajout de 36 à 48 heures aux délais de prévision est réellement précieux pour les bassins hydrographiques à réponse rapide de plus de 2 500 kilomètres carrés, sous réserve, bien entendu, d'obtenir la précision adéquate.

Un exemple d'un système quasi-opérationnel semblable aux Prévisions hydrologiques globales basé sur un modèle méso-échelle est celui de l'Île du Sud de la Nouvelle-Zélande, qui utilise les Systèmes de modélisation atmosphérique régionaux (RAMS) pour la prévision quantitative des précipitations PQP avec une version de TOPMODEL pour la conversion en débit. RAMS possède une résolution de 20 kilomètres et est conditionné par les prévisions à 120 kilomètres du Met Office du Royaume-Uni. Les données de prévision sont disponibles auprès de Bracknell à 20 h 00 locale, et grâce au fonctionnement en continu de RAMS, une prévision hydrologique est disponible à 8 h 00, fournissant ainsi un délai supplémentaire de 27 heures par rapport aux événements annoncés initialement 48 heures auparavant. Conceptuellement, TOPMODEL met l'accent sur le processus d'infiltration au niveau des canaux de propagation dans le cours

supérieur. Ainsi, il devrait plus particulièrement convenir aux bassins hydrographiques des régions plus montagneuses. Les premiers résultats ont montré que les plus importantes sous-estimations et surestimations de l'amplitude des crues se sont produites lorsque le modèle a été laissé libre de tout contrôle. Cela illustre la nécessité des mises à jour avec les données de pluviométrie et de débit observées.

Une version modifiée du modèle méso-échelle peut être élaborée, par exemple en complétant la version 2 des Prévisions hydrologiques globales (GHF-2) avec un système de prévision immédiate. Cela fonctionne comme un processus d'assimilation complémentaire, auquel peut être associé un modèle combiné radar/prévision numérique du temps proposant des délais de prévision jusqu'à six heures.

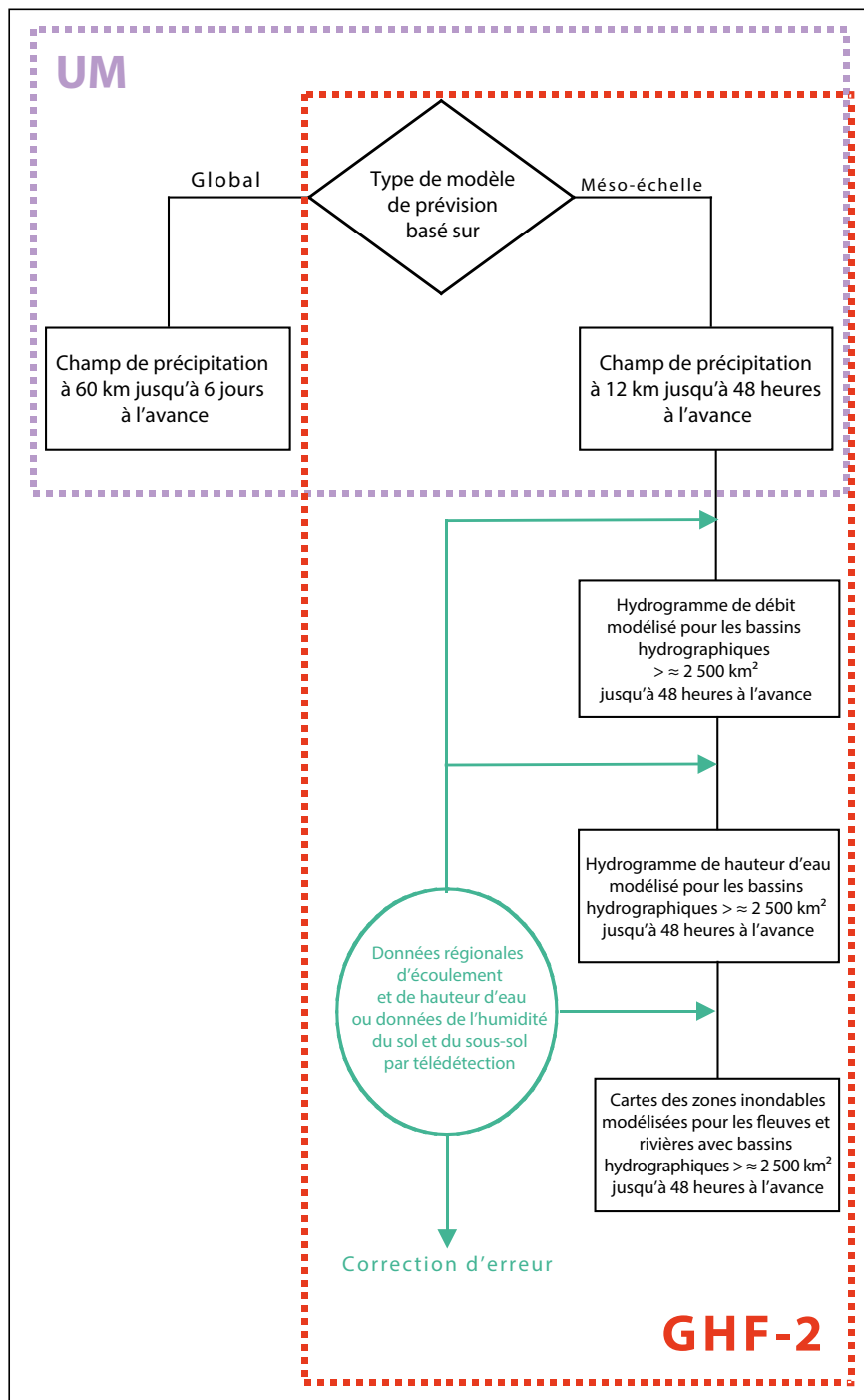


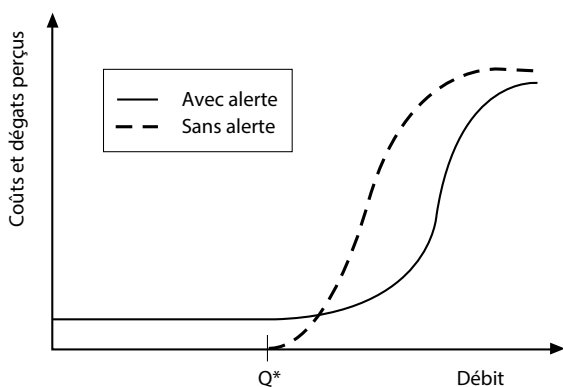
Figure 4.3. Prévisions hydrologiques globales basées sur les champs du modèle méso-échelle (GHF-2)

#### 4.8 INCERTITUDE DES PRÉVISIONS EN MODE OPÉRATIONNEL

Dans le cadre de la gestion d'urgence des crues, les décisions opérationnelles peuvent avoir des conséquences dramatiques (pertes économiques et victimes). Néanmoins, les responsables de la gestion des situations d'urgence doivent prendre des décisions sous l'effet du stress lié à l'incertitude sur l'évolution des événements futurs. La théorie de la décision est devenue un vaste sujet d'étude mathématique.

L'un des problèmes du débat qui anime les hydrologues est la façon de démontrer les bénéfices émanant de l'utilisation opérationnelle de l'incertitude des prévisions. Le corollaire de tout ceci est la façon de communiquer l'incertitude aux utilisateurs finaux, notamment les décideurs comme les responsables de la gestion de l'eau et des situations d'urgence, qui peuvent avoir quelques difficultés à percevoir ces bénéfices. Des déclarations du type «la probabilité d'une crue dans les prochaines 12 heures est de 67,5 pour cent» n'ont souvent aucun sens pour l'utilisateur final. Les informations doivent répondre à une question basique : «Quels sont les avantages et les désavantages attendus d'émettre un avis d'alerte de crue pour les 12 prochaines heures ?» Par conséquent, les hydrologues doivent définir, par le dialogue avec les utilisateurs finaux, des fonctions d'utilité subjectives, qui puissent être utilisées pour calculer les bénéfices ou les dégâts en fonction de la densité de probabilité prédictive du paramètre en jeu.

Un exemple schématique de ces fonctions d'utilité est illustré en Figure 4.4, pour le cas d'une alerte de crue (à noter que dans cet exemple schématique simple, les victimes ne sont pas prises en compte). La ligne en pointillés représente la perception de l'utilisateur final



**Figure 4.4. Les fonctions d'utilité issues du problème d'alerte de crue : la ligne pleine représente le coût et les dégâts perçus par l'utilisateur final si un avis d'alerte est émis ; la ligne en pointillés représente le coût et les dégâts perçus si aucun avis d'alerte n'a été émis ;  $Q^*$  est le débit maximum qui peut transiter en toute sécurité par le cours d'eau**

des dégâts (pas nécessairement les dégâts réels) qui se produiront si les digues sont submergées, notamment si  $Q > Q^*$ , où  $Q^*$  est le débit maximum qui peut s'écouler en toute sécurité par le cours d'eau. La ligne pleine représente la perception du coût en plus des dégâts lorsqu'un avis d'alerte a été émis. Comme cela apparaît en Figure 4.4, si un avis d'alerte est émis, un coût doit nécessairement être envisagé pour la mobilisation des agents de la protection civile, la disposition des sacs de sable et la mise en œuvre des autres interventions nécessaires. Cependant, les dégâts dans ce cas-là seront moindres que si aucun avis d'alerte n'avait été émis, du fait de la prise de conscience du danger représenté par la crue imminente. La décision d'émettre ou non un avis d'alerte dépendra de la comparaison des «dégâts attendus» pour les deux options, obtenue en intégrant le produit de la fonction de coût multiplié par la fonction de densité de probabilité qui mesure l'incertitude prédictive pour toutes les valeurs possibles de débit futur. Il convient de noter que les «dégâts attendus» sont fonction du débit futur réel qui se produira, non pas du débit prévu par le modèle. En utilisant la valeur attendue des dégâts à la place de la «prévision du modèle», la probabilité de fausses alarmes et de détections manquées devrait être fortement réduite, car l'incertitude concernant le débit futur doit être prise en compte. Par ailleurs, plus la densité de probabilité prédictive est élevée, plus la décision résultante sera fiable, de sorte que les améliorations en matière de prévision, plutôt que la recherche d'une meilleure prévision déterministe, doivent viser la réduction de l'incertitude des prévisions par tous les moyens disponibles.

Pour illustrer la façon dont l'incertitude des prévisions peut être utilisée de façon opérationnelle, le système d'aide à la décision de gestion en temps réel du lac de Côme est considéré comme l'un des rares exemples de réussite existants (Todini et Bongioannini Cerlini, 1999). Le lac de Côme est un lac naturel du nord de l'Italie fermé à son extrémité et géré comme un lac à usages multiples destiné au contrôle des crues, à l'irrigation et à la production hydroélectrique. À l'aide d'une approche de programmation dynamique stochastique, une règle de fonctionnement standard a été développée sur une durée de 10 jours afin d'optimiser l'irrigation et la production d'électricité à long terme. Cependant, lorsqu'une crue est prévue, le gestionnaire des bassins de rétention doit déroger à la règle de fonctionnement standard. Pour ce faire, une fonction d'utilité décrivant la perception des dégâts par le gestionnaire a été créée. Chaque matin, une prévision de crue accompagnée de son incertitude prédictive, est émise. Un débit sortant optimal est alors proposé, en minimisant les dégâts prévisionnels sur la base de l'incertitude de prévision du débit entrant. L'ensemble de ce processus est totalement ignoré par le gestionnaire de l'eau, qui n'est informé que de l'avis optimal suggéré et de ses conséquences attendues (Figure 4.5).

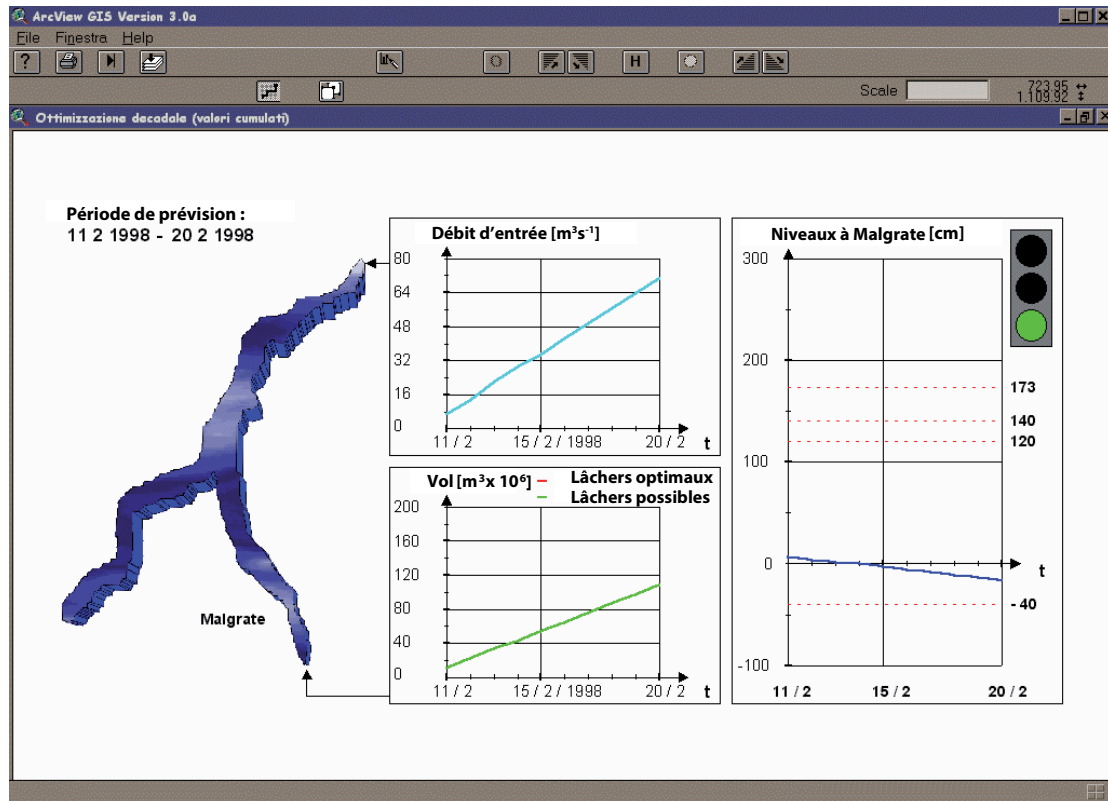


Figure 4.5. Le système opérationnel d'aide à la décision du lac de Côme. Ce système, basé sur la valeur du débit prévu entrant dans le lac (ligne bleu clair) et sur son incertitude (non indiquée, mais utilisée dans le processus), propose les débits sortant optimaux (ligne rouge, non indiquée) et possibles (ligne verte) au gestionnaire de l'eau pour minimiser les futurs dégâts. Il indique également le niveau prévu résultant du lac (ligne bleue) pour les 10 jours suivants.

Les performances du système ont été évaluées sur la base d'une simulation rétrospective pour la période de 15 ans comprise entre le 1<sup>er</sup> janvier 1981 et le 31 décembre 1995. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous. Lors de l'application de la règle optimisée, le niveau du lac n'a jamais chuté en deçà du seuil minimum acceptable de -0,4 mètre, ce qui historiquement a

**Tableau récapitulatif de la comparaison entre les niveaux enregistrés pendant un nombre de jours et les déficits en eau (historiques) et les résultats obtenus en appliquant la règle opérationnelle basée sur l'incertitude prévue (optimisé) pour la période de 15 ans allant du 1<sup>er</sup> janvier 1981 au 31 décembre 1995.**

Niveau d'eau	Nombre de jours	
	Historique	Optimisé
-40 cm	214	0
120 cm	133	75
140 cm	71	52
173 cm	35	34
Déficit en eau :	890,27 × 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	788,59 × 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>

été observé pendant 214 journées. Quant aux crues du lac de Côme, au cours de ces 15 années, le niveau du lac a été enregistré comme étant au-dessus du seuil de crue inférieur de 1,2 mètre pendant 133 journées, tandis que la règle optimisée a réduit ce chiffre à 75 journées. Une réduction tout aussi notable concerne les niveaux records du lac. À 1,4 mètre, lorsque le trafic s'arrête sur la place principale de Côme, la réduction est de 71 à 52 jours et à 1,73 mètre, la définition légale d'une « crue normale » permettant aux personnes de réclamer des dédommagements pour les dégâts occasionnés, la réduction est de 35 à 34 jours. Dans le même temps, le déficit d'eau d'irrigation a diminué en moyenne de plus de 100 × 10<sup>6</sup> mètres cubes par an. Ce résultat est exceptionnel, sachant que pour satisfaire la demande en irrigation, il faut des niveaux d'eau plus élevés dans le lac, un objectif en contradiction avec la nécessité de réduire la fréquence des inondations.

Il est très intéressant d'observer comment le système a été accepté par l'utilisateur final. Fin 1997, le système fut installé de façon opérationnelle et le Directeur du Consorzio

dell'Adda, responsable de la gestion du lac, fut invité à observer son fonctionnement (sans l'utiliser) jusqu'à ce qu'il soit convaincu de son efficacité. Au bout de six mois, le Directeur a reconnu qu'il avait pris la mauvaise décision lors des quatre occasions où le système d'aide à la prise de décision (DSS) avait dû proposer une solution. Depuis, le système est en fonctionnement avec la réussite que l'on sait. Il a non seulement réduit le nombre, la fréquence et la magnitude des événements de crue du lac de Côme, mais il a également permis une augmentation de trois pour cent de la production d'énergie et la mise à disposition d'énormes volumes d'eau supplémentaires pour l'irrigation.

L'exemple ci-dessus montre que les utilisateurs finaux, s'ils sont informés et impliqués de façon appropriée, se rendront bien vite compte des avantages qu'apporte la prise en compte de l'incertitude des prévisions, pourvu qu'on ne leur demande pas d'interpréter les prévisions en termes statistiques ni le calcul stochastique et l'optimisation fréquemment nécessaires pour les problèmes de ce type. Des efforts considérables sont encore nécessaires pour informer les utilisateurs finaux des améliorations possibles sans rentrer dans le détail de la complexité des calculs. De cette façon, ils apprécieront et recevront les bénéfices complets d'une approche visant à améliorer le succès de leurs prises de décision.

---

# RÉSEAUX DE SURVEILLANCE

### 5.1 DÉFINITION DES RÉSEAUX D'ACQUISITION DE DONNÉES

Un grand nombre de facteurs doivent être pris en compte lors de la conception d'un réseau opérationnel en appui à un système de prévision et d'annonce des crues. Le réseau repose essentiellement sur un ensemble combiné de points de surveillance pluviométrique et limnimétrique (voire débitmétrique) qui transmettent des informations en temps réel ou quasi-réel à un système central d'exploitation et de contrôle. Sachant que ces résultats sont très précieux sur le plan national, c'est-à-dire qu'ils permettent d'obtenir des annonces de crue détaillées et opportunes avec un maximum de précision, les réseaux doivent être fiables et robustes en s'appuyant principalement sur des systèmes automatiques de surveillance, de traitement et de récupération de données. Bien que certaines installations de surveillance puissent servir pour d'autres usages au sein des organismes propriétaires, ceux-ci étant souvent des services de gestion de l'eau et de météorologie, les composantes du système de prévision des crues doivent être considérées et gérées comme une seule et même entité. Ainsi, au sein de chaque organisme responsable, un niveau élevé de logistique doit être prévu pour les infrastructures critiques. Cela suppose de consacrer des financements appropriés à la fois pour l'acquisition et l'entretien du réseau, et de garantir des niveaux de personnel suffisants pour assumer les diverses fonctions. Outre la nécessité de faire fonctionner l'équipement 24 heures sur 24, il est également important de pouvoir fournir le personnel nécessaire pour le fonctionnement dans les situations d'urgence. Par conséquent, il convient de prévoir le personnel de remplacement, ses fonctions et les heures d'astreintes supplémentaires.

Surtout, le réseau de données doit fournir des informations relatives aux régions où le risque et l'impact des inondations sont élevés. Ainsi, il doit y avoir un nombre suffisant de stations transmettant des informations détaillées qui permettront d'observer

#### Encadré 5.1

À l'exception des bassins hydrographiques majeurs, la densité des stations météorologiques et la fréquence de collecte des données, qui est adaptée à la gestion des ressources, sont insuffisantes, dans la plupart des cas, pour fonctionner dans le cadre d'un réseau de prévision et d'annonce des crues.

l'évolution de la crue et de fournir un délai suffisant pour que les modèles de prévision soient utilisés et produisent des résultats permettant l'émission en temps opportun d'annonces de crues et la mise en œuvre des mesures nécessaires (voir Encadré 5.1). Les sections suivantes dans ce chapitre étudient les conditions nécessaires à la réussite d'un réseau, tandis que les chapitres 6 et 7 abordent de façon plus détaillée certains aspects techniques. Ce chapitre présente également les exigences liées à l'instrumentation en général, mais ne vise pas à inclure une spécification détaillée des instruments individuels.

### 5.2 ÉVALUATION DES RÉSEAUX EXISTANTS

Les réseaux utilisés pour les systèmes de prévision et d'annonce des crues sont souvent basés sur des réseaux hydrométéorologiques existants. Cela peut, dans une plus ou moins grande mesure, influencer la structure du réseau pour réaliser des économies sur la création de nouveaux sites. L'utilisation des réseaux existants a ceci de profitable que, outre l'équipement et les infrastructures des sites, lesdits sites disposeront d'une base de données validée qui constituera un socle d'informations pour l'élaboration des modèles. Les principaux problèmes à gérer lors de l'évaluation des réseaux existants concernent leur adéquation géographique aux fins de prévision. Sachant que les réseaux existants peuvent avoir été développés par des entités opérationnelles distinctes, par exemple un organisme de gestion des ressources en eau et un organisme météorologique, il se peut que certains problèmes de propriété et de gestion doivent être résolus.

Tel que mentionné au point 5.1, l'exigence première est que le réseau puisse fournir des informations utiles et en temps opportun. Ainsi, même s'il peut être pratique d'utiliser les réseaux existants d'un point de vue économique ou opérationnel, leur adéquation aux objectifs visés par l'annonce de crues doit être étudiée attentivement. Certaines des considérations les plus importantes sont expliquées dans cette section, mais des informations détaillées concernant la conception d'un réseau sont données au point 5.3.

#### 5.2.1 Réseaux météorologiques

Les réseaux d'observation gérés par des Services météorologiques nationaux (SMN) ont généralement évolué à partir de deux exigences historiques

importantes. Des observations synoptiques d'une large gamme de variables ont été collectées depuis de nombreuses années afin de comprendre les conditions météorologiques et de développer les connaissances et les méthodes en matière de prévisions météorologiques. Les données provenant des stations synoptiques et des autres stations «principales» visent à dresser le tableau d'une climatologie générale ou spécifique, par exemple l'agroclimatologie. Pour ces deux types de réseaux, l'exigence principale est d'échantillonner des situations sur l'ensemble d'une région ou d'un pays avec suffisamment de détail pour caractériser les variations territoriales et temporelles. L'enregistrement des données s'effectue généralement quotidiennement, les stations synoptiques principales prenant des mesures à des intervalles de trois ou six heures. Bien que la majorité des stations synoptiques et climatologiques utilisent désormais des capteurs et un stockage de données électroniques et automatiques, toutes ne font pas l'objet d'une exigence de télémesure pour la prévision des crues. Ces types de données ne sont pas toujours utiles pour l'annonce des crues, car l'intervalle de transfert des données est trop long et la répartition sur le territoire ne se focalise pas sur le comportement des crues. Les précipitations sur de courtes périodes ne constituent pas le centre d'intérêt de ces stations, de sorte que les données sont généralement présentées sous forme de cumul pour des périodes de 24 heures, même si les observations sont faites plusieurs fois par jour.

### 5.2.2 Réseaux pluviométriques

Les précipitations sont observées depuis de nombreuses années dans la plupart des pays, généralement journalièrement, mais seulement une minorité de ces pays enregistrent les précipitations en continu. Les réseaux ont été établis et gérés par un certain nombre d'organismes, même si, d'une manière générale, les données sont désormais gérées à des fins d'archivage par les SMN et les organismes de gestion de l'eau. Le développement des réseaux pluviométriques s'est fait au coup par coup et a été grandement influencé par divers objectifs. La taille et la composition des réseaux ont évolué avec le temps, tout comme les organismes qui les gèrent. L'étude des sites des réseaux pluviométriques de la plupart des pays indique qu'ils proviennent de :

- (a) Centres administratifs locaux ;
- (b) Ouvrages de traitement de l'eau et des eaux usées ;
- (c) Réservoirs ;
- (d) Établissements agricoles et forestiers ;
- (e) Services d'irrigation ;
- (f) Unités de recherche ;
- (g) Écoles et universités.

Mises à part quelques exceptions, ces types d'organismes auront une incidence sur la localisation des sites de mesure, généralement plutôt dans les zones de plaine et les agglomérations. Toutefois, un système de prévision des crues nécessite la présence de pluviomètres à une certaine distance des sites menacés de crues et dans les cours supérieurs des rivières afin de fournir des délais de réaction suffisants. Ainsi, un certain nombre de sites sont nécessaires dans des zones plus isolées (voir Encadré 5.2).

#### Encadré 5.2

Le réseau pluviométrique pour la prévision et l'annonce des crues peut être sélectionné à partir d'un réseau existant, mais les stations existantes nécessiteront une mise à jour, et des stations supplémentaires seront nécessaires dans des sites plus appropriés.

Bien que la gestion des données soit désormais devenue centralisée, les organismes de gestion peuvent ne pas avoir de véritable moyen de contrôle concernant le maintien d'observations régulières et peuvent dépendre fortement de la bonne volonté et du dévouement de volontaires. Les stations d'observation des précipitations pour un système de prévision et d'annonce des crues peuvent être sélectionnées parmi des sites existants, mais il faudra nécessairement les améliorer jusqu'à un degré élevé de qualité technique et de fiabilité.

### 5.2.3 Réseaux (hydrométriques) de jaugeage des cours d'eau

Le développement des réseaux hydrométriques a suivi de façon relativement similaire celui des pluviomètres, dans la mesure où plusieurs organismes différents peuvent les avoir gérés à l'origine, avant leur exploitation actuelle par une autorité nationale de gestion de l'eau. Cela se reflète dans le fait que leurs sites sont spécifiques aux structures de gestion de l'eau, par exemples des bassins de rétention, des barrages et des prises d'eau. À l'exception du premier exemple cité, ces sites sont également susceptibles de se trouver dans des zones de plaine, et il y aura, par conséquent, peu de sites appropriés pouvant fournir des informations précoces pour la propagation des crues. La tendance à privilégier les exigences en matière de gestion de l'eau sur ces sites tend également à se focaliser sur la mesure précise des basses eaux, pour identifier la disponibilité des ressources. Ceci se reflète dans les infrastructures de mesure, en particulier pour le débit, qui ne sont pas conçues pour mesurer les débits élevés et de crue. Ces dernières informations sont vitales pour la



modélisation en matière de propagation des crues et d'inondations. Par conséquent, dans l'éventualité où des sites hydrométriques existants sont sélectionnés pour faire partie intégrante d'un système de prévision et d'annonce des crues, leur conception nécessitera des modifications significatives avant que ceux-ci ne soient fiables (voir Encadré 5.3).

### Encadré 5.3

Les réseaux hydrométriques existants ne couvrent pas les parties du bassin hydrographique nécessaires pour l'annonce des crues, notamment dans les parties amonts. Les sites nécessiteront également une redéfinition et une réactualisation de leur équipement afin de fournir une transmission en temps réel des données sur l'écoulement pour une gamme plus large que celle fournie par le réseau existant.

À l'instar des pluviomètres, le but initial de la plupart des limnimètres requérait que leurs données soient uniquement échantillonnées et analysées à certains intervalles de temps. Ainsi, pour le niveau d'eau, qu'il soit relevé manuellement à des heures définies, par exemple quotidiennement, ou enregistré en continu selon une méthode quelconque (par enregistreur graphique ou automatique), ces données sont rarement disponibles en temps réel, et le débit, en particulier, est calculé rétrospectivement par périodes de mesure.

#### 5.2.4 Le réseau d'annonce des crues des rivières du Bangladesh

En raison de sa situation physique unique en tant que nation pratiquement localisée en intégralité dans une zone deltaïque, et propice à des inondations régulières et sévères, le réseau de surveillance opéré par le Bangladesh Flood Forecasting and Warning Centre (Centre de prévision et d'annonce des crues du Bangladesh) a été établi de longue date. Du fait que la surveillance des crues était une préoccupation majeure dès la mise en place du réseau hydrologique, sa structure reflète les principales exigences en matière de :

- Observation précoce de l'évolution des inondations – dans le cas présent, aux endroits où les rivières traversent les frontières avec l'Inde ;
- Points de surveillance successifs le long des rivières principales et des affluents pour identifier l'évolution de la crue ;
- Localisation des stations de mesure aux principaux points d'infrastructure, ponts ferroviaires et lieux de traversée des ferrys ;
- Surveillance rapprochée à proximité de la capitale ;

- Élaboration précoce par radio de rapports opérationnels sur le niveau des rivières et les quantités de précipitations, afin de fournir une estimation rapide de la situation ;
- Procédures simples de prévisions graphiques au moyen du temps de propagation et de corrélations niveau-à-niveau.

Le système d'origine a évolué à travers plusieurs stades de développement pour atteindre son état actuel, à savoir des niveaux significatifs d'automatisation et de sophistication en matière de prévision des crues. La Figure 5.1 illustre le réseau et les codes couleur des niveaux de vigilance.

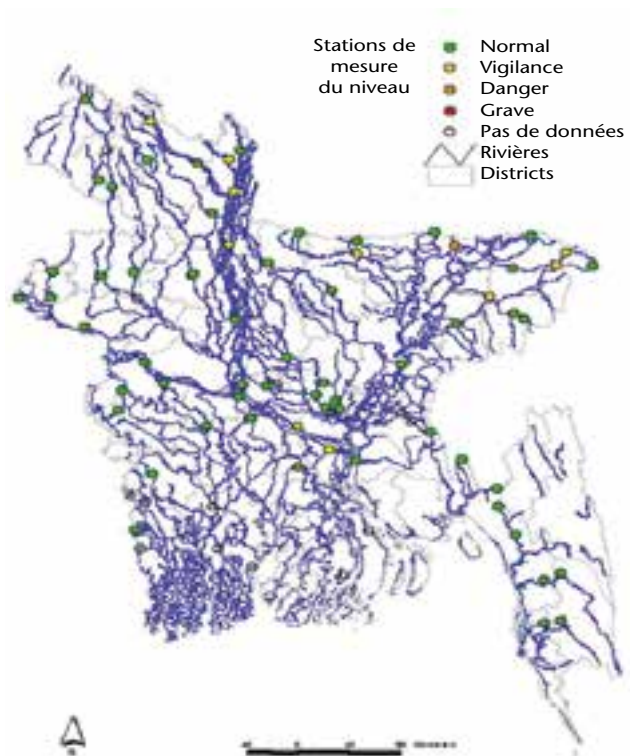


Figure 5.1. Le réseau de vigilance dédié aux risques de crues des rivières au Bangladesh

#### 5.3 EXIGENCES DE CONCEPTION POUR LES RÉSEAUX D'OBSERVATIONS HYDROMÉTÉOROLOGIQUES

La détermination des types de modèles et leur adéquation aux systèmes de prévision et d'annonce des crues ont été étudiées aux chapitres 3 et 4, et les exigences liées au fonctionnement physique sont abordées dans le chapitre 6. Cette section traite de la structure de base du système d'observation afin de fournir au modèle les données nécessaires, ainsi que les points essentiels qui doivent être considérés lors de la conception du réseau.

### Matrice des risques

Risque de crue	Zone d'impact de la crue			
	Zone non aménagée (faible)	Terres agricoles (moyen)	Zones urbaines à faible densité (élevé)	Centres urbains et infrastructures majeures (très élevé)
Élevé	Élevé/Faible	Élevé/Moyen	Élevé/Élevé	Élevé/Très élevé
Moyen	Moyen/Faible	Moyen/Moyen	Moyen/Élevé	Moyen/Très élevé
Faible	Faible/Faible	Faible/Moyen	Faible/Élevé	Faible/Très élevé

#### 5.3.1 Identification des zones à risque

Un système de prévision et d'annonce des crues doit se focaliser sur les collectivités et les infrastructures dans le cadre de la gestion d'un bassin versant ou d'une autre zone (commune, département, région). Certains systèmes de prévision et d'annonce des crues précoces créés au Royaume-Uni et ailleurs ont été critiqués parce qu'ils se focalisaient trop sur le système hydrologique, et pas assez sur les zones à risque. Cela s'expliquait en partie par le fait que les systèmes de prévision et d'annonce des crues étaient développés sur la base des réseaux hydrométriques existants, et aussi parce que les informations étaient principalement utilisées par les gestionnaires des bassins hydrographiques. Même s'il est compréhensible que les gestionnaires se soient satisfaits d'informations adaptées à leurs propres opérations d'intervention, par exemple le renforcement des protections, la transmission de l'information aux équipes chargées des travaux d'urgence et l'actionnement des vannes régulatrices des débits de crue, il faut bien reconnaître que ces informations ne présentaient qu'un intérêt limité pour les organismes externes. Ainsi, la conception du réseau doit répondre aux besoins de prévision pour des zones spécifiques.

Une large gamme de sites dans un bassin hydrographique peuvent être considérés comme soumis au risque d'inondation, mais il convient de classer ceux-ci par ordre de priorité en termes de niveau de risque et de magnitude des impacts. La nécessité d'un système de prévision et d'annonce des crues peut être identifiée à travers un classement par niveau de risque, généralement en fonction de la périodicité des crues liées aux événements déclencheurs particuliers, et par niveau d'impacts, généralement en termes de coûts économiques et de perturbations. Une matrice d'analyse, tel qu'illustrée dans le Tableau ci-dessus, peut constituer une approche utile, grâce à laquelle les risques et les impacts concernant différentes catégories peuvent être corrélés qualitativement aux bénéfices associés à la réception de prévisions et de messages d'annonce des crues.

La classification de la zone d'impact en fonction du type d'utilisation des sols peut varier d'un bassin à l'autre, ou suivant l'importance relative, par exemple, de l'agriculture et de l'industrie dans le contexte national ou régional. Définir l'importance de la prévision et de l'annonce des crues ne peut pas seulement dépendre du fait qu'il s'agisse ou non d'une zone à risque en termes de période de retour des crues. Les catégories utilisées dans le tableau ci-dessus sont générales et peuvent être utilisées pour illustrer le concept.

#### Terres non aménagées

Cela peut concerner les cours d'eau supérieurs des bassins hydrographiques (pâturages, forêts) ou les territoires où l'altitude est la moins élevée (plaines inondables, marais), où les impacts des inondations sont faibles, et où la fréquence des inondations est souvent élevée. L'utilisation de modèles de prévision de crues n'a en général pas d'intérêt significatif. Des exceptions peuvent exister, par exemple si ces zones jouent un rôle important en matière de dérivation ou de rétention de crue.

#### Terres agricoles

Dans cette catégorie, les impacts peuvent être très variables, en fonction du type d'agriculture. Les impacts sur les terres arables peuvent être majeurs mais les services d'annonce des crues sont relativement impuissants à cet égard. Toutefois, si un système d'annonce des crues peut s'avérer utile pour prendre des décisions concernant la mise en œuvre de mesures, en ce qui concerne notamment la régulation des vannes ou les dérivations de cours d'eau, il convient de lui accorder davantage d'attention. Cela est tout particulièrement vrai lorsque les systèmes d'irrigation ont une importance nationale majeure. Dans les zones de pâturages, l'annonce des crues est également bénéfique, car elle permet le déplacement du bétail vers des zones sécurisées.

### Zones urbaines à faible densité

Ces zones correspondent aux villages et petites villes disséminées sur un sous-bassin hydrographique ou le long d'un tronçon de cours d'eau spécifiques. Pour certaines parties de ces zones, par exemple celles adjacentes ou à proximité de plaines inondables ou situées derrière des structures de protection majeures, la mise en place d'annonces de crue spécifiques à chaque site n'est pas possible. C'est dans ces zones que les annonces de crues peuvent s'appliquer uniquement à une partie spécifique, en fonction du risque et des impacts. L'efficacité des annonces de crues dans ces zones dépendra de la prise de conscience des destinataires et des graduations de gravité suivant lesquelles les annonces sont présentées.

### Centres urbains et infrastructures majeures

De nombreuses grandes villes, pour diverses raisons historiques, se sont développées à proximité des rivières dans les plaines inondables et doivent désormais être équipées de systèmes de protection contre les inondations. En raison de la concentration de biens de grande valeur et d'infrastructures majeures, les systèmes de protection contre les inondations doivent être renforcés par des services d'annonce des crues adaptés pour déclencher les actions de gestion de crues. Les interventions peuvent inclure la fermeture des barrages anti-crues (Londres), l'installation de systèmes de protection démontables (Prague) ou, dans les cas extrêmes, des mesures de préparation à l'évacuation (la Nouvelle-Orléans).

Des études récentes en Écosse menées par Scottish Environment Protection Agency (SEPA) (SEPA, 2007) (l'Agence écossaise pour la protection de l'environnement) ont abordé l'amélioration des services de prévision et d'annonce des crues en considérant le risque de crue comme émanant de trois composantes de risque, tel que décrit dans l'Encadré 5.4. Ces composantes peuvent être illustrées avec une efficacité optimale à l'aide de cartes et un SIG, comme dans l'exemple de la Figure 5.2, qui représente les catégories du risque fixe par bassin hydrographique.

La schématisation du risque fixe est un moyen efficace de définir les zones les plus critiques, et, du même coup, les zones qui nécessitent un effort plus conséquent pour fournir un réseau approprié. Dans le cas de l'Écosse, où de nombreuses zones de montagne ne sont pas aménagées, le but était d'identifier (1) les bassins hydrographiques sur lesquels se concentrer pour la conception d'un système de prévision et d'annonce des crues de haute technologie, basé sur des modèles de prévision hydrologique et la télémessure, et (2) les bassins hydrographiques pour

#### Encadré 5.4. Composante du risque de crue

- (a) Risque fixe, issus de diverses variables du bassin hydrographique, comme la forme, la déclivité des cours d'eau, les propriétés hydrauliques des chenaux et les obstructions dans les zones urbaines, ainsi que les habitations et les infrastructures à risque ;
- (b) Risque antécédent, principalement fonction des mesures de l'humidité du bassin hydrographique, de l'état des bassins de rétention et de la couverture neigeuse ;
- (c) Risque (événementiel) de tempête, qui recouvre la plupart des variables incluses comme données d'entrée pour les modèles ou un système d'aide à la décision, par exemple la quantité, la répartition et l'intensité des précipitations, l'évolution de l'état des rivières, le déplacement de l'orage et les PQPs.

lesquels pouvait être fourni un système satisfaisant basé sur une surveillance moins intense et une modélisation simplifiée, par exemple un cadre d'aide à la décision (CAD) sous forme informatisée. L'approche CAD offre également l'avantage de fournir une alerte précoce aux autorités pour permettre la mise en place de mesures préparatoires, avant d'atteindre le mode opérationnel complet qui correspond à l'utilisation du modèle de prévision des crues en temps réel (SEPA, 2008).

#### 5.3.2 Sélection des délais appropriés

Les délais fournis par un système d'annonce des crues doivent être suffisamment longs pour permettre la mise en œuvre des mesures d'intervention. La fourniture des données obtenues grâce au système d'observation et aux prévisions du modèle doit être suffisamment rapide pour disposer des informations qui permettront l'émission de prévisions en temps et en heure.

Au Royaume-Uni, où la taille des bassins hydrographiques est plus réduite par rapport à la moyenne mondiale, l'Environment Agency (Agence pour l'environnement), la principale autorité en matière d'annonce de crues, a stipulé que le délai minimum doit être de deux heures. Ce délai vise les bassins hydrographiques à temps de réponse très rapide et il est considéré comme le temps minimum nécessaire pour permettre aux autorités et aux résidents de prendre les mesures de base nécessaires. Cela nécessite des équipements et services d'un haut niveau de spécification et de fiabilité pour une livraison des produits en temps opportun. Le niveau de service minimum n'est pas nécessairement appliqué à tous les sites du pays, et pour les grandes rivières, les délais de prévisions peuvent être plus longs. En vue de classer les divers bassins hydrographiques et

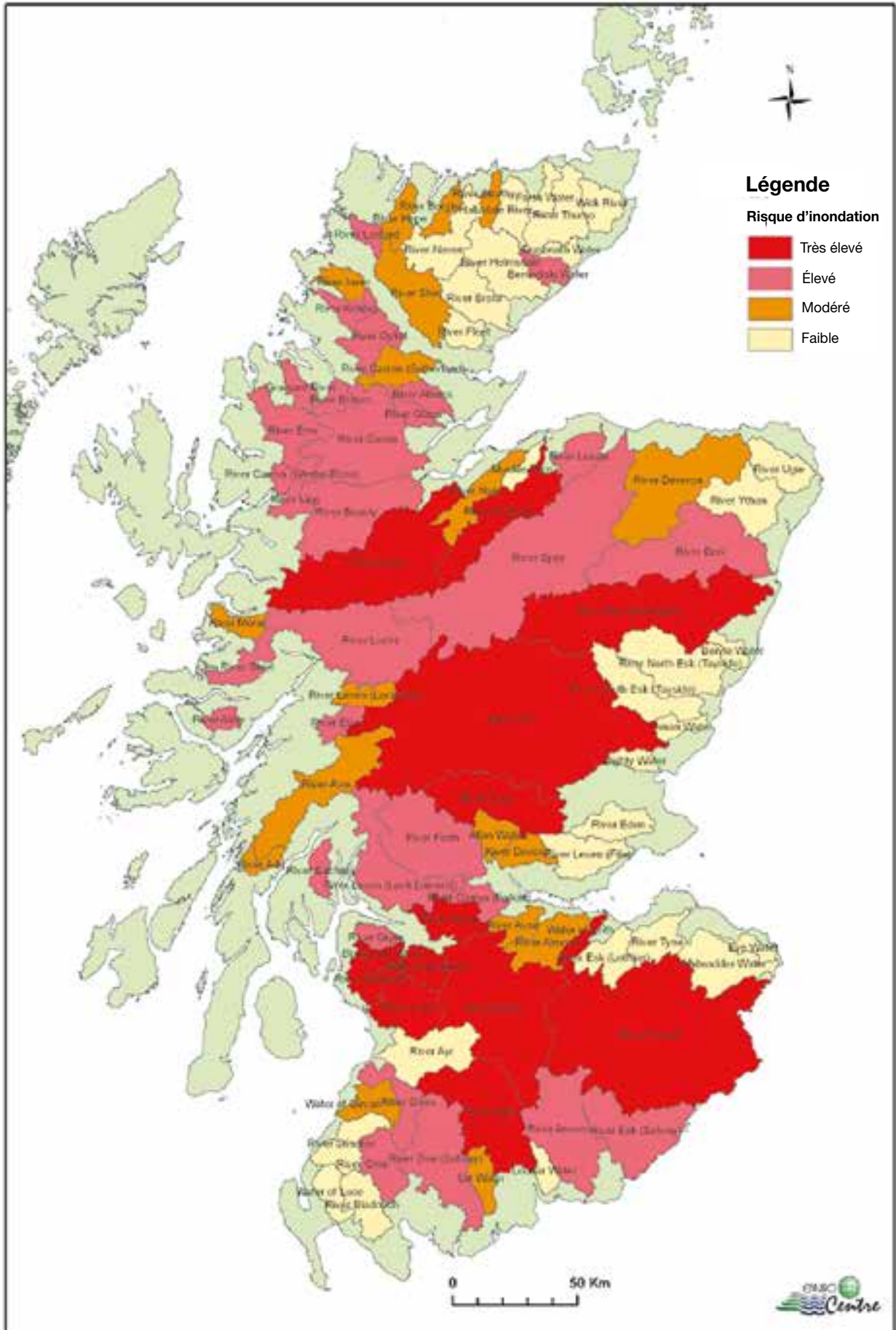


Figure 5.2. Probabilité de risque fixe en matière d'inondations en Écosse



d'identifier les zones où une réaction rapide est requise, l'Environment Agency (Agence pour l'environnement) a réalisé une carte nationale des temps de montée (tm) du réseau hydrologique, définis par catégories de zéro à trois heures, trois à neuf heures et plus de neuf heures. La carte des bassins hydrographiques avec un temps de montée tm inférieur à trois heures est illustrée en Figure 5.3. La plupart des bassins hydrographiques à temps de réponse rapide sont situés en altitude, mais de nombreux se trouvent également dans les agglomérations. Superposée à la carte des villes, cette approche fournit un guide utile concernant la façon dont le modèle de prévision des crues doit être structuré. Une application particulière a consisté à identifier les sites qui nécessitent des modèles hydrauliques plus détaillés pour les cours d'eau ou les plaines inondables, afin de fournir des prévisions plus précises du niveau et de l'ampleur des crues.



Figure 5.3. Les rivières et les bassins hydrographiques avec des temps de montée inférieurs à trois heures en Angleterre et au Pays de Galles.

La sélection du délai minimum ne signifie pas que les annonces doivent être seulement émises à ce moment-là. Plus le préavis de crue est important, plus les possibilités de préparer et de mettre en place des mesures de protection et de prévention sont grandes. De nombreux organismes d'annonce des crues fournissent des prévisions et les annonces associées 48 heures à l'avance (T+48), tel qu'illustré dans l'exemple des États-Unis en Figure 5.4. Au

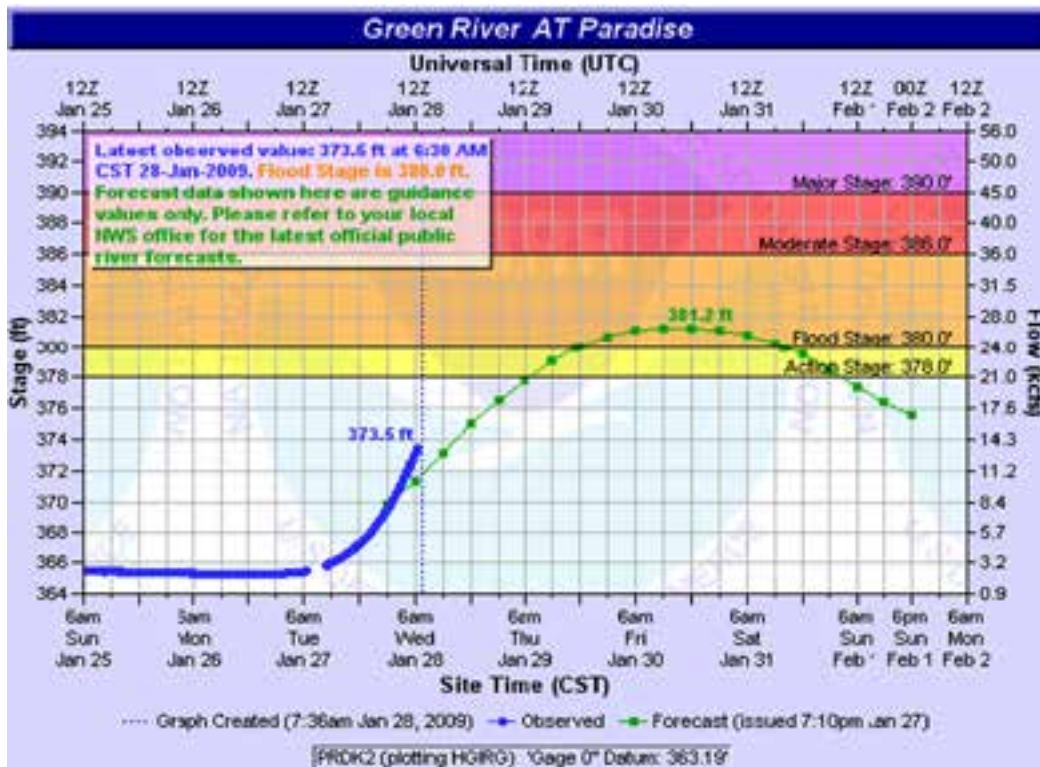


Figure 5.4. Prévision de crue à T+48 heures sous forme graphique pour la rivière Green à la station Paradise dans le Kentucky aux États-Unis

Bangladesh, où le service d'annonce des crues gère principalement les rivières à temps de réponse lent, l'horizon de prévision est de 72 heures (T+72). Dans de tels cas, la situation de la rivière est généralement suivie à des intervalles spécifiques, par exemple par pas de temps de trois ou six heures. Ainsi, la conception du réseau d'observation et de télémétrie pour les stations pluviométriques et le niveau des rivières (et les débits) doit être telle que la fourniture et le traitement des données destinées au système d'annonce des crues doivent être accomplis en respectant ces pas de temps.

### 5.3.3 Identification des unités hydrologiques géographiques

Outre la fourniture de prévisions et d'annonces à des points spécifiques, choisis au bénéfice des utilisateurs, le réseau d'observation doit être localisé de telle sorte que les météorologues, hydrologues et gestionnaires de crues professionnels puissent comprendre le comportement de la crue dans son contexte géographique. Les points de surveillance doivent être placés pour identifier de façon appropriée les conditions dans les sous-bassins hydrographiques contributifs, et à surveiller la progression d'une crue entre les régions situées en amont et en aval. Cela nécessitera un certain nombre de points d'observations dans les zones éloignées situées à l'amont, qui sont d'une manière générale, les zones qui contribuent le plus aux crues, quel que soit le bassin hydrographique.

Pourtant, dans les grands systèmes hydrologiques, les bassins hydrographiques mineurs des affluents ne doivent pas être négligés. Ceux-ci auront un délai de réponse beaucoup plus rapide que la rivière principale. De plus, si la rivière principale est en crue, les crues dans les bassins hydrographiques des affluents peuvent devenir encore plus critiques. Cela fut le cas pour les graves crues qui se sont produites en Europe centrale à l'été 2002. Des bassins hydrographiques majeurs, comme ceux de l'Elbe et du Danube, ont subi de sévères inondations, mais certains des dégâts les plus importants se produisirent dans les sous-bassins hydrographiques, où les conditions critiques n'avaient pas été identifiées suffisamment tôt.

Parallèlement à la surveillance des sous-bassins hydrographiques dans toute la région considérée, une surveillance suffisante du niveau d'eau le long des grandes rivières est essentielle, ce qui suppose la détermination de tronçons appropriés de rivières. La détermination des tronçons et le positionnement des points de surveillance doit prendre en considération le temps de propagation vers l'aval du pic de crue par rapport aux sites critiques pour la prévision, et inclure les points de confluence des sous-bassins hydrographiques majeurs, qui peuvent accroître de façon significative le débit de crue ou

élever le niveau d'eau en raison des effets de remontée.

### 5.3.4 Surveillance des conditions initiales (antécédentes) des bassins hydrographiques et préparation

Il s'agit d'un point différent en relation avec la nécessité de disposer d'une répartition suffisante des stations sur le bassin hydrographique pour suivre l'évolution d'une crue. La surveillance des conditions initiales ou antécédentes est essentielle pour l'initialisation des modèles, en particulier lorsque les intervalles de surveillance et le nombre d'opérateurs doivent passer du mode normal, ou de veille, au mode opérationnel complet. La surveillance des conditions antécédentes peut également être bénéfique en vue de fournir des alertes précoces aux partenaires professionnels.

La forme la plus simple et la plus commune de surveillance des conditions antécédentes utilise la quantité de précipitations qui tombe sur un bassin hydrographique. Le calcul peut faire partie intégrante de la mise à jour des modèles, par laquelle les variables et algorithmes pertinents sont révisés à des périodes déterminées, mais il peut également être «externe», sur la base de stations témoins installées sur un nombre limité de sites. La variable-indicateur la plus communément utilisée est l'indice de précipitations antécédentes (IPA), qui, dans la pratique au Royaume-Uni, prend la forme suivante avec un calcul sur les cinq jours précédents :

$$\text{IPA5} = 0,5[P_{d-1} + (0,5)^2 P_{d-2} + (0,5)^3 P_{d-3} + (0,5)^4 P_{d-4} + (0,5)^5 P_{d-5}]$$

où  $P_{d-x}$  est le total des précipitations lors de chacun des "d" (pour day) jours précédents.

L'IPA est actualisé chaque jour. Les niveaux seuils, qui conditionnent la modification du mode opérationnel ou du modèle, sont sélectionnés à partir de l'analyse des événements historiques.

Des indicateurs plus complexes d'humidité des bassins hydrographiques, tel que le déficit d'humidité du sol ou le potentiel de ruissellement (CEH, 2007), utilisent à la fois les précipitations et l'évaporation et dépendent donc des données pluviométriques et climatiques à surveiller, et d'une méthode de calcul appropriée de l'évapotranspiration réelle. En fonction de l'analyse et des connaissances historiques des bassins hydrographiques concernés, les valeurs seuils sont définies à des valeurs faibles ou nulles du déficit d'humidité du sol.

La difficulté pour surveiller in situ l'humidité des bassins hydrographiques au moyen de mesures par

conductivité ou par lysimètre rend l'utilisation de ces techniques très peu courante dans le cadre d'opérations de prévision des crues. Cela est largement dû aux difficultés liées au fonctionnement et à l'étalonnage en continu, ainsi qu'à la disponibilité de sites représentatifs. Toutefois, lorsque les bassins hydrographiques ont une composante significative en eaux souterraines en raison de la présence d'un aquifère important, l'accès aux relevés directs à partir d'ouvrages d'observation (puits, forages, piézomètres) est disponible en temps réel. Ceux-ci sont utilisés soit pour actualiser les sous-programmes des modèles qui traitent les eaux souterraines, soit en différé comme indicateurs des bassins hydrographiques.

### 5.3.5 Instrumentation et surveillance

Parce que la rapidité et la fiabilité de la fourniture des données depuis le terrain jusqu'au centre des opérations est d'une importance capitale dans le cadre d'un système de prévision et d'annonce des crues, une instrumentation électronique est recommandée aussi bien pour la détection que pour la transmission. Les types d'instruments de base nécessaires sont :

- (a) Les pluviomètres à augets basculeurs : Ils ont remplacé plus ou moins universellement les pluviomètres à siphon et à enregistreur graphique. Généralement, la taille des augets est spécifiée (0,2/0,5/1 millimètre). Un auget d'un millimètre convient mieux aux régimes pluviométriques intenses et fortement précipitants, car les séries de basculement trop rapides peuvent fausser les résultats ;
- (b) Les limnigraphes : Les limnigraphes avec capteur à flotteur et rotatifs, à injection de gaz, à transducteur de pression ou à ultrasons sont disponibles. La conversion des signaux d'analogique à numérique doit être traitée efficacement pour les instruments à flotteur et à transducteur ;
- (c) Les débitmètres à ultrasons : Ils peuvent être efficaces sur les sections étroites et régulières où les conditions hydrauliques sont stables et peuvent être représentées par des formules simples. Sur site, ils doivent être associés à une surveillance du niveau d'eau pour se référer aux conditions locales des berges, mais également pour fournir une vérification rapide concernant l'étalonnage de la section ;
- (d) Les stations climatiques : Elles sont utilisées la plupart du temps pour définir les conditions antécédentes et celles des autres bassins hydrographiques, par exemple la couverture neigeuse ou l'évapotranspiration, et peuvent donc ne pas avoir la même régularité de transmission que les capteurs de pluie et de niveau. Elles doivent comporter des sondes électroniques pour mesurer la température, l'humidité, le rayonnement et la vitesse du vent.

Des détails complets sur les instruments et les discussions concernant leur localisation et leurs sites sont disponibles dans les guides OMM référencés (OMM, 1983, 2007, 2008).

Il existe une large gamme de fabricants d'instruments dans le monde proposant tous ces instruments ou certains d'entre eux. Une excellente qualité et une grande fiabilité sont nécessaires en raison de l'importance des opérations de prévision et d'annonce des crues. Seuls des instruments de hautes spécifications acquis auprès de fournisseurs reconnus doivent être retenus. L'achat d'instruments bon marché et de copies réalisées sous licence doit être évité, car ils représentent une fausse économie. En effet, cela signifie qu'il existe de moins en moins de sociétés opérant sur le plan international qui peuvent être considérées comme fiables pour l'instrumentation. L'avantage de faire appel à de telles sociétés est qu'elles assurent un bon suivi en ce qui concerne la maintenance et les pièces de rechange, des éléments essentiels pour le fonctionnement efficace d'un système de prévision et d'annonce des crues. Il est également recommandé de faire appel à un fabricant ayant un représentant agréé dans le pays ou la région d'utilisation. En raison de la nature spécifique et très onéreuse des équipements modernes, il est recommandé que les contrats d'acquisition garantissent les points suivants :

- (a) L'approvisionnement des instruments ;
- (b) La conformité aux normes internationales de fabrication et de performances ;
- (c) L'installation et l'étalonnage ;
- (d) Le test et la mise en service des instruments et du réseau ;
- (e) Les contrats de garantie, de service, de fourniture de pièces de rechange et de maintenance.

La plupart des instruments modernes sont modulaires, s'appuyant en majeure partie sur des circuits électroniques et des microprocesseurs. À la différence des instruments manuels, il n'y a pas véritablement de possibilités de réglages ou de réparations par le personnel technique de l'organisme exploitant. En fait, il faut donner comme directive au personnel de ne pas intervenir au niveau des mécanismes internes des instruments et composants, car outre l'inefficacité de la manœuvre, cela risque d'annuler les contrats de garantie des fabricants. Le personnel technique de l'organisme exploitant doit, cependant, prêter une attention toute particulière à la vérification du fonctionnement des instruments et à leur alimentation, et procéder à des contrôles occasionnels de l'étalonnage et de l'intégrité structurelle. Ce n'est parce que les instruments sont automatiques qu'il faut imaginer qu'ils peuvent fonctionner longtemps sans surveillance. Il est également important que les boîtiers et l'installation des capteurs, centrales d'acquisition et transmetteurs répondent à des normes élevées, notamment en cas de conditions météorologiques extrêmes.

### 5.3.6 Adéquation des structures de données

Dans le cadre des spécifications des instruments, le format des données produites est un élément important à prendre en considération. Il est nécessaire de s'assurer que les données fournies soient aux formats adéquats pour pouvoir être utilisées par les programmes de traitement des données et les modèles de prévision des crues. Les fournisseurs reconnus d'instruments spécialisés connaissent les applications de données, de telle sorte que leurs logiciels de traitement doivent prendre en compte ces aspects avec un minimum de contraintes sur la conversion du format des données. Les transferts importants sont :

- Le signal d'un capteur à un format de données numérique ;
- La transmission de données numériques sous un format de communication standard ;
- La conversion des données transmises sous un format numérique compatible à leur insertion dans le programme de traitement et les modèles.

Des situations plus compliquées surviennent lorsque des informations importantes sont disponibles sous forme d'affichage visuel, par exemple des images radar et satellite, et des présentations de PNT. Le fait que celles-ci soient traitées sous une forme finale utilisant des matrices de pixels signifie qu'elles peuvent se prêter à une conversion numérique. Toutefois, les volumes de données concernées sont très importants, et, dans de rares cas uniquement, des systèmes ont été développés pour convertir les données visuelles en un format d'entrée directement utilisable. Ces systèmes incluent notamment l'HYRAD (Royaume-Uni) et le NEXRAD (États-Unis). La nature de la structure de données matricielle signifie également que les modèles de prévision doivent s'adapter aux données distribuées sur les points d'une grille, plutôt qu'aux données d'entrée à des points spécifiques.

### 5.3.7 Logiciels d'exploitation

Un certain nombre de logiciels individuels composent la structure globale d'un système de prévision et d'annonce des crues opérationnel. Il est essentiel que ces logiciels individuels soient reliés efficacement, avec un degré élevé d'automatisation et un minimum d'intervention humaine, par exemple pour la retranscription de données issues d'un logiciel qui sont utilisées par un autre logiciel. Cela peut inclure, par exemple, la retranscription des données pluviométriques de télémessure en données d'entrée pour un modèle hydrologique.

La nécessité de coordonner un certain nombre de flux de données différents, mais également de gérer l'ajout de nouvelles caractéristiques aux réseaux existants, a amené la plupart des grands fournisseurs de logiciels de prévision et d'annonce des

crues à les structurer en «système à architecture ouverte». Généralement, ces systèmes fournissent une interface utilisateur dédiée pour les modèles hydrologiques et hydrauliques ainsi que pour la collecte des données météorologiques et hydrologiques. Ces systèmes doivent donc être dotés de capacités importantes pour l'importation et le traitement des données. Les systèmes à architecture ouverte comprendront des modules spécialisés pour le traitement des données, et disposeront d'interfaces ouvertes pour faciliter l'intégration des différentes capacités des modèles. La philosophie du système est de fournir une «structure» ouverte pour la gestion du processus de prévision. Cette structure intègre une large gamme de fonctionnalités générales de gestion de données, tout en fournissant une interface ouverte pour une large gamme de modèles de prévision. Cette structure peut ainsi être personnalisée selon les exigences spécifiques d'un organisme de prévision des crues. Un exemple type d'architecture ouverte est illustré en Figure 5.5.

Bien qu'un système à architecture ouverte permette d'utiliser des modèles de types différents et d'origines différentes (systèmes développés antérieurement), les principaux fournisseurs proposeront leur propre gamme de modèles compatibles et complémentaires. Ceux-ci incluront généralement :

- Un modèle (pluie-débit) hydrologique ;
- Un modèle hydraulique de cours d'eau;
- Un modèle de cours d'eau et de plaine inondable ;
- Un modèle automatique pour déclencher un signal d'alerte.

Outre la nature exhaustive de la gestion de données et de la gamme de types de modèles, les systèmes d'exploitation sophistiqués fournissent une large gamme de modules d'affichage et de graphiques, qui forment l'interface utilisateur graphique (GUI). Tous contiennent des systèmes permettant d'établir des résumés graphiques, sous forme de tableaux et de produits cartographiques.

## 5.4 EXPLOITATION ET MAINTENANCE DES RÉSEAUX HYDROLOGIQUES

Il s'agit d'un aspect tout à fait crucial de la gestion des crues et des opérations d'un système de prévision et d'annonce des crues. Cela couvre une large gamme d'équipement, la mobilité et la capacité à maintenir les communications avec des tiers ou des prestataires de services et, en tant que tel, nécessite le maintien d'accords financiers sur le long terme pour les dépenses récurrentes. C'est ce dernier aspect qui est souvent négligé dans les accords de financement d'aide et pour lequel trop peu de considération est accordé dans l'organisation



financière des budgets gouvernementaux nationaux. Les axes principaux à considérer sont détaillés dans les sous-sections suivantes.

**5.4.1 Équipement de surveillance sur le terrain**

Les instruments doivent être conservés en bon état de marche. Dans les cas où des instruments manuels et mécaniques sont toujours utilisés, par exemple les instruments et les enregistreurs graphiques dont les mesures doivent être relevées par un opérateur, alors des visites régulières sont nécessaires et l'étalonnage des instruments doit être effectué aux intervalles requis. Les courantomètres doivent être envoyés périodiquement à un organisme d'étalonnage certifié. On ne trouve pas ce genre d'organismes dans tous les pays, auquel cas des accords financiers, logistiques et douaniers doivent être mis en place.

L'utilisation accrue d'instruments électroniques réduit la nécessité de visites de maintenance, mais il ne faut pas considérer pour autant que ces instruments ne nécessitent pas d'entretien. Un haut niveau de précision et de fiabilité est souvent prétendu par les fabricants et les fournisseurs ; il incombe donc à l'utilisateur de passer soigneusement en revue les données collectées. Ainsi, un programme strict de vérification des données par du personnel compétent est nécessaire. Ce n'est pas parce qu'un instrument ou un enregistreur de

données est une unité électronique verrouillée qu'elle restera fiable à vie. Les instruments auxquels les opérateurs ont accès, soit pour échanger une unité de mémoire soit pour télécharger des données sur un module de transfert ou un PC, doivent être inspectés régulièrement pour conserver les bases de données actualisées. Une inspection tous les trois mois doit être un objectif minimum.

L'alimentation est d'une importance vitale pour les instruments de terrain. Même dans les pays développés, l'accès au réseau électrique n'est pas toujours disponible, et il est souvent nécessaire et souhaitable d'installer des instruments sur des sites éloignés où il n'y a pas d'alimentation. Les batteries, l'énergie éolienne ou l'énergie solaire constituent toutes des solutions alternatives pour une alimentation sur site, mais elles nécessitent toutes un certain niveau de maintenance et d'entretien. Afin de limiter au minimum les temps d'arrêt des instruments et les perturbations du réseau, il est nécessaire de disposer d'instruments ou de pièces de rechange, mais aussi de planification et d'accords de maintenance avec les fabricants. Dans la plupart des cas, les instruments électroniques ne peuvent être étalonnés que par les fabricants, ce qui, une fois encore, peut nécessiter un envoi à l'étranger.

**5.4.2 Équipement de bureau**

À l'instar de l'équipement de terrain, le matériel de bureau devient de plus en plus électronique. Les

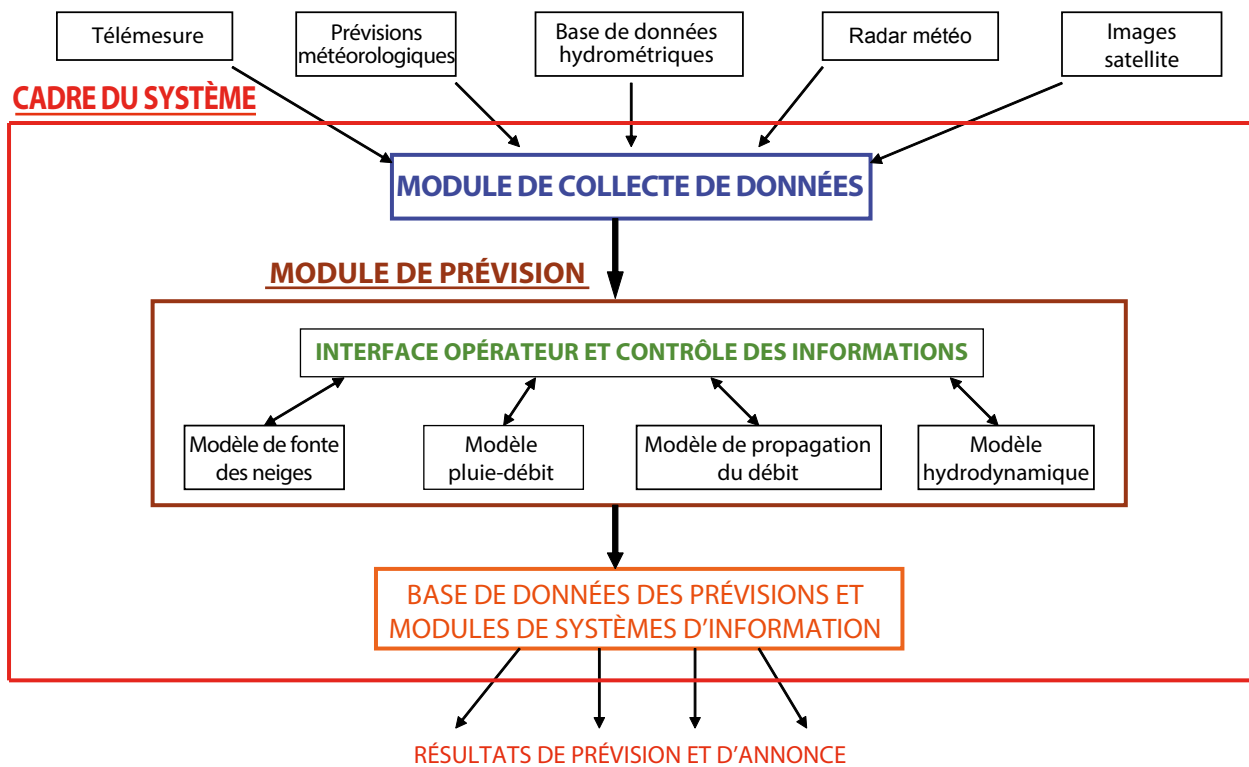


Figure 5.5. Un exemple de structure de modèle à architecture ouverte (d'après Wallingford Software)

articles standard dans le cadre d'une unité hydrologique incluent les téléphones, les fax, les photocopieurs et les systèmes informatiques de complexité variable. Ces articles deviennent complètement obsolètes lorsque les fabricants développent des produits et changent de modèles. Ainsi, le programme de maintenance doit prévoir la réparation et le remplacement de l'équipement que les fabricants ne prennent plus en charge. Il est important que les services hydrologiques aient accès à Internet et puissent communiquer par courriel. Ce sont tous ces services qui induisent des coûts récurrents chez les prestataires de services, qui peuvent être des organismes publics et privés.

Dans certains pays, le manque de fiabilité des services de télécommunications et d'alimentation en électricité exigent que les communications internes soient prises en charge par communications radio (sans fil). Une fois encore, le type d'équipement dans ce domaine est en constante évolution. Ainsi, les mêmes problèmes en matière de pièces de rechange, d'entretien et de remplacement existent que pour les instruments de terrain. Il peut aussi arriver que des frais de licence doivent être payés pour l'accès à des fréquences radio dédiées, en particulier si le service est critique sur le plan opérationnel dans les situations d'urgence.

#### 5.4.3 **Licences d'exploitation et garantie**

Les services hydrologiques reposent de plus en plus sur des modèles informatiques et d'autres logiciels, par exemple pour l'estimation des crues, les bases de données et le SIG. Il est plus probable que ces logiciels soient fournis par des sociétés internationales, plutôt qu'ils soient développés en interne. Ainsi, la maintenance dépend du fournisseur et elle est dispensée par le biais d'accords de service, de l'octroi d'une licence pour des logiciels, de dispositions de mise à jour et d'accords de garantie. Ce sont tous les postes de dépenses récurrents qui doivent être identifiés au moment de l'acquisition des installations, ainsi que le financement adéquat fourni en continu. Si les fournisseurs ne sont pas intégralement représentés dans un pays, ces accords de soutien logistique doivent être payés dans une devise étrangère, d'où la nécessité de disposer de bureaux de change.

#### 5.4.4 **Problèmes liés au personnel**

Les unités hydrométriques dépendent d'un certain nombre de membres de personnel qualifiés ayant à la fois une expérience technique et professionnelle. La formation et l'expérience professionnelle doivent être reconnues par une rémunération, des structures organisationnelles et des opportunités de carrière adaptées, ce qui peut être problématique dans des unités bien souvent de taille réduite. Au niveau

mondial, il est difficile de conserver le personnel, car les qualifications et les compétences techniques et professionnelles requises en hydrologie sont similaires à celles exigées dans des domaines plus larges du génie civil et de la science. Des plus grandes organisations publiques et privées peuvent souvent offrir de meilleurs salaires et des perspectives de carrières plus intéressantes. Dans le cas où l'hydrologie constitue une petite activité au sein d'une grande organisation, par exemple un service de gestion de l'irrigation et des ressources hydriques, les transferts de personnel en interne sont souvent la seule façon de trouver une évolution de carrière. Cela peut provoquer la perte de membres de personnel expérimentés lorsque ceux-ci aspirent à un poste de direction ou de cadre, mais aussi le recrutement de personnel n'ayant pas les qualifications requises ou manquant d'expérience. Cette dernière situation se produit fréquemment en cas de restructuration, de réduction d'effectifs, de dotation pour des postes vacants dans une grande organisation quand tout recrutement externe est gelé.

Sachant que les services hydrologiques sont invariablement des organisations gouvernementales, ils peuvent souffrir de problèmes globaux de réduction d'effectifs, de rémunérations insuffisantes et de découragement. Cette situation est exacerbée lorsque le paiement des salaires publics est retardé et que les autres indemnités (logement, mobilité et subsistance) ne sont pas versées. Même si elles ne sont pas forcément dangereuses, les activités hydrologiques comportent tout de même une certaine part de risque, par exemple les tâches de surveillance des crues et de jaugeage des rivières, et peuvent nécessiter de partir en déplacement ou de faire des heures supplémentaires en cas d'urgence. Il est important que ces facteurs soient reconnus et rémunérés.

#### 5.4.5 **Mobilité et transport**

Les opérations de terrain dépendent beaucoup des moyens de transports. Les principaux types d'exigences concernent les véhicules de terrain, les bateaux et les moteurs hors-bord appropriés, et ces éléments nécessitent une maintenance de haute qualité pour des raisons de fiabilité et de sécurité, ainsi que des moyens supplémentaires pour gérer le surcroît de travail lors des cas d'urgence et pour conserver une certaine flexibilité en cas de pannes imprévues. Les conditions locales spécifiques de certains pays nécessitent un équipement spécialisé. Par exemple, au Bangladesh, les grandes rivières nécessitent des catamarans spécialement prévus pour le jaugeage, qui doivent être de construction très robuste et motorisés de façon adéquate pour pouvoir fonctionner en conditions de fort débit. Ils nécessitent également des pilotes qualifiés pour une utilisation en toute sécurité.

Dans les pays où les conditions de déplacement sont physiquement difficiles, par exemple dans la jungle ou les régions montagneuses (comme en Papouasie-Nouvelle-Guinée ou en Nouvelle-Zélande) ou dans les pays où il faut couvrir de grandes distances (comme en Namibie ou en Inde), il est très utile de disposer d'avions légers ou d'hélicoptères pour transporter les équipes et le matériel. Cela nécessite des budgets récurrents élevés pour couvrir la location commerciale ou les tarifs par vol charter. Le facteur le plus important est la provision des fonds nécessaires pour l'approvisionnement en carburant et le paiement en temps et en heure des indemnités de voyage et de subsistance adéquates. Si les membres du personnel ne sont pas remboursés, ils seront plus réticents à réaliser le travail de terrain ou ne l'approfondiront pas pour revenir plus rapidement au camp de base.

## 5.5 SAUVEGARDE DES DONNÉES HYDROLOGIQUES

### 5.5.1 Définition de la sauvegarde de données

La sauvegarde des données est le processus d'archivage des données à risque pour éviter qu'elles ne soient perdues en raison de la détérioration naturelle des moyens de stockage, des modifications avec le temps des organismes de gestion des données ou des risques naturels. L'objectif est de stocker ces données sous une forme qui permette de les conserver en toute sécurité pour une utilisation future ou un accès facilité. Ce processus peut nécessiter la retranscription électronique des archives papier qui se dégradent avec l'humidité ou les attaques des rongeurs. Cela peut également inclure la récupération d'archives stockées sur des supports ou des technologies obsolètes, le stockage des données dans des logiciels et la numérisation ou la capture d'image de données hydrologiques actuelles et passées sous une forme informatisée compatible pour un accès présent et futur facilité.

Lors d'une réunion portant sur la sauvegarde des données internationales organisée par l'OMM en 2001, la définition suivante de la sauvegarde de données a été convenue :

Un processus continu de préservation de toutes les données risquant d'être perdues en raison de la détérioration du support, et la numérisation des données présentes et passées sous un format informatisé compatible pour un accès facilité.

Cette définition suppose que :

(a) Les données soient stockées sous forme de fichiers images sur un support qui puisse être régulièrement renouvelé pour éviter la

détérioration des informations (par exemple des cartouches, des CD et des DVD) ;

- (b) Les données déjà présentes sur un support sous une forme informatisée compatible soient constamment transférées vers des dispositifs de stockage conformes à l'évolution des technologies ;
- (c) Si nécessaire, les données doivent être exploitées à partir de sources existantes, par exemple les archives papier et les registres annuels, sous une forme qui puisse être utilisée pour des analyses.

### 5.5.2 Problèmes liés à l'archivage des données

Bien souvent, l'archivage des données n'est pas apprécié à sa juste valeur. Dans de nombreux pays, les données ne sont pas bien organisées mais confinées dans des boîtes ou sur des étagères dans des salles obscures, et, par conséquent, exposées à l'humidité, la poussière, la chaleur, les attaques de rongeurs et d'insectes. Lorsqu'il faut faire de la place pour d'autres activités ou que les bureaux déménagent, les données sont bien souvent mises au rebut.

La perte des données hydrologiques parmi les pays membres de l'OMM est un sujet de préoccupation majeur. Ce problème est plus sérieux dans les pays en voie de développement où, en raison de nombreuses contraintes, le budget pour l'archivage des données est généralement limité. Certains efforts ont été réalisés pour soutenir les SHN par le passé via des projets de sauvegarde de données à très petite échelle. Néanmoins, la mise en œuvre de ces projets a révélé que le problème de la perte des données hydrologiques était bien plus grave que prévu.

Les données hydrologiques sont coûteuses à acquérir et à collecter, à la fois en termes d'effort et de ressources. De larges volumes de données sont perdus du fait d'un archivage inapproprié mais également du fait d'une mauvaise maintenance des archives de données. Les problèmes liés à l'archivage des données hydrologiques varient d'un pays à l'autre, mais le dénominateur commun est le stockage des données sur ordinateur et d'autres supports qui sont obsolètes et incompatibles avec l'équipement moderne d'archivage et de traitement des données. Ces supports incluent des cartes perforées et des bandes magnétiques sans aucun appareil permettant de les lire. Certains pays conservent toujours des masses de données sur copies papier, ce qui inclut le risque de les voir perdues, mises au rebut ou détériorées. Avec le temps, la technologie de traitement des données a évolué et s'est modifiée à tel point que des parties considérables de ces données ont été à jamais perdues.

Les pluviomètres à enregistreur graphique et les limnigraphes ont été pendant des années les piliers des systèmes d'observation hydrométéorologiques.

Malheureusement, les archives de données non traitées avaient tendance à s'accumuler sans que les analyses appropriées et les résumés de données ne soient réalisés. Ces archives doivent toujours être traitées alors que la procédure de traitement elle-même a disparu depuis bien longtemps au sein de l'organisation. Ces retards importants dans le traitement des archives de données existent à la fois dans les SMN et les SHN des pays développés et moins développés. Des efforts considérables seront nécessaires pour qu'elles puissent être numérisées et constituer une source de données précieuse et facilement disponible.

### 5.5.3 **Justification de la sauvegarde des données hydrologiques**

La sauvegarde des données est vitale pour la préservation des archives hydrologiques historiques. Les données historiques fournissent la base d'observation pour les décisions scientifiques, techniques et économiques prises dans l'intérêt national. De nombreuses données ont été collectées par le passé, dans certains cas, durant une période d'administration coloniale dans des pays désormais indépendants. Le changement d'administration peut avoir aggravé ce type de problèmes du fait qu'aucun inventaire détaillé n'ait survécu au changement, mais des problèmes similaires existent dans les pays développés lors de changements majeurs au niveau de l'organisation administrative. Une fois perdues, ces données ne peuvent jamais être remplacées, et tous les efforts consentis par les générations précédentes d'hydrologues et de météorologues auront été réduits à néant. À l'heure où le changement climatique est devenu une préoccupation internationale, il est d'autant plus important que des données cohérentes collectées sur de longues périodes soient disponibles, de sorte que des points de référence et des tendances puissent être effectivement établis. Des ensembles de données exhaustifs sont essentiels pour s'assurer que les études sur le changement climatique, la variabilité et les événements extrêmes soient aussi correctes que possible. Pouvoir disposer de ces précieuses données permettra d'apporter un large éventail d'avantages pour la société dans son ensemble. En outre, la perte d'informations descriptives sur les stations (métadonnées) et de données de mesure peut empêcher de réévaluer les courbes de tarage et la qualité des hydrogrammes.

S'agissant de l'étude sur la sauvegarde des données hydrologiques réalisée par l'OMM en 2007, il s'est avéré que les activités passées à cet égard avaient apporté des résultats très limités, et l'étude a reconnu la nécessité de renforcer dans les pays les moyens pour le développement et l'utilisation de systèmes de gestion de données actualisés, y

compris la sauvegarde de données, qui peut être utilisée pour divers objectifs sociétaux.

Voici quelques raisons spécifiques de sauvegarder les données :

- (a) Les modèles de prévision sont plus précis lorsque des séries temporelles plus longues sont utilisées ;
- (b) Les phénomènes hydrologiques extrêmes sont étudiés de façon plus approfondie et plus précise ;
- (c) La conception des projets d'ingénierie, qui reposent essentiellement sur les informations hydrologiques, sont plus fiables lorsque des archives hydrologiques portant sur des périodes de longue durée sont utilisées.

### 5.5.4 **Initiatives passées de l'OMM**

Les activités de l'OMM dans le domaine de la sauvegarde des données ne datent pas d'hier : elles ont débuté en 1979 par le projet de banque de données pour la Région I (Afrique), qui a laissé la place au programme ultérieur de sauvegarde de données parrainé par la Belgique. Le programme financé par l'état belge a permis de porter assistance à 40 états membres africains pour la préservation de leurs données météorologiques via un processus de microfilms et de microfiches, et une copie de ces données est désormais conservée dans chacun de ces pays. En 1988, l'OMM a créé l'enquête archivistique sur l'histoire du climat (ARCHISS) visant à récupérer les données météorologiques disponibles dans les archives nationales de chaque pays.

L'adoption et le développement de ces programmes, d'une manière générale, n'ont, toutefois, pas été pleinement intégrés et de nombreux problèmes demeurent et se sont même aggravés avec le temps. En juin 1999, le Secrétariat de l'OMM a transmis un questionnaire aux conseillers hydrologiques de 39 pays en Afrique. Trente-trois réponses (59 pour cent) ont été reçues. Sur la base des réponses reçues, il est clairement ressorti que 82 pour cent utilisent le papier pour archiver leurs données et ils ont demandé à l'OMM de les aider pour la sauvegarde de ces données. Suite à cette enquête, un projet pilote visant à sauvegarder les données hydrologiques a été lancé dans six pays anglophones (l'Égypte, la Gambie, le Ghana, le Kenya et la République unie de Tanzanie) et cinq pays francophones (le Tchad, le Congo, le Niger, le Rwanda et le Togo). Dans le cadre de ces projets, chaque pays a reçu un ordinateur, une imprimante, un scanner et un ensemble de logiciels pour le traitement et la gestion des données (Hydata pour les pays anglophones et Hydrom pour les pays francophones). Plus de 80 personnels nationaux ont reçu une formation lors d'ateliers de 10 jours sur les applications des logiciels appropriés pour la gestion de données, dans le but de sécuriser les

données sous format électronique, en plus du format papier.

Dans le prolongement de cette initiative, une enquête sur les besoins en matière de sauvegarde des données hydrologiques a été réalisée par l'OMM fin 2007. 57 pays de différentes régions y ont participé. Une analyse complète des réponses à cette enquête doit être publiée prochainement. Les résultats préliminaires laissent apparaître que les activités passées ont produit des résultats limités et qu'il est encore nécessaire de renforcer les moyens pour le développement et l'utilisation de systèmes de gestion de données actualisés.

### 5.5.5 **Sauvegarde des données et numérisation**

Les données hydrologiques doivent être considérées comme des atouts significatifs d'une grande valeur stratégique. Il est impératif de convertir les archives physiques ou manuelles comme le texte et les images (microfiches) sous une forme numérique utilisable. Les informations doivent être stockées sur des supports qui garantissent un stockage sécurisé et une récupération de données rapide. Il existe différents matériaux de base utilisés pour la numérisation, et ceux-ci sont brièvement présentés dans les points suivants :

#### Document papier :

Dans de nombreux cas, les registres d'observation ou autres registres sont utilisés directement comme source de saisie des données. Il peut s'agir d'observations manuscrites, de tableaux avec des données imprimées, ou d'enregistreurs à ruban avec des informations graphiques. Le type de matériau sur papier détermine, dans une large mesure, la méthode de numérisation. Il existe un certain nombre de problèmes concernant la numérisation des données hydrologiques à partir des registres originaux. Parmi ces problèmes, citons :

- (a) Des données illisibles en raison de la détérioration du matériau ou de la superposition de texte ;
- (b) Des heures d'observation irrégulières ;
- (c) Des mesures prises à l'aide d'instruments anciens ou obsolètes ;
- (d) Des mesures prises en unités historiques nécessitant une conversion en unités SI.

De nombreuses archives historiques très précieuses sont contenues dans les rapports annuels publiés par les ministères ou les archives météorologiques dont la publication a cessé avec l'avènement des archives informatiques. Très peu a été fait pour numériser ces très nombreuses archives, d'où une rupture de la continuité et de la facilité d'accès. Par conséquent, ces archives qui, dans de nombreux cas, ont une durée de vie plus longue que la base de

données numérique qui les a remplacés, sont ignorées une fois que les membres de personnel ayant les compétences nécessaires pour utiliser ces sources antérieures à l'ère numérique ont pris leur retraite. La tâche de numérisation de ces très nombreuses archives historiques à partir de registres peut constituer un défi majeur, notamment du fait que, pour être utilisables, ces archives doivent être fusionnées avec la structure existante de la base de données. La simple préservation des anciennes archives sous format scanné n'est pas satisfaisante, car ces données ne peuvent être manipulées de la même façon qu'une base de données numérique.

Les données hydrologiques historiques sur papier sont parfois stockées sous forme de film (microfiche) lorsque les autorités ont besoin de ces informations à titre d'archives. La qualité des images sur les films est généralement excellente, notamment si du matériel de haute qualité comme le film polyacétate a été utilisé. Le film est un support idéal pour préserver les données provenant de graphiques pour une numérisation ultérieure, ou pour des cartes, des plans et des diagrammes, par exemple des stations de jaugeage et des cartes de l'étendue des inondations.

#### Images numériques :

Les images numériques des données remplacent désormais généralement l'utilisation du film. Elles sont obtenues en scannant ou en photographiant numériquement les documents papier. Les données sous forme d'images numériques doivent encore être entrées en référençant les données dans la base de données opérationnelle. Certains systèmes logiciels permettent l'affichage d'images numériques en parallèle de la base de données utilisateur sur le même écran d'ordinateur, ce qui permet de faciliter la saisie des données (par rapport à une source papier). Néanmoins, la retranscription implique toujours un risque d'erreur. Il convient donc de procéder à une vérification rigoureuse.

#### Stockage sécurisé :

Dans certains cas, une étape préliminaire pour la sauvegarde des données est de transférer les données situées dans un environnement défavorable vers un lieu de stockage plus sécurisé. Les archives de données doivent être collectées, organisées suivant un certain type de système par indexation ou catalogage et stockées sous atmosphère contrôlée ou dans des conteneurs hermétiques pour les protéger d'une détérioration supplémentaire. Cette méthode de stockage de données peut être utilisée dans le cas de ressources financières limitées et conservera les données sources en sécurité jusqu'au moment où les installations et les structures nécessaires permettront un traitement complet.

### 5.5.6 **Priorités pour la sauvegarde de données**

À l'échelon planétaire, il existe des quantités très importantes d'anciennes archives de données et de données non traitées, ainsi que des données verrouillées dans des systèmes informatiques redondants. Il peut être nécessaire d'établir des priorités au niveau du processus de numérisation comme suit :

- (a) Priorité des données :
  - (i) Données actuelles de haute qualité et d'importance nationale, régionale ou mondiale qui améliorent ou complètent les bases de données établies actuelles ;
  - (ii) Données historiques de haute qualité et d'importance nationale, régionale ou mondiale qui risquent d'être perdues et sont précieuses pour la fourniture de données pour une meilleure analyse statistique, conceptuelle et tendancielle, ou pour étoffer des bases de données établies.
- (b) Priorité des activités :
  - (i) Convertir les données sous format informatisé compatible (formats numérique et image) ;
  - (ii) Établir et maintenir des bases de données de secours dans différents lieux qui ne sont pas susceptibles d'être exposés aux mêmes risques de pertes ou de dégâts ; cela peut être réalisé au niveau national ou régional.

Un exemple récent de numérisation d'archives pluviométriques imposantes au Royaume-Uni fournit une illustration de la complexité et de la minutie inhérentes à ces tâches. La publication *British Rainfall* a été émise sous forme de livre annuel des années

1860 jusqu'à 1968. Elle comportait toutes les données et statistiques validées pour toutes les stations pluviométriques du Royaume-Uni (y compris la totalité de l'Irlande jusqu'à 1930). Cette source d'information a été souvent mise de côté en raison de son manque d'accessibilité par des moyens électroniques. Le Natural Environment Research Council du Royaume-Uni a fourni des fonds pour qu'une entreprise numérise les données et les rende disponibles sur le Site Internet prévu à cet effet par le British Atmospheric Data Centre (BADC : <http://badc.nerc.ac.uk/>).

Les archives imprimées ont été divisées en trois parties : données, chroniques et chiffres pluviométriques. Les données (informations mensuelles, quotidiennes et parfois plusieurs fois par jour) ont été saisies dans un fichier Excel pour chaque année avec des champs pour les jour, mois, année, station de jaugeage, comté ou division et profondeur en pouces et en millimètres. Les chroniques ont été soit scannées avec un logiciel de reconnaissance de texte ou saisies, en fonction de la qualité de l'original, et sauvegardées dans un document Word pour chaque année. Les Figures sous forme de photos ou les cartes de pluviométrie ont été scannées et sauvegardées dans des fichiers jpeg sous un dossier séparé pour chaque année.

Le projet a nécessité un coordinateur de projet, deux agents de supervision et une équipe de neuf opérateurs (la plupart des étudiants travaillant à temps partiel). Il a pris deux ans pour être achevé. Un niveau élevé de contrôles a été mis en place à la fois pour les données et le texte et on a estimé le coût total du projet à environ 40 000 £.

# TRANSMISSION ET GESTION DES DONNÉES EN TEMPS RÉEL

## 6.1 TRANSMISSION DE DONNÉES

### 6.1.1 Exigences de base

Un système de prévision et d'annonce des crues doit fonctionner en temps réel, c'est-à-dire que les données utilisées proviennent d'observations actuelles ou très récentes. Un Système de transmission de données hydrométriques (STDH) est donc nécessaire afin de transmettre les données mesurées depuis des stations de télémesure vers un centre de réception pour un traitement et une exploitation ultérieurs. Les sections suivantes décrivent les spécifications génériques d'un STDH et les performances fonctionnelles que doit fournir un tel système. Il ne décrit pas les spécifications de l'équipement et des unités composant un STDH.

Le STDH doit être conçu avec une compréhension approfondie de la nécessité et de l'importance d'un service de prévision et d'annonce des crues pour les bassins hydrologiques sur lesquels le système doit être utilisé, en prenant les éléments suivants en considération :

- (a) La fonctionnalité ;
- (b) Les contraintes géographiques et physiques ;
- (c) Les pas de temps pour l'acquisition des données et la diffusion des résultats ;
- (d) Les conditions d'installation ;
- (e) La fiabilité et la maintenance ;
- (f) La sécurité des opérateurs et du public ;
- (g) Le facteur économique.

Les spécifications finales du système doivent être déterminées via un processus de collaboration entre les spécialistes techniques dans les domaines de l'hydrologie, de la gestion des données et des télécommunications. Le concept d'un STDH est illustré en Figure 6.1.

Le STDH est composé de stations de télémesure et d'un centre de réception. Les stations de télémesure sont installées sur des sites hydrométriques et le centre de réception est installé à l'endroit où les données hydrométriques sont utilisées pour élaborer les informations de prévision des crues. Une station de télémesure comprend un équipement de surveillance et de communication par télémesure doté d'un dispositif d'alimentation spécifique. L'équipement de télémesure est relié aux capteurs qui mesurent les données hydrométriques. L'équipement communique avec le centre de réception conformément à un ordre d'acquisition des données prédéfini.

Les stations de télémesure sont reliées à la station de réception par un système de communication, qui peut utiliser un large éventail de moyens de communication. La station de réception comprend, en fait, des équipements de communication et de surveillance, reliés à une installation d'exploitation et de commande. Cette installation possède un certain nombre de fonctions, y compris la collecte de données hydrométriques issues des stations de télémesure dans un ordre de collecte prédéterminé, le traitement des données, ainsi que l'affichage, l'impression et l'enregistrement des données. Le traitement et l'archivage des informations peuvent faire partie intégrante du système.

Le STDH doit être conçu pour avoir une performance économique optimale en termes de fonctions requises et de fiabilité par rapport aux coûts d'investissement et aux frais récurrents. Le budget du système doit être évalué en considérant la période temporelle complète durant laquelle il est conçu pour fonctionner et doit inclure les frais initiaux, les frais de fonctionnement, les frais de maintenance et de pièces de rechange, ainsi qu'une partie d'équipement complet de remplacements pour les pannes prévisibles et les dégâts sérieux. Les estimations de frais pour le STDH doivent prévoir les mises à jour ou expansions ultérieures.

Le STDH doit réaliser à la fois des mesures et du traitement de données. Les exigences en matière d'acquisition d'observations et de mesure de données doivent reposer sur des objectifs opérationnels. La liste habituelle de types de données s'établit comme suit :

- (a) Type de donnée et nombre de points de mesure ;
- (b) Plage de mesures, chiffres significatifs, précision de mesure et résolution ;
- (c) Pas de temps des mesures ;
- (d) Interfaces d'entrée ;
- (e) Valeurs seuils pour les alarmes ;
- (f) Rapports sur l'état de fonctionnement des stations périphériques.

Les résultats des données mesurées peuvent être transmis sous forme de données brutes sans traitement préalable. Toutefois, les données sont généralement pré-traitées pour traduire le signal fourni par le capteur. Dans certains cas, il peut être utile de réaliser des manipulations de données (par exemple pour calculer la moyenne glissante, ou bien les valeurs maximum et minimum des données mesurées à différentes échéances) aux stations de télémesure et pour transmettre les résultats calculés.

La majeure partie du traitement des données est normalement réalisé au centre de réception (le centre de commande opérationnel) pour préparer les données sous un format approprié pour à leur utilisation par les modèles.

Le STDH aura pour mission de stocker les données et les informations sur le système. Le stockage des données dans le STDH doit avoir les fonctions suivantes :

- (a) La mise en mémoire tampon des données mesurées jusqu'à ce qu'elles puissent être transmises à un système de traitement des informations ; ceci peut être effectué au niveau de chaque station distante individuelle ou du centre de réception ;

- (b) Le prétraitement des données brutes en valeurs temporellement ou spatialement intégrées, ou en valeurs estimées, par exemple l'évapotranspiration à partir de diverses variables climatiques ;
- (c) La génération des informations en temps réel en combinant des données à différentes échéances ;
- (d) Le stockage temporaire des informations en temps réel nécessaires pour la prise de décisions.

Les informations qui seront stockées pendant longtemps et seront utilisées pour fournir des normes ou des statistiques de référence (moyennes, extrêmes, plage) doivent être stockées dans une base de données dans un système de traitement des informations distinct du STDH, mais accessible dans le cadre du processus opérationnel global.

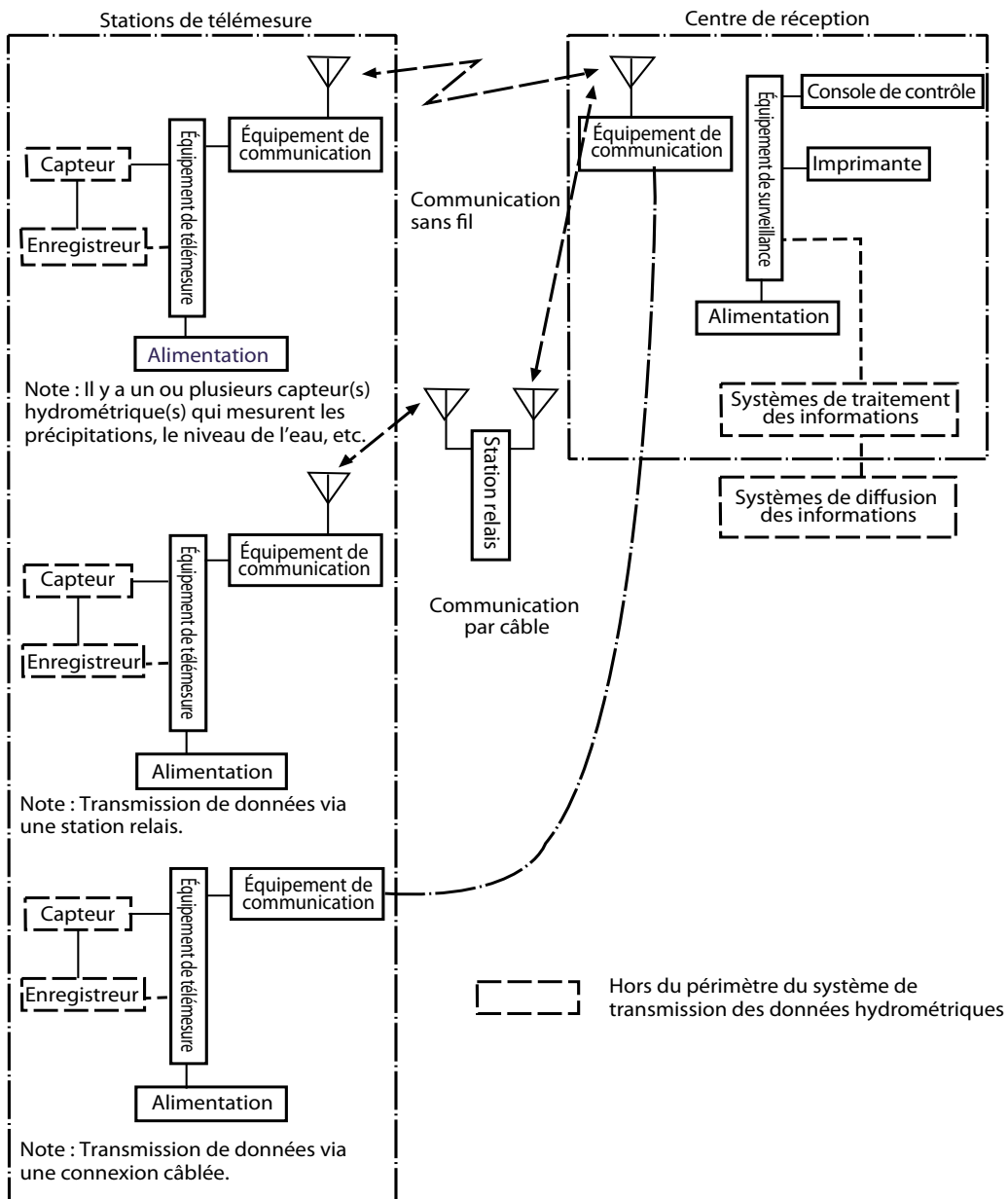


Figure 6.1. Configuration conceptuelle d'un STDH



### 6.1.2 **Choix des moyens de transmission**

Un certain nombre de choix sont disponibles concernant les moyens de transmission de données (télémessure), y compris les lignes câblées, les lignes radio, les lignes de télécommunication publiques, les réseaux de téléphonie mobile et les liaisons de communication par satellite. Le type de liaison et de méthode de communication sélectionné doit être décidé en prenant les points suivants en considération :

- (a) Les moyens de communication généralement disponibles dans un pays ou une région ;
- (b) La quantité d'informations à transmettre ;
- (c) Les exigences opérationnelles en termes de délais entre le terrain et le centre de réception, ainsi que la vitesse de transmission et la fiabilité ;
- (d) Les facteurs économiques et les frais liés au système.

Les caractéristiques, avantages et désavantages principaux des différentes méthodes de communication sont décrits dans les paragraphes suivants.

#### Lignes téléphoniques fixes

Les lignes téléphoniques donnent accès au réseau téléphonique commuté par impulsion ou signalisation multifréquence. Les frais sont généralement basés sur un tarif lié au temps de communication, bien que, dans certaines régions, les prestataires de services obtiennent un tarif forfaitaire, qui peut être négocié avec l'opérateur concerné. Des lignes analogiques et numériques peuvent être disponibles. Les normes de transmission se conformeront aux normes internationales ou nationales, la qualité des communications étant garantie.

La vitesse de transmission sur une ligne analogique utilisant des modems de communication est supérieure à 50 kilobits par seconde (kbps) si la ligne est de bonne qualité. La vitesse de transmission pour une ligne numérique utilisant des modems de communication est généralement supérieure à 100 kbps. Le trafic sur les lignes peut augmenter de façon considérable durant les heures de pointe, par exemple durant un événement de crue majeur, et des problèmes de retard et d'interruption peuvent se produire en raison de la congestion.

#### Liaisons téléphoniques mobiles

Les liaisons de téléphonie mobile fournissent un réseau téléphonique mobile commuté avec signalisation multifréquence. Pour les communications de données, les frais peuvent ne pas dépendre du

temps de communication, mais de la quantité de données (c'est-à-dire du nombre de paquets). Il existe des exemples de tarifs fixes mais avec une limitation concernant les communications de données. Les systèmes analogiques et numériques sont tous deux disponibles, bien que le système analogique soit classifié comme étant de première génération et soit généralement peu adapté aux communications de données. Le système numérique de seconde génération permet des communications de données d'au moins 9 600 bits par seconde (bps). Les générations 2.5 et 3 des communications mobiles permettent des communications de données à grande vitesse de plusieurs centaines de kbps. Les niveaux des spécifications se conformeront généralement aux normes internationales ou nationales, la qualité des communications étant garantie.

Les services de téléphonie mobile utilisent des stations relais sans fil terrestres et par satellites. Ces derniers services utilisent un système à commutation, y compris ceux qui adoptent un système de tarification par paquets ou un coût forfaitaire. Comme cela est le cas pour les services de téléphonie conventionnels, le trafic sur les lignes peut augmenter de façon considérable aux heures de pointe et des problèmes de communication peuvent en résulter. Les services de téléphonie mobile peuvent également utiliser le service de message court (SMS) pour la transmission et la réception de mots et de caractères entre les nœuds d'un réseau.

#### Lignes dédiées louées aux opérateurs publics

Les lignes louées aux opérateurs publics fournissent un service de ligne dédié à un utilisateur ou un groupe d'utilisateurs spécifiques. Le tarif est généralement déterminé après négociation avec le fournisseur de service, et, à l'instar des téléphones publics, les lignes peuvent prendre en charge des signaux analogiques et numériques. Généralement, les performances de transmission se conforment aux normes internationales ou nationales, la qualité des communications étant garantie.

La vitesse de transmission sur une ligne analogique utilisant des modems de communication est supérieure à 50 kilobits par seconde (kbps) si la ligne est de bonne qualité. La vitesse de transmission sur une ligne numérique peut être de 50 kbps ou supérieure. Certains fournisseurs peuvent proposer des services haute densité haute vitesse pouvant aller jusqu'à plusieurs centaines de megabits par seconde (Mbps). Étant donné que les lignes utilisant ce type d'accord sont réservées à un usage exclusif, il ne devrait pas y avoir de problèmes de congestion occasionnés par l'augmentation du trafic.

### Connexion Internet

Un service via Internet de ligne haut débit en connexion permanente est disponible pour un usage exclusif de transmission de données. Suivant les voies de transmission à utiliser, ces services peuvent être fournis par des câbles à fibre optique, des lignes d'abonnés numériques (DSL) et la télévision câblée (CATV). Les lignes sont constamment connectées et le coût est généralement fixe. Le protocole de communication disponible est limité au protocole Internet (IP). La qualité de la connexion Internet est basée sur le meilleur effort possible du fournisseur d'accès Internet (FAI/ISP), et il peut y avoir des problèmes de congestion aux heures de pointe. Une autre source de problèmes peut résulter d'une défaillance momentanée du FAI, ou d'une panne au niveau de ses installations sur laquelle l'utilisateur final n'a aucune prise.

### Lignes privées

Dans cette situation, des lignes peuvent être installées et opérées par les utilisateurs eux-mêmes, au même titre que la signalisation ferroviaire ou les services d'urgence. L'investissement initial peut être élevé, mais les coûts de fonctionnement sont très faibles. Divers moyens de transmission sont disponibles, notamment les câbles pairs torsadés en cuivre, les câbles coaxiaux et les câbles à fibre optique. Il existe divers types d'équipements terminaux disponibles, des simples modems de communication aux équipements terminaux de multiplexage. Il est possible de sélectionner une gamme appropriée de vitesses de communication allant de plusieurs dizaines de bps à plusieurs gigabits par seconde (Gbps) en associant le moyen de communication mentionné à l'équipement terminal de ligne. La qualité des performances des liaisons privées incombe aux utilisateurs eux-mêmes, et il convient donc de faire appel à du personnel interne qualifié et à des ressources logistiques pour en gérer le fonctionnement, notamment lorsque le système est sous pression durant les périodes critiques.

### Liaisons de communication radio très haute fréquence et ultra haute fréquence (THF et UHF)

L'utilisation efficace de ces fréquences est disponible à l'échelon mondial, sous le contrôle de l'Union internationale des télécommunications (UIT). Les gammes de fréquences sont spécifiées internationalement comme suit :

THF : 30 à 300 mégahertz (MHz) ;  
UHF : 300 à 3 000 MHz.

Les gammes de fréquences attribuées sont différentes d'un pays à l'autre. Le nombre de fréquences centrales (le nombre de canaux) qui peuvent être

utilisées dans une région ou un pays est généralement limité, avec une fréquence centrale (un canal) utilisée conjointement par un certain nombre de stations de télémesure. Afin d'éviter les interférences, les systèmes contigus ne peuvent adopter le même groupe de fréquences et la fréquence sélectionnée pour les communications doit se conformer aux réglementations et lois locales. Les interférences et les pertes de signal ne peuvent être évitées, mais les risques de perturbations peuvent être minimisés par une attribution de fréquences rigoureuse. Les THF et UHF peuvent prendre en charge les systèmes analogiques et numériques.

L'équipement de communication radio contrôle la vitesse et la capacité de transmission et de réception des signaux. La vitesse de transmission est généralement comprise entre 200 et 1 200 bps pour un système analogique utilisé pour des communications vocales en utilisant la modulation par déplacement de fréquence (MDF, frequency shift keying – FSK). La vitesse de transmission pour un système numérique ou analogique utilisant un modulateur à manipulation de décalage minimum (MSK – minimum shift keying) ou à manipulation de décalage minimum gaussien (GMSK – Gaussian minimum shift keying) est généralement de 1 200 à 9 600 bps.

### Liaisons de communications radio par multiplexage

L'utilisation des fréquences pour ces systèmes est disponible à l'échelon mondial, sous le contrôle de l'UIT. La gamme de fréquences disponibles varie de UHF aux supra hautes fréquences (SHF : 300 MHz à 30 gigahertz (GHz)). La gamme de fréquences attribuées varie d'un pays à l'autre. Ces liaisons sont utilisées pour les communications téléphoniques multi-canal et les communications de données haute vitesse; elles peuvent prendre en charge les signaux analogiques et numériques. Si les liaisons ne passent pas par des centraux téléphoniques, les communications sont toujours connectées.

Dans le cas où des liaisons de communication radio exclusives sont utilisées, les fréquences de fonctionnement et les puissances de sortie sont stipulées par les normes internationales et les réglementations nationales. Les communications radio peuvent passer sur des distances de plusieurs dizaines de kilomètres. Des stations relais peuvent être nécessaires pour de plus longues distances ou des zones vallonnées. Alors que la qualité des communications radio dépend des conditions extérieures, des tests de propagation doivent être réalisés après la conception des liaisons de communication.

### Réseaux de communication par satellite

La station terminale à antenne à petite ouverture (VSAT) et l'International Maritime Satellite Organization (INMARSAT) (Système international de satellites maritimes) sont des structures de communication par satellite habituellement utilisées pour les transmissions de données. Il existe aussi d'autres moyens de communication par satellite disponibles auprès de services internes de pays individuels, par exemple les satellites de communications nationaux. Les circuits numériques via VSAT peuvent également permettre de transmettre des données vocales. La vitesse de transmission via VSAT varie en fonction de la catégorie de service, mais est, quoi qu'il arrive, supérieure à 9 600 bps. La vitesse de transmissions via INMARSAT varie aussi en fonction de la catégorie de service, mais est, quoi qu'il arrive, supérieure à 200 bps. Des problèmes peuvent survenir durant les fortes pluies qui peuvent atténuer les signaux de transmission et provoquer des interruptions de communication.

Étant donné que les stations de télémétrie sont situées à des points d'observation hydrométriques sélectionnés, elles sont donc réparties sur une vaste zone géographique. Les stations de télémétrie à distance ne peuvent pas toujours être localisées sur des sites hydrologiques optimaux. Par conséquent, en fonction du moyen de communication, il peut être nécessaire de prévoir des stations relais ou de transfert dans le système. Ces contraintes géographiques doivent être considérées non seulement lors de la conception du réseau mais également dans le cadre d'éventuels plans d'extension.

La localisation des stations de télémétrie est déterminée en considérant les distances avec le centre de réception et la topographie des sites choisis pour les stations distantes. La disponibilité des lignes de communication et des liaisons radio existantes, les conditions de propagation (si des liaisons radio sont choisies), les facilités d'approvisionnement en terme d'alimentation électrique et les routes d'accès doivent également être considérés comme des facteurs importants pour la détermination des emplacements. Voici quelques exemples des conditions requises pour l'installation des équipements de communication radio lorsque des liaisons de communication radio THF et UHF sont utilisées :

- (a) Le degré d'interférence d'une station radio à une autre doit être suffisamment faible pour ne pas remettre en cause la fiabilité des communications ;
- (b) Si deux antennes ou plus doivent être installées les unes à proximité des autres sur le même site, le degré d'interférence mutuel doit être faible, pour ne pas faire obstacle

aux communications ; si les interférences sont inévitables, cela peut être minimisé, par exemple, en augmentant la distance entre les antennes ou en insérant des filtres ;

- (c) Les stations de communication radio pour la transmission point-à-point doivent être situées sur des reliefs aussi faibles que possible sur la base d'une évaluation exhaustive des chemins radioélectriques, des liaisons de communication, des profils de terrain et des conditions de localisations ; elles ne doivent jamais être situées sur des points hauts, comme les sommets de montagnes, à l'exception des stations relais ;
- (d) Les composants de l'équipement et la conception des liaisons radio doivent être appropriés en termes de fréquence, de méthode de transmission, de trajets radioélectriques et de profils de terrain ;
- (e) Le choix de la hauteur du mât d'antenne doit s'appuyer sur les résultats des tests de propagation.

#### 6.1.3 Méthodes et fréquence d'interrogation

Un diagramme plus détaillé de la fonctionnalité d'un STDH est illustré en Figure 6.2. Pour un système de prévision et d'annonce des crues, un STDH est normalement utilisé en temps réel. Le STDH horodatera toutes les observations de données, mais il y aura toujours un délai entre la fourniture des données et leur traitement. Généralement, les capteurs des stations de télémétrie mesurent des variables hydrologiques en continu ou à des intervalles rapprochés, par exemple toutes les 10 minutes pour le niveau d'eau. Le centre de réception décode les données et effectue la vérification et le traitement. Un système de traitement des informations prévu à ce stade convertira les données en séries temporelles adaptées, par exemple une série de données au pas de temps horaire. Par conséquent, ces caractéristiques temporelles ainsi que leur marge d'erreurs acceptable doivent être déterminées à des fins opérationnelles. Il existe un certain nombre de méthodes différentes pour transmettre les données à partir des sites distants, telles que décrites dans les paragraphes suivants :

- (a) Collecte par cycle : Celui-ci est utilisé lorsqu'un certain nombre de stations de télémétrie peuvent utiliser conjointement la même ligne de transmission ou bande de fréquences. Les stations distantes sont collectées les unes après les autres et, après la collecte de la dernière station de télémétrie du groupe, la première station est à nouveau appelée, rendant ainsi la collecte cyclique, tel qu'illustré en Figure 6.3. En général, le système complet doit être interrogé à des intervalles basés sur la fréquence

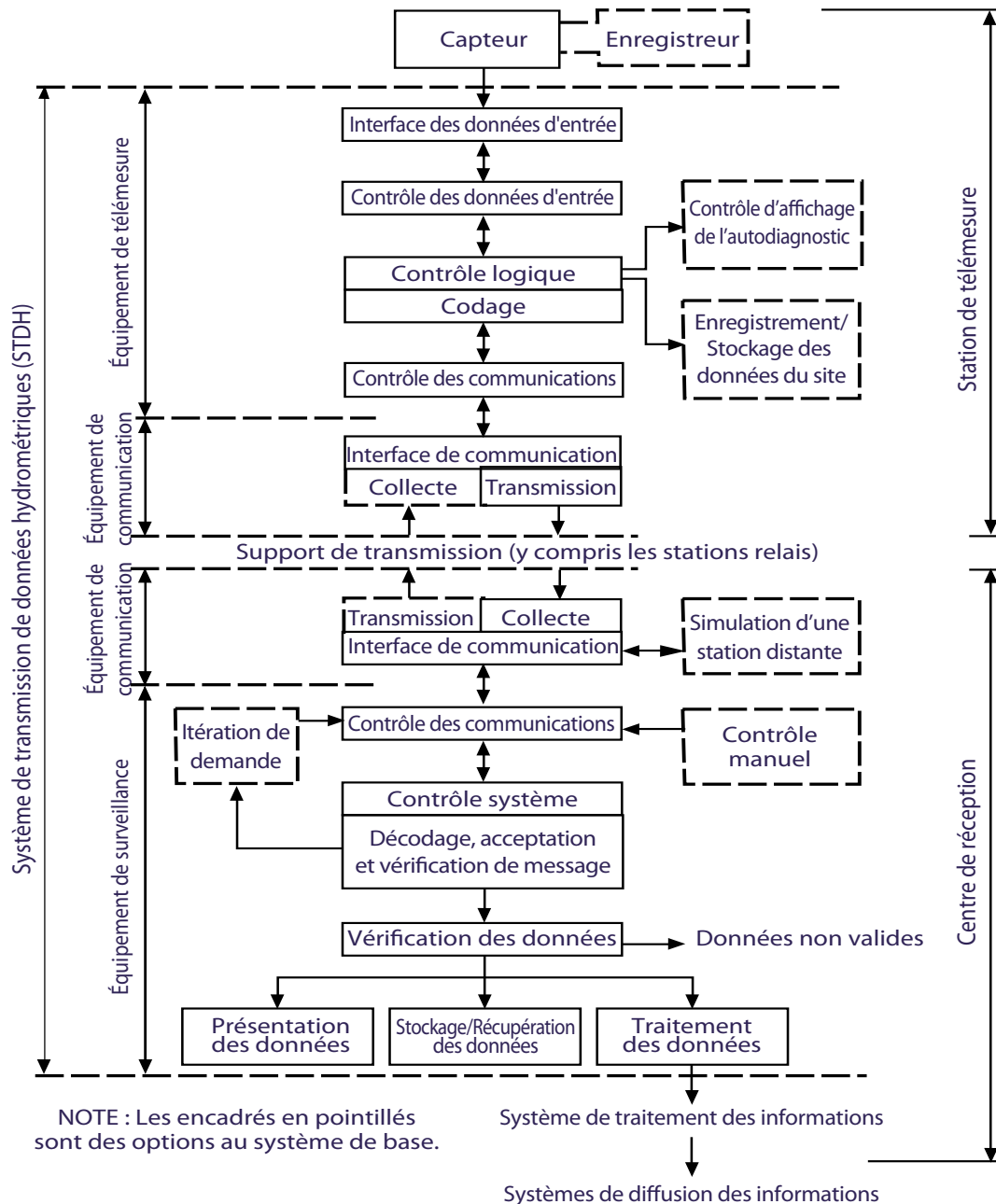


Figure 6.2. Diagramme fonctionnel d'un STDH

la plus élevée, mais le système peut également être divisé en plusieurs groupes suivant le niveau de demande par intervalles, chacun étant alors collecté cycliquement de façon indépendante.

- (b) Collecte à la demande : Il s'agit d'une variante de la collecte par cycle pour laquelle un intervalle de temps a été défini, par exemple une heure, entre des cycles de collecte distincts (voir Figure 6.4). Cette méthode est appropriée pour les systèmes qui utilisent un moyen de communication basé sur une tarification au temps passé, par exemple les lignes téléphoniques. Elle est également efficace pour les stations de télémétrie qui doivent minimiser leur consommation d'énergie, notamment celles qui utilisent des batteries. Cette méthode

peut être moins adaptée si de nombreuses stations de télémétrie doivent être interrogées.

- (c) Requête par lots et réception séquentielle : Il s'agit d'une méthode améliorée qui combine la collecte à la demande avec la réception par lots (voir point (e) ci-après). Ce système est illustré sur le diagramme de la Figure 6.5 et possède les caractéristiques suivantes :
- (i) Le centre de réception interroge toutes les stations de télémétrie à intervalle fixe, de la même façon que pour la collecte à la demande ;
  - (ii) Chaque station de télémétrie effectue des relevés lorsqu'elle est appelée, et stocke les données dans sa mémoire locale ;
  - (iii) Chaque station de télémétrie transmet les données mesurées au centre de

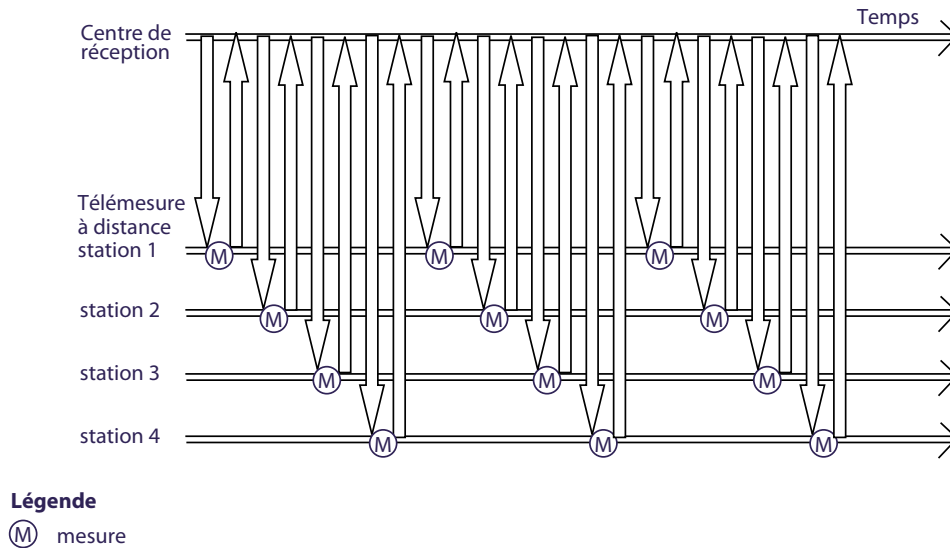


Figure 6.3. Diagramme de collecte par cycle

réception après un temps d'attente spécifié ; le temps d'attente doit être spécifié avec une constante de temps différente pour chaque station pour éviter tout blocage.

Comme mentionné précédemment, la collecte à la demande présente le désavantage d'être susceptible d'utiliser des temps de mesure différents pour des stations individuelles. La méthode de réception par lots (voir le point (e) ci-après) nécessite, toutefois, l'utilisation d'une horloge de haute précision à chaque station. La méthode de requête par lots et de réception séquentielle consiste à réaliser des relevés pour toutes les stations à une heure déterminée lorsque le centre de réception appelle simultanément toutes les stations. Par conséquent, le temps de mesure est

le même pour toutes les stations, et un minutage précis à chaque station n'est pas nécessaire.

(d) Transmission en continu : Elle peut être effectuée lorsqu'une station de télémétrie possède l'usage exclusif d'une ligne de communication entre la station et le centre de réception. Cette méthode permet à la station de télémétrie de transmettre de façon continue et séquentielle les données mesurées au centre de réception, équivalent en fait à une séquence de transferts séparés par un intervalle de temps minimal. Le centre de réception, ayant accès à toutes les données, peut alors jouir d'un degré considérable de liberté dans la détermination de l'intervalle d'échantillonnage des données ou dans la réalisation d'un traitement préalable des données.

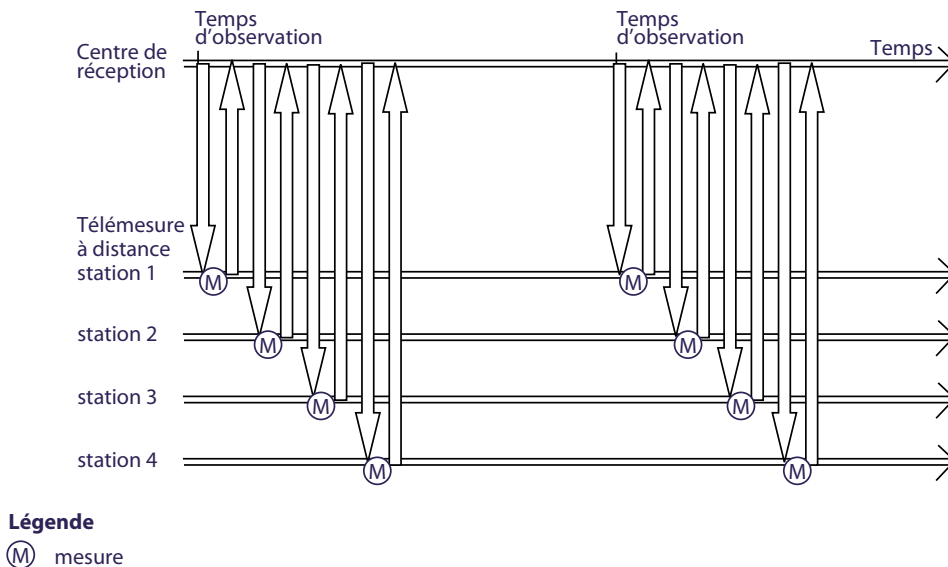


Figure 6.4. Diagramme de collecte à la demande

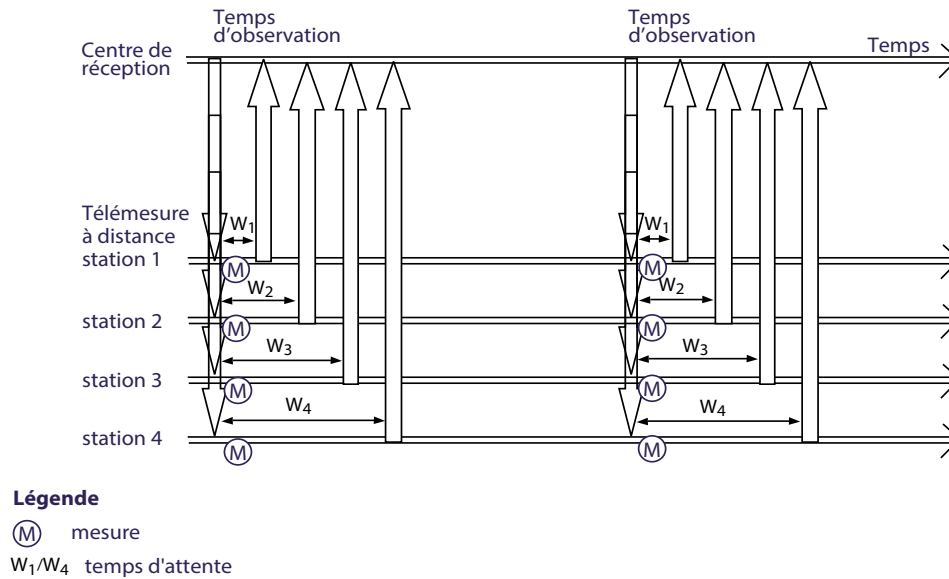


Figure 6.5. Diagramme de la méthode de requête par lots et de réception séquentielle

- (e) Réception par lots : Il s'agit d'une méthode suivant laquelle les données sont stockées sur plusieurs stations de télémétrie pendant un certain temps puis transmises sous forme de lot de données au centre de réception (voir Figure 6.6). La transmission des données s'effectue par appel depuis le centre de réception ou par une fonction de signalisation automatique au sein d'une fonctionnalité de la station de télémétrie. Cette méthode est efficace pour les systèmes de télémétrie qui ne peuvent pas maintenir leurs communications pendant certaines périodes, comme cela est le cas pour la transmission par satellites en orbite polaire. Puisque la méthode implique la prise de mesures de façon indépendante à chaque station de télémétrie, une horloge de haute précision est nécessaire à chaque station pour réaliser des mesures horodatées et des transmissions synchronisées. Chaque station de mesure doit être équipée d'un dispositif de stockage pour conserver les données mesurées avant transmission. Ce système n'est viable que pour les bassins hydrographiques majeurs, où le temps de parcours de l'onde de crue est de l'ordre de plusieurs jours plutôt que de plusieurs heures.
- (f) Réception par événements : Il s'agit d'une méthode impliquant la transmission automatique de données par des stations de télémétrie individuelles au centre de réception, lorsque les sondes des stations détectent un niveau de précipitations ou d'eau dépassant un seuil fixé supérieur (ou inférieur) (voir Figure 6.7). Dans les faits, cette méthode permet au centre de réception de servir d'alerte automatique, avec détection immédiate en cas d'événements critiques. Toutefois, lorsque les données ne sont pas

transmises au centre de réception pendant une longue période, il est difficile de déterminer s'il n'y a pas d'événement ou s'il existe un problème du système. Par conséquent, cette méthode doit être combinée avec un dispositif destiné à transmettre automatiquement un signal de contrôle à intervalles réguliers pour établir que la station et la liaison de transmission fonctionnent encore.

#### 6.1.4 Fiabilité

Les conditions environnementales aux stations de télémétrie peuvent être très difficiles, notamment dans les zones tropicales, désertiques et montagneuses. Il convient d'être particulièrement attentif lors de l'utilisation de l'équipement dans des conditions pour lesquelles il n'a pas été conçu. Ainsi, les conditions suivantes doivent être considérées :

- La plage de température atmosphérique et la fréquence de variabilité ;
- La plage d'humidité atmosphérique relative ;
- La vitesse du vent ;
- La salinité et la poussière atmosphériques ;
- Les conditions environnementales à l'intérieur des boîtiers d'équipement ;
- Les conditions d'alimentation électrique disponibles (y compris la protection contre les décharges en cas d'éclair) ;
- Le risque de dégâts par les crues et l'accessibilité en cas d'inondations ;
- La résistance anti-sismique.

La plupart des équipements inclura des informations sur les recommandations du fabricant concernant les plages de fonctionnement, et celles-ci doivent être soigneusement vérifiées en fonction

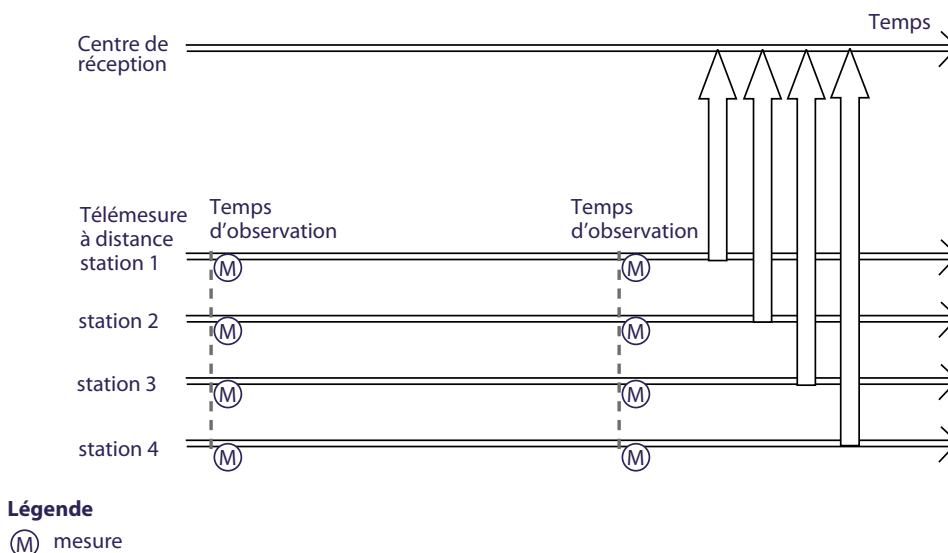


Figure 6.6. Diagramme de la méthode de réception par lots

des conditions de terrain prévues. Les fabricants doivent également fournir des informations sur la résistance du boîtier à la poussière, à l'humidité et à la salinité. Les conditions environnementales au sein du centre de réception doivent aussi entrer en ligne de compte, car la climatisation et un contrôle accru de la poussière et de l'humidité peuvent être nécessaires. Les autres détails devant être pris en compte sont les suivants :

- (a) La taille du site d'installation des instruments et de l'équipement de transmission doit répondre aux exigences liées à leur fonctionnement ;
- (b) Les conditions générales pour l'utilisation du site doivent être formalisées, ce qui peut nécessiter la permission du propriétaire, des contrats de location ou l'acquisition du terrain ; la durée

nécessaire pour conclure les accords juridiques ne doit pas être sous-estimée ;

- (c) Les conditions météorologiques sur site doivent être représentatives des régions avoisinantes, par exemple les sites ne doivent pas être trop abrités ou trop exposés et, par conséquent, avoir leur propre microclimat ;
- (d) Les sites doivent être sécurisés contre les crues et les glissements de terrain ;
- (e) Lorsque des batteries solaires ou des éoliennes sont utilisées, les conditions courantes (annuelles et saisonnières) doivent être suffisantes pour satisfaire les besoins de fonctionnement ;
- (f) Les caractéristiques des obstacles situés à proximité, comme les arbres, les bâtiments et la configuration du terrain, ne doivent pas

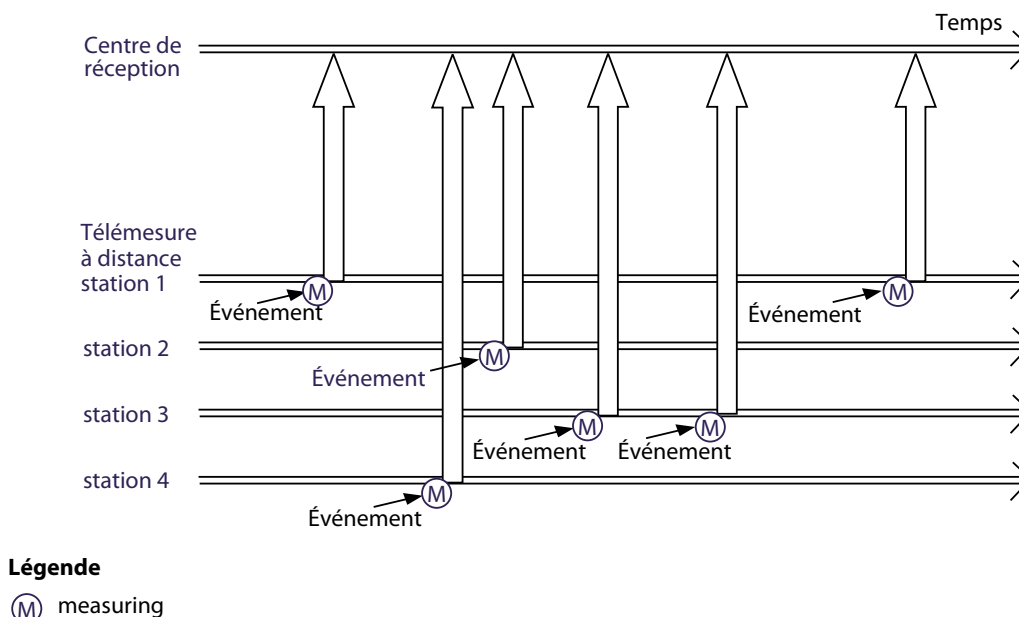


Figure 6.7. Diagramme de la méthode de réception par événements

exercer d'effet significatif sur les dispositifs de production d'énergie ;

- (g) Les sites doivent être facilement accessibles toute l'année pour l'installation et la maintenance ; ces opérations peuvent être réalisées au moyen d'un accès permanent par 4x4, d'un hélicoptère ou d'une piste d'atterrissage.

Le STDH d'un service de prévision et d'annonce des crues doit être conçu pour un fonctionnement continu et, par conséquent, doit pouvoir fonctionner dans des conditions difficiles, notamment les fortes pluies et les crues. Les concepteurs doivent considérer la fiabilité de l'équipement et du système dans son ensemble. Ainsi, pour les fonctions clés du système, des systèmes redondants doivent être prévus, par exemple une alimentation, des lignes de télécommunication et des générateurs de secours, et la redondance minimum acceptable du système doit être clairement définie. La redondance du système est de préférence définie par un temps d'interruption de service aussi bref que possible, à la fois en termes de durée d'une même interruption (en heures) et de durée totale des interruptions (en pourcentage) durant une période spécifique, par exemple un à trois mois.

Les composants du STDH doivent être aussi simples et robustes que possible, de telle sorte qu'il soit facile d'en vérifier le bon fonctionnement et de remplacer éventuellement des pièces ou des instruments. La maintenance en continu du système et la possibilité de modification et de développement des logiciels, à la fois pour le fonctionnement et le traitement des données, doit être une considération importante lors de la conception et de l'installation du système. Le STDH doit être conçu pour permettre au centre de réception de surveiller le statut opérationnel de l'ensemble du système, d'identifier les problèmes concernant les liaisons de communication et les instruments et de contrôler les opérations nécessaires. Une documentation complète doit être conservée concernant l'équipement et les procédures, et un système rigoureux de gestion des équipements et autres biens doit être établi.

#### Alimentation

Une alimentation extrêmement fiable est essentielle pour le fonctionnement d'un STDH et cela nécessite une réflexion importante. Une alimentation secteur pour les stations de télémétrie éloignées peut ne pas être disponible ou ne pas être suffisamment stable. Même lorsqu'une alimentation externe de type ligne électrique commerciale est utilisée pour faire fonctionner le système, des batteries ou d'autres sources d'énergie de secours doivent être prévues en cas de panne électrique. Les systèmes d'importance capitale,

comme ceux qui se trouvent au centre de réception et de surveillance, ainsi que les composants nécessitant une alimentation en courant fort, doivent être équipés de générateurs de secours. La durée de secours garantie nécessaire doit être déterminée en fonction de l'importance du système. Cette durée peut varier de quelques heures à plusieurs jours.

Lorsque des alimentations externes ne sont pas disponibles, des batteries de grande puissance, des générateurs photovoltaïques ou l'énergie éolienne sont utilisés. Des batteries de secours supplémentaires doivent également être prévues pour pallier le manque d'énergie durant les périodes où aucune énergie photovoltaïque ou éolienne ne peut être générée en raison des conditions météorologiques. La durée de secours garantie doit être déterminée sur la base des conditions météorologiques qui règnent dans la zone où le système doit être installé et de l'importance du maintien du fonctionnement du système. Les échelles de temps pour le fonctionnement de secours varient d'une semaine à un mois maximum. Ci-dessous sont répertoriés certains points spécifiques supplémentaires concernant les deux modes d'alimentation :

(a) Les alimentations secteurs :

- (i) Alimentation en courant continu : Elle peut être nécessaire pour le fonctionnement d'éléments spécifiques de l'équipement. Le courant continu est du courant alternatif converti par un transformateur pour recharger une batterie qui fournit une alimentation sans coupure. L'objectif d'une alimentation en courant continu est de satisfaire la consommation électrique des unités et de maintenir la charge des batteries.
- (ii) Régulateur de tension automatique : Parfois appelés contrôleurs de surtension, les régulateurs automatiques sont nécessaires dans les endroits où les variations de courant sont supérieures aux plages de tolérance de l'équipement. Il peut arriver qu'ils doivent être utilisés conjointement à un dispositif de secours, tel qu'une unité d'alimentation permanente (UPS) (voir (iii)).
- (iii) Unité d'alimentation permanente (UPS – Uninterrupted power supply) (aussi nommée Alimentation sans interruption – ASI) : Ces dispositifs sont proposés dans une gamme de tailles et de capacités pour fournir une alimentation de secours en cas de défaillance de la source principale, par exemple durant des coupures de courant, des délestages ou des perturbations dues à la foudre. Si une alimentation permanente est considérée comme nécessaire sur une longue



- durée, l'UPS peut nécessiter la présence d'un groupe électrogène de secours pour garantir le redémarrage lorsque l'alimentation est restaurée. L'équipement UPS est largement utilisé pour garantir le fonctionnement des PC ou des réseaux informatiques. Dans le cas présent, la capacité de l'UPS doit alors fournir une alimentation de secours pendant une période suffisante pour permettre l'exécution appropriée des procédures d'arrêt.
- (iv) Groupe électrogène de secours : Ils sont généralement utilisés avec une UPS et d'autres systèmes pour les centres opérationnels et les points d'observation particulièrement sensibles, pour lesquels des pannes électriques longues et fréquentes sont susceptibles de se produire. Les groupes électrogènes fonctionnent au gazole, et la puissance de sortie doit être suffisante pour prendre en charge les besoins de puissance de l'équipement concerné, mais aussi l'éclairage et la climatisation, le cas échéant. Il est recommandé qu'un groupe électrogène ait la fonctionnalité de démarrer lorsqu'il détecte automatiquement une interruption électrique ou une baisse significative de puissance.
  - (v) Protection contre la foudre : Dans les zones où des orages se produisent fréquemment, il est fortement recommandé d'utiliser des paratonnerres ou des transformateurs, mais aussi de prévoir une protection contre la surtension.
- (b) Les alimentations de terrain autres que sur secteur :
- (i) Production d'énergie photovoltaïque (solaire) : Il s'agit du type de source d'énergie indépendante la plus largement utilisée en raison de sa capacité à fournir une alimentation électrique relativement stable. La taille et la capacité du panneau solaire (groupe photovoltaïque) doivent être suffisantes pour satisfaire les besoins électriques de l'équipement et pour recharger les batteries de secours. L'énergie du panneau solaire doit être sauvegardée sur une batterie de stockage, qui doit alimenter le système en énergie en l'absence de soleil, à savoir la nuit ou durant les périodes nuageuses ou de faible intensité solaire. Un contrôleur de charge et une diode de blocage sont recommandés pour ce type d'équipement.
  - (ii) Production d'énergie éolienne : Dans les zones où la vitesse du vent est suffisante (au-dessus d'un certain seuil), des générateurs utilisant l'énergie éolienne ou des générateurs utilisant à la fois l'énergie éolienne et photovoltaïque sont utilisés. La

décision d'utiliser un générateur utilisant l'énergie éolienne doit s'appuyer sur des informations locales ou sur une étude du site sur une période de un à deux ans. La production d'énergie étant proportionnelle au cube de la vitesse du vent, il convient d'étudier soigneusement la capacité du générateur. Une éolienne doit être accompagnée d'une batterie de stockage pour fournir l'électricité de secours durant les périodes avec peu ou pas de vent. La présence d'un contrôleur de charge est également préconisée. De nombreux fournisseurs d'équipements proposent désormais des systèmes électriques hybrides compatibles, combinant la production d'énergie éolienne et photovoltaïque, personnalisables suivant les besoins de la station de télémétrie.

- (iii) Batteries uniquement : Pour les stations de télémétrie pour lesquelles il est difficile d'utiliser une alimentation faisant appel aux moyens décrits ci-dessus, une source d'alimentation à base de batteries uniquement peut être la seule option. Les stations d'observation et les équipements de télémétrie qui fonctionnent uniquement sur batteries peuvent nécessiter des batteries de capacités plus importantes pour pouvoir fonctionner sur des périodes aussi longues que possible entre deux remplacements de batteries. Dans ces cas, les systèmes de télémétrie doivent être conçus pour être peu énergivores et les batteries doivent être échangées par de nouvelles batteries chargées à intervalles réguliers.

## 6.2 PRÉTRAITEMENT DES DONNÉES

### 6.2.1 Considérations générales

Les données utilisées dans un système de prévision et d'annonce des crues doivent être considérées comme un sous-ensemble des bases de données plus importantes englobant l'hydrologie, la météorologie et la climatologie. Ainsi, les données spécifiques et les systèmes de traitement utilisés pour la prévision et l'annonce des crues doivent se conformer aux principes et directives fondamentaux utilisés dans les manuels de pratiques de référence, à savoir les tout derniers *Guide des pratiques hydrologiques* (OMM-N° 168) et *Guide des pratiques climatologiques* (OMM-N° 100). Les procédures de contrôle qualité détaillées doivent s'appuyer sur les parties pertinentes de la norme ISO 9001, tel que préconisé aux services

hydrologiques. Il ne s'agit pas de reproduire les détails de ces normes, mais les principaux points seront couverts car ils reflètent particulièrement bien les besoins et les caractéristiques des services de prévision et d'annonce des crues.

La caractéristique distinctive du fonctionnement des systèmes de prévision et d'annonce des crues est qu'ils fonctionnent en temps réel ou quasi-réel, et que de nombreuses procédures reconnues de traitement des données en termes de précision et de cohérence ne peuvent être effectuées selon les normes. Par conséquent, des mesures doivent être prises pour garantir le haut niveau de qualité et de fiabilité de la source, et pour veiller à ce que des contrôles croisés soient mis en place dans le système de traitement de données, dont la fonction première est de fournir des données fiables pour les modèles, les prévisions et la prise de décisions. Il convient de remarquer que les discussions qui suivent sur le contrôle qualité et le traitement des lacunes de données concernent la gestion générale des données. Elles sont, à bien des égards, distinctes des problèmes de qualité de données concernant les études de modèles qui ont été couvertes précédemment dans ce manuel.

### 6.2.2 Contrôle qualité

La gestion des données dans les opérations de prévision et d'annonce des crues doit s'appuyer en grande partie sur des outils et des techniques informatiques de validation des données. Bien que ceux-ci soient désormais plus puissants et plus efficaces, une vérification professionnelle des valeurs doit être effectuée, notamment concernant les éléments marqués comme douteux par les contrôles automatiques. Les hydrologues et les météorologues devront faire preuve d'un jugement éclairé et réfléchi pour décider d'accepter, de rejeter ou de corriger les valeurs de données ainsi signalées.

Les techniques de validation sont conçues pour détecter les erreurs communes qui peuvent se produire, et normalement les résultats du programme indiqueront la raison pour laquelle les valeurs de données ont été signalées. Pour décider de la complexité d'une procédure de validation à appliquer pour une variable donnée, la précision avec laquelle la variable peut être observée et la possibilité de corriger les erreurs détectées doivent être prises en considération.

Les données doivent être contrôlées et vérifiées pour garantir leur qualité, puis ainsi la validité des estimations et des prévisions ultérieures. La vérification des données peut être divisée en deux processus distincts :

(a) La détection des erreurs lors de la transmission de données peut être réalisée, par exemple,

au moyen de la vérification des bits de parité, du contrôle de redondance cyclique (CRC), du rapport d'erreur intégré et des codes de détection. Les méthodes sont souvent prévues par le fournisseur comme faisant partie intégrante du réseau et doivent être incluses dans les procédures de contrôle des communications.

(b) L'examen des propriétés des données hydro-métriques entrantes, en comparaison avec la plage connue des capteurs, des limites physiques supérieures et inférieures des valeurs du paramètre, ainsi que des limites du taux de variation des données mesurées. Les valeurs seuils doivent être spécifiées individuellement pour les différents éléments. Le système de vérification doit générer des rapports qui identifient tous les éléments de données suspects ou potentiellement erronés.

La vérification des séries temporelles graphiques de données par un personnel expérimenté est une technique très rapide et efficace pour détecter les anomalies au niveau des données. Pour cette raison, la plupart des systèmes de validation de données intègrent une fonctionnalité de production de graphiques de séries temporelles. Des modifications rapides de valeur ou de tendance sont bien souvent des indices signalant des données erronées ou parasites. La comparaison avec des diagrammes de stations adjacentes constitue aussi un moyen simple et efficace de veiller à la cohérence entre les stations.

Les méthodes de validation se divisent en trois catégories principales :

- (a) La vérification absolue : Cette méthode implique que les données ou les codes se situent dans une plage de valeurs dont la probabilité de dépassement est nulle. Ainsi, les coordonnées géographiques d'une station doivent être comprises dans les limites du pays, le jour d'une date doit être compris entre 1 et 31, et dans un système de codage numérique, un mélange de caractères alphanumériques, par exemple 43A, ne peut pas exister. Les données ne passant pas ces tests doivent être incorrectes. Il est généralement aisé d'identifier et de corriger l'erreur.
- (b) La vérification relative : Cette méthode inclut les éléments suivants :
- (i) Les plages prévues des variables ;
  - (ii) La variation maximale prévue d'une variable entre deux observations successives ;
  - (iii) La différence maximale prévue d'une variable entre des stations adjacentes.

Les limites de la plage de données doivent être larges pour permettre l'inclusion de valeurs extrêmes n'ayant jamais été enregistrées auparavant et le nombre de valeurs non

conformes doit rester gérable dans le contexte opérationnel. L'utilité de ces techniques dépend de la densité du réseau d'observation par rapport à la variation spatiale de la variable. Les réseaux pour les systèmes de prévision des crues sont plus spécifiques aux sites que les réseaux hydrologiques et météorologiques généraux. Ainsi, certains critères de variation spatiale peuvent ne pas être appropriés.

- (c) La vérification à base physique et statistique : Cette méthode inclut l'utilisation de régression entre des variables corrélées pour prédire les valeurs attendues. La comparaison des niveaux d'eau avec les précipitations totales et la comparaison des valeurs d'évaporation avec la température sont des exemples de ce type de vérification. Ces vérifications sont particulièrement pertinentes pour les observations issues de réseaux peu denses, pour lesquels le seul moyen de vérification est de comparer avec des valeurs de variables intercorrélées ayant des réseaux d'observation plus denses. La plupart de ces vérifications par comparaison et à base physique et statistique sont basées sur l'utilisation de séries temporelles, de corrélation, et de multiples techniques de régression et d'ajustement.

### 6.2.3 **Traitement des données manquantes**

L'utilité d'un système de prévision des crues dépend en grande partie de l'exhaustivité et de la continuité des données disponibles. Toutefois, le traitement des données manquantes avec des estimations peut gravement compromettre sa validité à certaines fins, par exemple le traitement avec une valeur moyenne ne sera pas adapté pour des données manquantes lors d'un événement de crue. Les données estimées doivent être repérées pour garantir leur visibilité pour l'utilisateur ainsi que leur traçabilité.

Les valeurs interpolées, par exemple pour les précipitations, doivent être utilisées précautionneusement et seulement si la nature de la répartition des précipitations orageuses est suffisamment régulière. Cela n'est efficace que pour des mesures de précipitations ponctuelles issues de pluviomètres. Il n'est pas possible d'interpoler des données manquantes à partir de blocs ou de séquences de pixels. Une lacune dans un enregistrement du niveau d'eau peut être remplacée par une ligne droite ou une courbe, le cas échéant, si le graphique résultant est cohérent avec les données de part et d'autre. Le traitement de données manquantes avec des données fictives déduites par corrélation n'est pas recommandé.

## 6.3 **DÉVELOPPEMENT ET GESTION DES DONNÉES**

### 6.3.1 **Gestion des données pour la prévision et l'annonce des crues**

Il y a un parcours défini que les données hydrométéorologiques doivent respecter dès le point de collecte, en tant que données d'entrée du système, par la validation, et jusqu'à la diffusion et l'utilisation dans le cadre des processus de décision. Ce parcours reste plus ou moins le même, quelle que soit l'échelle ou la spécificité des opérations.

Les fonctions principales du centre de réception et de surveillance sont la collecte de données de terrain par télémessure, le contrôle et la vérification des données, le traitement des données, ainsi que la diffusion des résultats aux utilisateurs. Ces processus nécessitent un système de traitement des informations exhaustif. Les détails des exigences en matière de télémessure ont été examinés dans les sections précédentes. Cette section se focalisera sur le stockage des données, l'accès à celles-ci, leur diffusion, et sur la place qu'elles occupent dans le processus de gestion des données.

### 6.3.2 **Archivage des données**

Conservation des données

La base de données utilisée pour un système de prévision et d'annonce des crues doit être considérée comme une entité séparée du type de base de données utilisé pour les applications générales concernant les ressources en eau. Les données reçues par un centre d'annonce des crues opérationnel doivent être sauvegardées de façon fiable et permanente ou, en d'autres termes, archivées. Cela permettra ultérieurement de passer en revue et d'analyser les performances passées et de comparer les événements historiques. La conservation des données doit être assurée même si les unités ou les instruments de traitement sont remplacés, et la meilleure approche pour cela est d'établir une base de données spécifique, qui ne dépend d'aucun périphérique, terminal ou format particulier de transmission de données.

Il est important de décider, parmi les nombreux ensembles de données générés lors du fonctionnement du système de prévision et d'annonce des crues, ceux qui doivent être stockés. Il existe de nombreuses étapes dans le cadre du processus de gestion des données, de l'enregistrement à la diffusion, et chacune de ces étapes peut représenter un ou plusieurs ensembles de données distincts. D'un autre côté, si l'archive ne fournit qu'un ensemble résumé de données traitées et validées, rien ne permet de comprendre la façon

dont les données ont été obtenues, la façon dont elles ont été mesurées et ses éventuelles limitations. La solution idéale vise à trouver le bon équilibre entre ces deux visions.

Le niveau auquel ce stockage de données aura lieu sera déterminé par un certain nombre de facteurs, tels que l'espace de stockage disponible, la disponibilité du budget pour le stockage et la documentation ainsi que la disponibilité du personnel. Cela supposera inévitablement un compromis entre l'exhaustivité des archives et les ressources disponibles. Pour une entité opérationnelle comme un système de prévision et d'annonce des crues, le système d'archivage peut être limité aux ensembles de données brutes et finales, avec un fichier de notes expliquant les décisions et les modifications effectuées. Les points suivants sont communs à l'archivage de données et pertinents pour un système de prévision et d'annonce des crues :

- (a) Les fichiers de données brutes doivent être conservés ; ceux-ci incluront en grande partie les enregistrements de données télémétrés, par exemple l'heure de basculement des pluviomètres à augets basculeurs, mais peuvent aussi inclure des relevés pluviométriques mesurés par radar et des notes d'opérateurs ;
- (b) Tous les ensembles de données traités doivent être associés avec des descriptifs de métadonnées détaillant la provenance de l'ensemble de données, par exemple des informations sur l'instrument de mesure et sur la localisation ;
- (c) Toute modification apportée à des parties d'une série de données doivent être documentées par rapport à l'ensemble de données, par exemple en notant l'application d'une référence pour une période d'enregistrement des niveaux d'eau, ou la conversion d'une période d'enregistrement des niveaux d'eau en débit avec une courbe de tarage, qui existera elle-même en tant qu'ensemble de données ;
- (d) Les modifications apportées aux valeurs des données individuelles, par exemple l'interpolation des données manquantes ou la modification des valeurs séparément, doivent être documentées ;
- (e) L'ensemble de données résultant doit comporter un descriptif complet de ce qui a été modifié et de la raison de toute modification ; tout utilisateur des données doit être en mesure de comprendre à la fois les raisons des modifications et les méthodes employées pour modifier les valeurs des données brutes.

#### Stockage des données

Tout ensemble de données numériques organisé est, en effet, une base de données, et sa structure et fonctionnalité doivent être déterminées par les gestionnaires du système de données. Lors du développement de systèmes de stockage de données,

un nombre important de critères doivent être considérés. Ces critères incluent notamment :

- (a) La sécurité, y compris la gestion de l'accès et les droits administratifs pour les divers utilisateurs ;
- (b) La facilité de la maintenance ;
- (c) Les coûts, y compris les frais d'installation initiale et les frais récurrents, notamment les éventuels frais de licence, la maintenance et le stockage ;
- (d) La facilité des opérations de requête ;
- (e) La puissance des outils de recherche de données existants ;
- (f) La facilité de développement d'outils de recherche supplémentaires ;
- (g) La possibilité d'inclure ou de relier d'autres sources de données ou logiciels d'affichage de données, comme un SIG ;
- (h) L'adéquation aux exigences liées aux infrastructures des Technologies de l'information (IT) existantes et aux compétences du personnel ;
- (i) Un système de métadonnées qui fournit des informations détaillées sur le contenu de la base de données ;
- (j) La capacité à établir un accès en réseau ou à distance via des liaisons aux serveurs réseau et Internet.

Un grand réseau national de prévision et d'annonce des crues a des exigences de haut niveau, notamment le chargement des données en temps réel et automatisé, des liens avec des outils d'analyse sophistiqués et éventuellement un accès multi-utilisateurs pour un certain nombre d'organisations internes et externes sur le territoire. Ces systèmes nécessitent une logistique technique importante et coûteuse, une formation pour les utilisateurs et, bien souvent, le développement d'outils faits sur mesure. À toute petite échelle, par exemple pour un seul réservoir ou une zone urbaine, une petite base de données de projet est nécessaire et peut être gérée par une seule personne. Une telle base de données peut être d'une taille suffisamment réduite pour pouvoir être envoyée par courriel à d'autres utilisateurs, par exemple d'une sous-unité d'annonce des crues à une autorité de gestion centrale.

#### Affichage et présentation des données

Tout système de gestion de données doit posséder des fonctionnalités flexibles d'affichage et d'impression de données et d'informations sous forme de tableaux, de graphiques et de rapports formatés (macros). Ces fonctions doivent être fournies pour chaque intervalle ou pas de temps de collecte de données, ou pour la production de données groupées par lots ou par périodes sur une série de pas d'échantillonnage différents (par exemple quotidienne). Les systèmes doivent également inclure une fonctionnalité de recherche pour

permettre à l'utilisateur d'obtenir les résultats escomptés.

Les SIG disposent d'applications utiles dans le cadre d'un système de prévision et d'annonce des crues, ayant la capacité d'assimiler et de présenter des données de manière spatialisée. La possibilité de présenter les informations sous forme de carte et de bien les visualiser permet une meilleure compréhension dans des délais plus courts. Les données spatialisées utiles dans le cadre d'un système de prévision et d'annonce des crues comprennent les cartes du réseau de surveillance, les modèles numériques de terrain, les isohyètes de précipitations, les signaux d'alarme et les zones inondées. La présentation des données numériques constitue une part importante de la diffusion des informations. Des cartes numériques peuvent être créées pour la représentation des données pluviométriques, surtout à partir des données provenant des radars, mais également à partir de données pluviométriques provenant de sources ponctuelles.

Bien que l'objectif premier d'un service de prévision et d'annonce des crues soit de fournir des informations pertinentes à des moments critiques, les informations récoltées ont leur importance à titre de référence. Ainsi, de nombreux organismes d'annonce des crues doivent produire des rapports post-événement, qui couvrent à la fois les aspects météorologiques et hydrologiques d'un événement, ainsi que les actions opérationnelles, les résultats, les impacts et les enseignements tirés. Généralement, ces rapports sont internes aux organismes opérationnels, et servent de moyen d'évaluation des performances. Lorsque des événements majeurs se produisent, ces rapports peuvent être intégrés à des rapports d'évaluation des impacts de plus grande portée. Ces rapports ont été rendus obligatoires par de hauts dirigeants du gouvernement britannique suite aux grandes inondations des années 1998, 2000 et 2007.

Certains organismes d'annonce des crues produisent aussi systématiquement un rapport annuel, par exemple le Centre de prévision et d'annonce des crues du Bangladesh. Cela sert non seulement à passer en revue les événements et les performances de la saison des crues, mais également à établir une comparaison historique de la magnitude et de l'impact des crues.

#### 6.4 DIFFUSION DES DONNÉES

Les données ne sont d'aucune utilité tant qu'elles ne sont pas utilisées, non seulement dans le cadre d'une unité de prévision et d'annonce des crues, mais également par un certain nombre de décideurs

(parfois dénommés «partenaires professionnels»). Pour être utiles, les données et informations doivent être de bonne qualité, clairement présentées et facilement accessibles pour une large gamme d'utilisateurs. Du fait que de nombreux utilisateurs ne sont généralement pas des spécialistes dans les disciplines de collecte et de traitement des données, les besoins des utilisateurs et la présentation des informations sont des considérations importantes.

Les utilisateurs externes potentiels des données de prévision et d'annonce des crues peuvent inclure des membres de personnel d'autres ministères, des gestionnaires d'infrastructures publiques et privées, des membres de la sécurité civile ou des services d'urgence et des décideurs gouvernementaux de haut niveau. Cette large gamme d'utilisateurs potentiels aura des exigences diverses concernant ces informations, certains n'ayant besoin de données provenant que d'un point unique sur une rivière, d'autres nécessitant des données couvrant une région entière, un pays entier, ou même des groupes de pays dans le cas de rivières transfrontalières. Pourtant, tous voudront connaître un certain nombre d'informations générales :

- (a) Où se produira la crue ;
- (b) Quand se produira la crue ;
- (c) De quelle magnitude sera la crue ;
- (d) Combien de temps durera la crue.

La diffusion des annonces de crues est abordée dans le chapitre 8 de ce manuel. Les autres considérations qui peuvent être prises en compte sont les règles et pratiques nationales concernant le partage des données, les politiques d'information publique et les droits de propriété intellectuelle. Ainsi, certains pays peuvent appliquer des restrictions concernant les informations cartographiées, d'autres concernant la disponibilité de données qui peuvent toucher à des questions de responsabilité juridique et à des sujets transfrontaliers sensibles.

Le type de données diffusées va des déclarations formalisées pour la presse et les ministères, en passant par les annonces proforma pour les partenaires professionnels qui sont formulées en même temps selon les procédures internes, jusqu'aux ordres permanents, aux communiqués de presse et aux annonces. Toutes ces diffusions nécessitent que les informations de prévision et d'annonce des crues soient rapidement converties en un certain nombre de formats pour transmission ultérieure. La transmission peut s'effectuer par téléphone, fax, courriel ou site Internet. Chaque moyen a ses avantages et inconvénients en termes de fiabilité, de besoins en effectifs et d'accessibilité.

L'utilisation d'Internet s'est accrue et de nombreux organismes nationaux d'annonce de crues hébergent un site Internet accessible au public. Certains

exemples sont donnés dans le tableau ci-dessous. Les personnes intéressées au développement d'un site Internet pour un service national ou régional devraient étudier ces sites pour apprécier le niveau de détail et de complexité qui peut être proposé. La nécessité de garder les sites Internet à jour et de proposer un niveau d'accès élevé est extrêmement

importante, et c'est un rôle qu'il convient de confier à des spécialistes de la conception et de la gestion de sites Internet. Ces compétences spécifiques doivent être maintenues ou développées au sein de l'organisation si le site Internet doit durer dans le temps et évoluer pour satisfaire les niveaux de service requis.

#### Exemples de sites Internet pour un service d'annonce des crues national

<i>Pays</i>	<i>Agence opérationnelle</i>	<i>Agence Web</i>	<i>Résultats</i>
Royaume-Uni	Agence pour l'environnement	<a href="http://www.environment-agency.gov.uk/homeandleisure/floods">http://www.environment-agency.gov.uk/homeandleisure/floods</a>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Bulletins d'informations</li> <li>– Cartes de localisation</li> </ul>
Australie	Bureau de la météorologie	<a href="http://www.bom.gov.au/australia/flood/">http://www.bom.gov.au/australia/flood/</a>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Bulletins d'informations</li> <li>– Cartes nationales, régionales et de bassins hydrographiques</li> </ul>
Bangladesh	Bangladesh Water Development Board (Conseil de développement de l'eau au Bangladesh)	<a href="http://www.ffwc.gov.bd">http://www.ffwc.gov.bd</a>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Bulletins d'informations</li> <li>– Cartes nationales</li> <li>– Graphiques et prévisions des niveaux d'eau aux stations</li> </ul>
États-Unis	Service de météorologie national de l'Administration américaine pour les océans et l'atmosphère (NOAA)	<a href="http://www.nws.noaa.gov">http://www.nws.noaa.gov</a>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Bulletins d'informations</li> <li>– Cartes nationales, régionales et de bassins hydrographiques</li> <li>– Graphiques et prévisions des niveaux d'eau aux stations</li> </ul>

## CHAPITRE 7

# APPLICATIONS POTENTIELLES ISSUES DE TECHNOLOGIES EN DÉVELOPPEMENT

### 7.1 INTRODUCTION

Les progrès en matière de fonctionnalités des systèmes de prévision et d'annonce des crues au cours des 20 dernières années sont en grande partie dus aux évolutions rapides des systèmes d'observation électroniques, de la télémétrie et de la puissance des ordinateurs. Grâce à ce développement, la plupart des efforts manuels et des composants issus d'une conception et d'une prévision en temps différé ont évolué vers un fonctionnement en temps réel. Cette évolution a généré une gamme de nouvelles techniques, y compris la télé-détection, la PNT, les SIG et l'intégration au cours de la modélisation de données récentes d'observation (assimilation). Ces techniques sont passées en revue dans les sections suivantes. La plupart de ces composants sont opérationnels dans les pays et les régions développés, et peuvent ne pas être considérés nécessairement comme une technologie émergente. Cependant, une des priorités de ce manuel est de fournir des directives aux SHN qui cherchent à développer leurs structures de prévision et d'annonce de crues, et doivent ainsi mieux comprendre ces fonctionnalités, leurs avantages et leurs limites.

### 7.2 TÉLÉDÉTECTION

#### 7.2.1 Radar

La mesure des précipitations par radar n'est pas une nouvelle technique et ne sera donc pas considérée de façon approfondie dans la présente section. Les principaux avantages de cette technique sont bien connus, dans la mesure où elle fournit une indication spatiale des précipitations, proposant ainsi une mesure mieux répartie que celle obtenue par les pluviomètres uniquement. En outre, les résultats se prêtent aux modèles basés sur une grille, qui sont de plus en plus utilisés. Pourtant, dans la pratique, il existe un certain nombre de limites concernant la précision des mesures, en matière de portée et d'atténuation du signal et d'étalonnage, ce qui signifie que la mesure par radar n'a pas permis les grandes avancées initialement prévues par rapport aux pluviomètres. Les instruments radar font désormais partie de la «seconde génération» d'instruments Doppler, qui résolvent certains problèmes d'atténuation de signal. Il existe également de plus petites versions d'instruments radar, parfois portatifs, qui peuvent être utiles pour la surveillance locale, en particulier dans les zones

urbaines. La combinaison des instruments radar et de la PNT, qui est utilisée pour les modèles de prévision à court terme, a également permis des progrès scientifiques considérables, permettant ainsi la prévision du développement des cellules, leur décroissance et leur trajectoire.

Il existe deux autres problèmes persistants concernant les instruments radar, le premier étant le coût et le second étant le moyen de transformer les informations radar de données purement visuelles en données numériques. Ces deux problèmes sont importants pour les pays en voie de développement mettant en place un nouveau système. Les dépenses en capital sont élevées. Il en est de même pour les frais de fonctionnement pour l'étalonnage et la maintenance. Sans financement adéquat pour ces deux derniers éléments, tout investissement dans un instrument qui ne peut pas fournir de données fiables est inutile. Les mesures par radars sont réalisées dans les conditions optimales par les réseaux qui fournissent un chevauchement entre les domaines de couverture des radars espacés d'une distance inférieure à 200 kilomètres, fournissant ainsi une résolution spatiale de 1 à 2 kilomètres toutes les cinq minutes, aussi proche du sol que possible. Cela s'ajoute au coût d'installation pour un système national ou sur un grand bassin hydrographique.

#### 7.2.2 Satellite

La prévision des crues fluviales repose essentiellement sur les prévisions météorologiques et pluviométriques et, par conséquent, les données d'Observation de la Terre (OT) obtenues grâce aux capteurs des satellites météorologiques opérationnels présentent un intérêt considérable. Établi en 1984, le Comité sur les satellites d'observation de la Terre (CEOS) coordonne les observations spatiales civiles de la Terre. Actuellement, 28 agences spatiales ainsi que 20 autres organismes nationaux et internationaux participent à la planification et aux activités du CEOS.

Les données des satellites pour la prévision hydrologique proviennent des satellites géostationnaires et en orbite polaire. Les satellites géostationnaires (tels que le GOES – geostationary operational environmental satellite) ont une période orbitale d'un jour, et restent donc stationnaires à 36 000 kilomètres au-dessus d'un point au niveau de l'Équateur. Les satellites en orbite polaire ont une période orbitale comprise entre une et deux heures.

L'Administration américaine pour l'aéronautique et l'espace (NASA) finance, et continuera de financer, un programme de surveillance par satellites qui permet de générer des produits pluviométriques globaux cumulés sur trois heures et en temps réel disponibles sur un serveur de protocole de transfert de fichiers (FTP) sans frais pour les utilisateurs. Cette initiative nécessite également des ressources considérables pour soutenir les sites de validation au sol et les études visant à améliorer les méthodes de calcul des précipitations issues des données spatiales. Des efforts similaires ont été réalisés par le Laboratoire de recherche de la Marine (NRL – Naval Research Laboratory) des États-Unis et par l'Organisation européenne pour l'exploitation des satellites météorologiques (EUMETSAT) visant à fournir des produits de données fusionnés en temps réel.

Le satellite Aqua fait partie des appareils mis à contribution par la NASA pour le Système d'observation de la Terre (EOS). Aqua transporte six instruments ultrasophistiqués pour observer les océans, l'atmosphère, les terres, les couvertures glaciaire et neigeuse, ainsi que la végétation. Ces instruments fournissent des mesures de précision, détaillées et de fréquence temporelle fine. Un des grands avantages potentiels offerts par Aqua et les autres données du EOS est l'amélioration des prévisions météorologiques. Par exemple, l'ensemble d'instruments très perfectionné transporté par AQUA permettra de déterminer les températures atmosphériques partout dans le monde avec une précision d'1 °C sur des bandes d'1 kilomètre de large sur l'ensemble de la troposphère, en plus des profils d'humidité des sols.

Les capacités des systèmes GOES se sont améliorées régulièrement, fournissant une mise à jour plus rapide (échelles de temps inférieures à 30 minutes) et une optimisation de la résolution spatiale. Les estimations pluviométriques des plate-formes GOES utilisent la radiation infrarouge (IR) en exploitant des algorithmes basés sur la relation entre l'augmentation de l'extension verticale des nuages et les précipitations de surface. Les algorithmes fonctionnent mieux pour les précipitations convectives et moins bien pour les précipitations de nuages stratiformes peu épais. L'utilité des satellites en orbite polaire pour la prévision hydrologique est, toutefois, limitée par la fréquence des passages au-dessus d'un lieu donné. Les systèmes combinés des satellites en orbite polaire et des GOES peuvent fournir des possibilités d'estimation des précipitations importantes pour la prévision hydrologique au cours des prochaines décennies. Ces systèmes peuvent être particulièrement utiles pour les grands bassins hydrographiques aux réseaux pluviométriques peu performants non équipés d'une couverture radar.

Le potentiel d'estimation pluviométrique des plates-formes en orbite polaire est bien démontré par le satellite réalisant la mission de mesure des pluies tropicales (TRMM) (un programme du Laboratoire spatial NASA-Goddard). Le satellite TRMM comporte un radar pour les précipitations, en plus d'imageurs à hyperfréquences et IR. Divers résultats de cumuls de pluie et d'impacts potentiels de crues et de glissements de terrain sont disponibles sur le site Internet <http://trmm.gsfc.nasa.gov>. Les exemples en Figure 7.1 montrent des cumuls de pluie sur trois heures et une crue potentielle durant une période de mousson en Australie septentrionale.

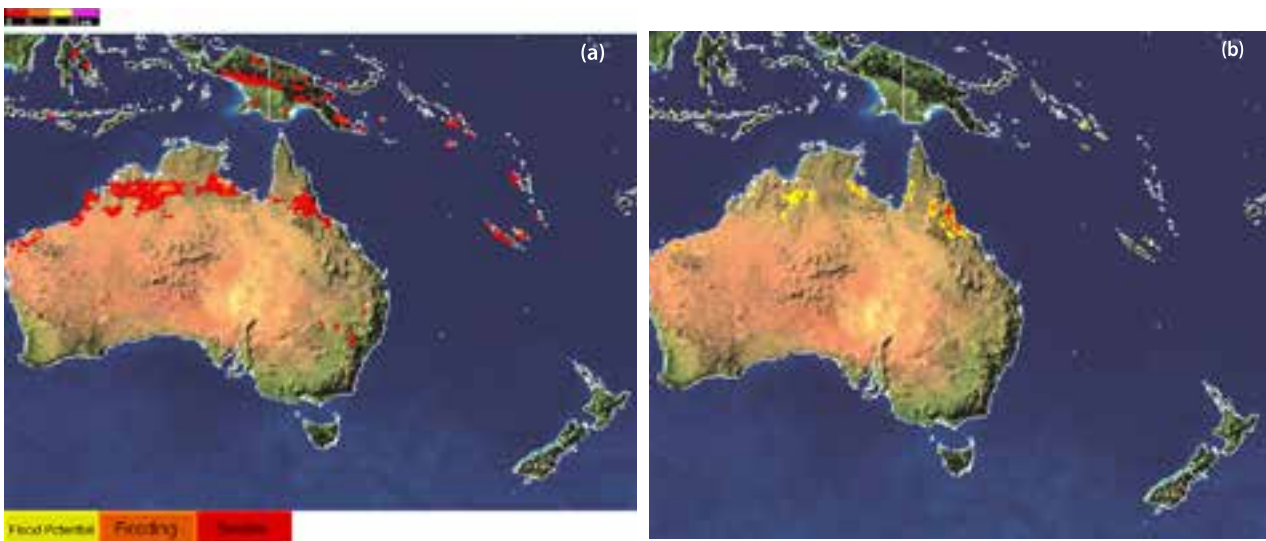


Figure 7.1. (a) Un exemple de résultats indiquant les cumuls de pluie sur une durée de trois heures en Australie septentrionale pour le 3 février 2009 provenant du satellite TRMM. (b) Informations sur les risques de crue provenant du satellite TRMM au même moment que les informations pluviométriques indiquées au point (a)



À plus grande échelle, la surveillance internationale des précipitations (les missions mondiales de mesure des précipitations (GPM)) doit être considérée comme un programme à long terme portant sur plusieurs décennies. L'UNESCO a conclu un accord de collaboration avec l'OMM et l'Agence spatiale européenne (ESA) pour le soutien de ces activités, dans le cadre duquel d'autres groupes nationaux et régionaux seront impliqués. En plus des plates-formes appropriées de télédétection par satellite adéquates, ces programmes nécessitent des données de terrain fiables provenant de plates-formes de collecte de données de hautes spécifications. Il est prévu que les données satellite radar avec amplificateur à état solide, à capacité multi-fréquence et à balayage conique soient disponibles pour la communauté météorologique dans son ensemble d'ici la prochaine décennie. Certains s'inquiètent, néanmoins, du fait que ce secteur d'acquisition d'informations risque de perdre son avance technologique. Le nombre de capteurs satellitaires en fonctionnement est en baisse et le développement de la technologie des capteurs risque également de ne pas suffire pour répondre aux exigences requises en matière de prévision et d'annonce des crues. Bien que le développement en continu de l'observation de la terre à des fins de détection des risques de crues puisse être considéré comme essentiel, les gouvernements nationaux et les organismes internationaux réduisent actuellement les budgets consacrés à l'investissement dans les programmes de télédétection.

### 7.3 PRÉVISION NUMÉRIQUE DU TEMPS (PNT)

Les principaux services météorologiques utilisent désormais des modèles océan atmosphère complexes pour générer des résultats de PNT visant à soutenir leurs services de prévision. Le développement des PNT a été étroitement associé à l'évolution de la télédétection et de l'observation de la Terre. Cette méthode s'est révélée être une grande réussite en matière d'amélioration de la précision et des délais des prévisions météorologiques, mais aussi des PQP. Cette section étudiera l'applicabilité des PNT aux inondations et la façon dont elles peuvent être intégrées dans le processus de prévision et d'annonce des crues.

#### 7.3.1 Crues fluviales à grande échelle

Les systèmes météorologiques responsables de ces événements tendent à être de grande ampleur et relativement prévisibles, souvent plusieurs jours à l'avance. À l'échelle internationale, des profils de vent, de température et d'humidité pour les

20 kilomètres inférieurs de l'atmosphère, à une résolution spatiale de 20 à 50 kilomètres et une résolution verticale d'un kilomètre, sont nécessaires toutes les trois à six heures pour initialiser les modèles de PNT. Les observations mondiales de la température de la mer, des couvertures glaciaire et neigeuse sont également des données importantes à une résolution spatiale d'environ cinq kilomètres. L'amélioration de la précision des prévisions repose principalement sur les données d'observation. Actuellement, les satellites existants fournissent une résolution verticale relativement grossière de la température et de l'humidité mondiales, mais une amélioration de la résolution est susceptible de se produire au cours des prochaines années. Des informations sur le vent à différents niveaux sont également disponibles grâce aux capteurs satellitaires.

#### 7.3.2 Précipitations convectives et événements fluviaux de petite échelle

Les systèmes météorologiques responsables de ces événements sont d'échelle plus réduite et moins prévisibles que les perturbations synoptiques. Les délais seront généralement de l'ordre de quelques heures plutôt que de quelques jours. Cette échelle de prévision s'applique donc aux bassins hydrographiques à réponse plus rapide et aussi aux inondations pluviales et urbaines.

Les modèles de PNT pour ce type d'inondations doivent fonctionner à une échelle régionale ou locale, et peuvent nécessiter deux étapes de réduction d'échelle par rapport aux modèles mondiaux. Pour le nord-ouest de l'Europe, les modèles adaptés utilisent des observations horaires sur le vent, la température et l'humidité couvrant l'est de l'Atlantique Nord et l'Europe occidentale à une résolution spatiale de 10 à 20 kilomètres et une résolution verticale de 50 à 500 mètres, sur l'ensemble des 20 kilomètres inférieurs de l'atmosphère. Pour reconnaître les signes précurseurs du développement des orages, les mêmes variables, ainsi que les nuages et les précipitations, sont également requises au-dessus du Royaume-Uni, toutes les 15 à 60 minutes, à une résolution spatiale de 3 à 20 kilomètres et à une résolution verticale de 50 à 200 mètres, dans les 2 kilomètres inférieurs de l'atmosphère. Les températures de la mer et des lacs à une résolution spatiale d'un kilomètre sont nécessaires quotidiennement pour optimiser la précision des prévisions. Pour la plupart de ces besoins, les principales sources de données sont les satellites d'observation de la terre et les radars au sol, mais d'autres mesures embarquées, comme celles effectuées par les avions de ligne, apportent également une contribution significative. Il est probable que les

améliorations relatives aux données d'entrée et à leur utilisation permettent des avancées substantielles en termes de prévisibilité de ces événements. Les capacités actuelles des satellites sont bien en deçà des besoins et les efforts se concentrent sur la mise à jour des capacités des radars au sol en vue de fournir des estimations des vents et de l'humidité en utilisant des radars Doppler (via des mesures par réfraction). À cette fin, l'espacement requis entre chaque radar doit être inférieur à 200 kilomètres. La plupart des réseaux nationaux de radars existants ne respectent pas cet espacement minimum et manquent de précision.

Pour fonctionner, les modèles de PNT nécessitent des ordinateurs très puissants, ainsi que des exigences très élevées en termes de données. Cela représente un coût important et de lourds investissements pour les gouvernements. Seuls quelques SMN sont en mesure d'obtenir ce niveau de logistique. Bien que les produits Internet soient disponibles internationalement, ceux-ci ne peuvent être, en réalité, utilisés que par un petit nombre de SMN ou de services d'annonce de crues, pour fournir, en temps différé, des informations de contexte supplémentaires ou des alertes précoces générales. Il est, toutefois, possible d'établir des

modèles climatiques régionaux et des modèles climatiques à domaine limité aux niveaux national ou des bassins hydrographiques, au moyen de données et de conditions aux limites issues d'un modèle de circulation générale (MCG) existant.

#### 7.4 SYSTÈMES D'INFORMATIONS GÉOGRAPHIQUES (SIG)

L'utilisation des SIG dans le cadre d'un système de prévision et d'annonce des crues peut fournir une large gamme de produits de visualisation, comportant bien plus d'informations que des applications cartographiques de base ou des textes descriptifs. Les SIG utilisent des ensembles de données corrélés spatialement et des bases de données relationnelles pour fournir des couches ou surcouches successives d'information, par exemple l'identification des infrastructures principales par rapport au risque spatialisé de crue et au déplacement d'une crue dans un cours d'eau ou un système de drainage. Les SIG peuvent fournir des affichages de données de situations à des points d'observation donnés pour des variables comme le niveau d'eau et les précipitations. Les logiciels commerciaux de

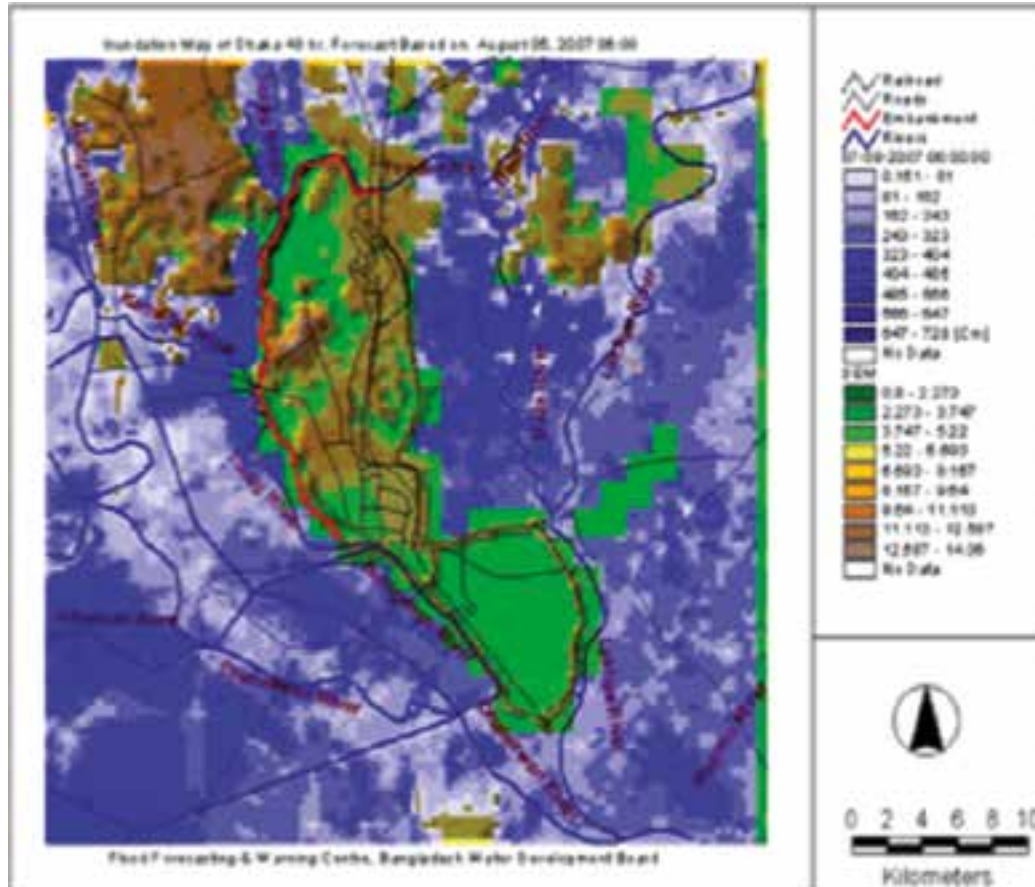


Figure 7.2. Cartes des inondations de Dhaka basée sur une prévision à T+48 heures

Source : Centre de prévision et d'annonce des crues (FFWC) du Bangladesh

prévision et d'annonce des crues sont généralement disponibles avec une interface SIG, parfois dénommée interface utilisateur graphique (GUI). Toutefois, un SIG requiert, pour son fonctionnement, un vaste ensemble de différentes données géoréférencées, dont la collecte constitue en soi une tâche significative.

Le type de données le plus important pour un système d'annonce de crues est la représentation exacte de la surface du terrain par les MNT. Ceux-ci peuvent provenir de la numérisation de cartes en courbes de niveau, mais ils manqueront de précision, en particulier pour les plaines inondables, qui sont des zones peu accidentées. La photogrammétrie par photographies aériennes a été largement remplacée par le levé aéroporté numérique, soit par LIDAR (une technologie de levé par laser), soit par radar à synthèse d'ouverture (RSO), ceux-ci étant nécessaires pour obtenir les niveaux requis de précision verticale (à un mètre près voire moins). Le LIDAR est considéré comme étant plus précis que le RSO. Une autre application potentielle est la quantification de la rugosité nécessaire aux modèles des plaines inondables à partir des capteurs aéroportés et satellitaires.

Les MNT à haute résolution constituent un élément clé pour fournir des cartes précises de prévision des inondations, comme dans l'application utilisée par le Centre de prévision et d'annonce des crues (FFWC) du Bangladesh pour la ville de Dhaka et ses environs (Figure 7.2).

Le LIDAR est également utilisé pour identifier les zones problématiques menacées de crues dans les zones densément urbanisées au Royaume-Uni dans le cadre d'un programme visant à développer un système d'annonce des crues pluviales (Making Space for Water, Defra, 2007). La précision du LIDAR est suffisante pour identifier des zones basses de faible étendue où les eaux de crues s'accumulent, mais aussi pour identifier avec précision les directions de l'écoulement. Un exemple de ceci est illustré en Figure 7.3, qui indique les applications à différentes échelles qui sont adaptées à la prévision de crue urbaine.

## 7.5 INTÉGRATION D'AMÉLIORATIONS DANS LE DOMAINE DES PRÉVISIONS QUANTITATIVES DES PRÉCIPITATIONS

La principale amélioration fournie par l'utilisation des PQP est le fait qu'elles peuvent fournir des valeurs pluviométriques numériques quantitatives sur une période donnée, celles-ci remplaçant les interprétations subjectives des termes communément utilisés pour les prévisions de pluie, comme

«faible», «modérée» et «éparse». Sur le sous-continent indien, la plupart des SMN ont une version pseudo-quantitative des termes descriptifs, comme indiqué dans le tableau ci-dessous. La précision des chiffres à deux décimales près est irréaliste et la façon dont ces chiffres ont été obtenus à la base est incertaine. Cette classification a de plus une utilité limitée car aucune durée n'est reliée aux quantités, de sorte que l'intensité n'est pas identifiée. Les prévisions sont généralement appliquées aux régions administratives, de sorte que l'impact au niveau des bassins hydrographiques n'est pas directement pertinent.

### Définitions de prévisions pluviométriques pseudo-quantitatives (Inde et Bangladesh)

<i>Description qualitative</i>	<i>Total pluviométrique (en mm)</i>
Faible	4,57–9,64
Modéré	9,65–22,34
Modérément soutenu	22,35–44,19
Soutenu	44,20–88,90
Très soutenu	89 +

Bien entendu, de telles définitions devront changer suivant les différents types de climat, et il manque également le lien nécessaire avec les impacts. Des précipitations de 20 millimètres en une heure ne signifient pas grand-chose dans un climat de mousson en Asie, mais une quantité similaire dans une petite zone saturée en altitude ou dans un bassin hydrographique très urbanisé dans une zone tempérée peut avoir des effets tout à fait significatifs.

Les principaux problèmes concernant l'utilisation des PQP en matière de prévision des crues concernent la façon dont les informations peuvent être intégrées dans les modèles, leur accès en temps utile et la confiance qui peut être accordée à ces informations.

Les valeurs des PQP issues des modèles météorologiques sont normalement fournies sous un format matriciel, ce qui convient pour les données d'entrée des modèles basés sur une grille, mais qui nécessite une intégration spatiale et temporelle pour être utilisée dans un modèle global. La résolution spatiale obtenue par les résultats dépend du type de modèle météorologique. On considère que, pour que les données matricielles soient interpolées utilement, un arrangement de valeurs numériques de  $3 \times 3$  ou une suite linéaire de 5 valeurs est nécessaire. Ainsi, à l'échelle des modèles climatiques mondiaux, la résolution est en dizaines de kilomètres, ce qui n'est pas particulièrement utile sauf pour les grands bassins



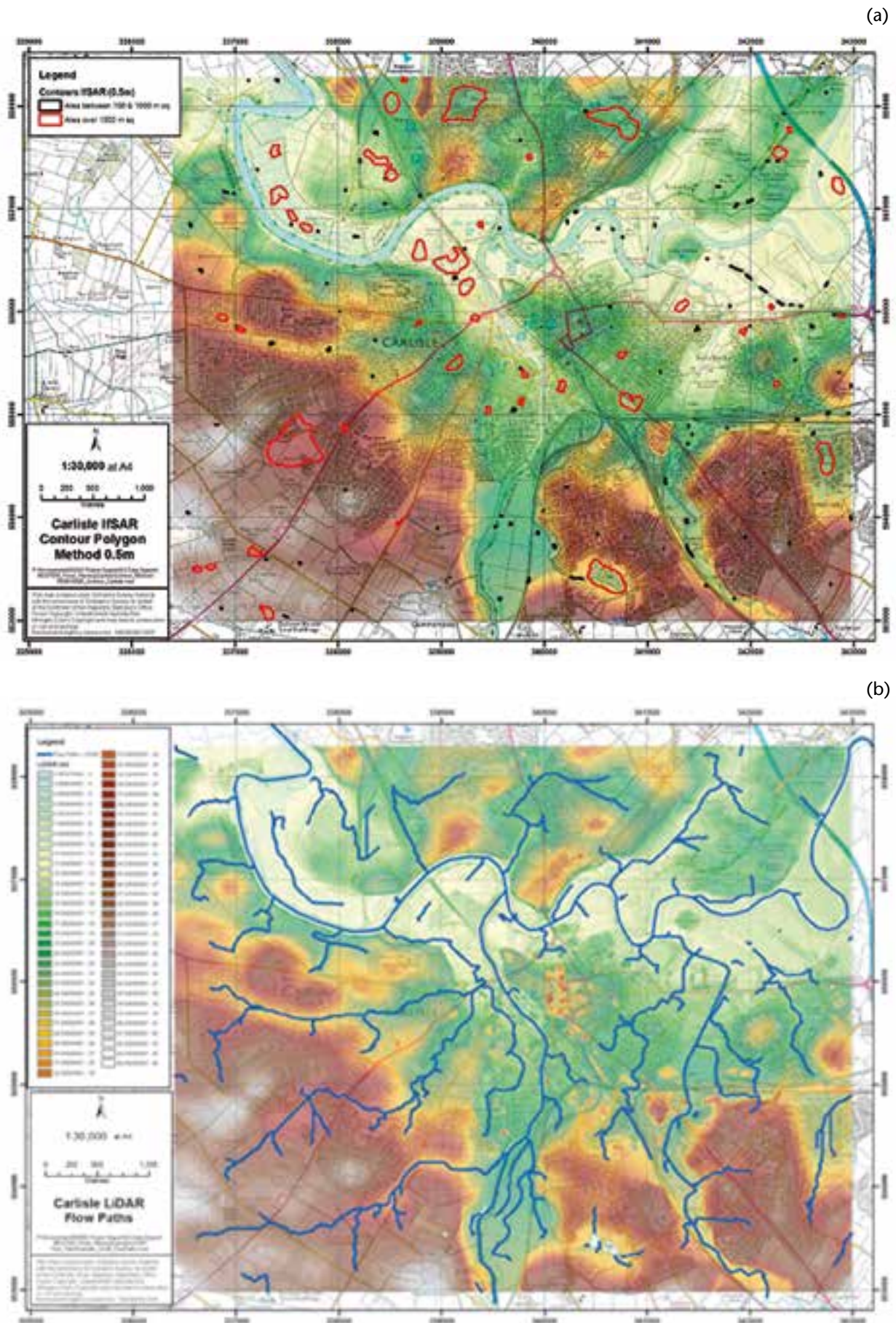
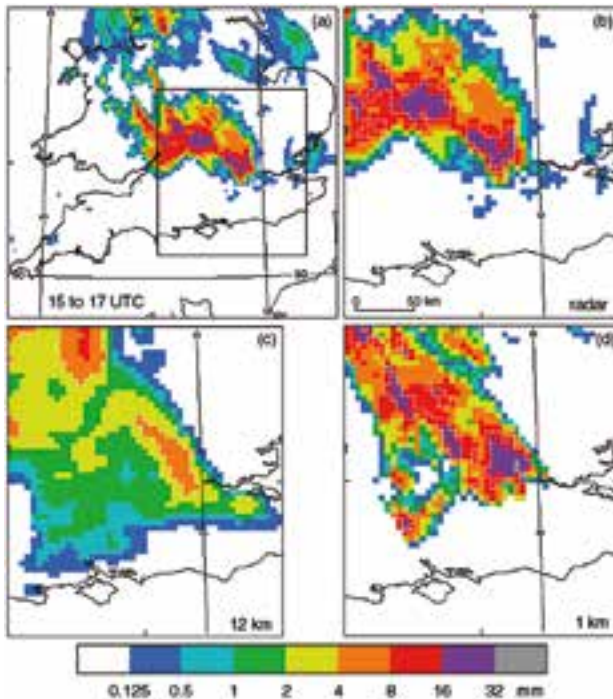


Figure 7.3. Dépressions inondables localisées (a) et directions d'écoulement (b) identifiées par LIDAR pour Carlisle et ses environs au Royaume-Uni

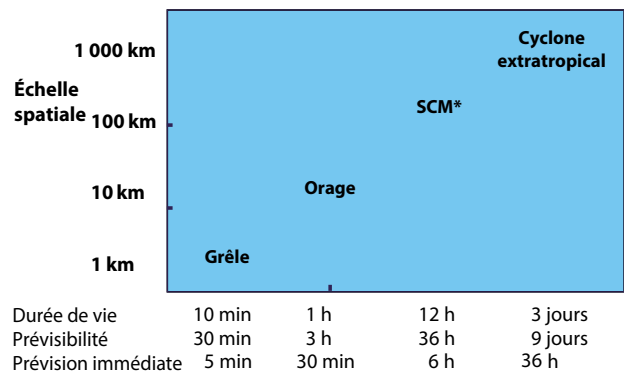
hydrographiques. Les études post-événement au Royaume-Uni montrent que le niveau de détail approprié pour un système d'annonce des crues sur un petit bassin hydrographique nécessite une grille de modèle de 4 kilomètres, comme illustré en Figure 7.4. Une caractéristique des modèles de PNT (et donc des résultats de prévisions quantitatives des précipitations) est qu'un lissage interne est nécessaire pour maintenir la stabilité et la précision, de sorte que la résolution est nettement plus grossière que la maille de la grille. Il est considéré (Golding, 2006) qu'une longueur de grille de cinq unités est nécessaire pour un ajustement précis. Ainsi, le modèle à 1,5 kilomètre devrait donner de bonnes prévisions pour des échelles de 7,5 kilomètres et plus, et un modèle à 4 kilomètres devrait donner des bonnes prévisions sur une échelle de 20 kilomètres. Il est clair, d'après la Figure 7.4, que la résolution de 12 kilomètres ne permet pas d'identifier la forte intensité et la nature localisée de deux cellules principales. Elles sont, toutefois, différenciées par le modèle à 1 kilomètre et sont généralement assez proches du comportement enregistré par le radar.

Une indication des échelles relatives de résolution spatiale et de délais pour la prévision est illustrée en Figure 7.5. Les erreurs concernant la localisation



**Figure 7.4. Comparaison des cumuls de pluie entre 1500 et 1700 (temps universel coordonné, UTC) pour le 3 août 2004. Remarque : les cadres supérieurs (a) et (b) sont des montants effectifs issus du réseau de radars, le cadre (c) indique la prévision à 9 h 00 UTC issue du modèle à 12 kilomètres et le cadre (d) indique la prévision à 0900 UTC issue d'un modèle à 1 kilomètre.**

d'une perturbation dans un modèle de PNT dépendent de la façon dont il a été forcé. Si la perturbation se déplace librement au sein du domaine de prévision, l'erreur risque de s'accroître à environ 6 à 8 kilomètres par heure, sur la base des erreurs types pour la vitesse du vent à une hauteur de quelques kilomètres au-dessus de la surface. Cependant, si la perturbation est conditionnée par la topographie, l'erreur devrait s'accroître beaucoup plus lentement. L'analyse des erreurs dans la prévision du développement des orages individuels suggère que les événements individuels devraient être prévisibles jusqu'à environ trois heures à l'avance. La prévisibilité concerne l'identification d'une caractéristique prévisible. La prévision immédiate se rapporte à la capacité à fournir un suivi détaillé d'un comportement, par exemple le déplacement et des PQP.



\* Système convectif à méso-échelle

**Figure 7.5. Les échelles spatiales des systèmes de précipitations et leur rapport avec la prévisibilité**

Pour des délais extrêmement courts, il n'y a pas assez de temps pour faire tourner un modèle de PNT, et la résolution requise est trop fine pour les modèles actuels en mode opérationnel. Une alternative bon marché est d'utiliser l'extrapolation linéaire des observations radar récentes. Pour les orages isolés, cette approche ne peut fournir des prévisions précises que pour la moitié environ de la durée de l'événement, à savoir 30 minutes, même si pour des tempêtes d'une durée de vie supérieure qui sont organisées en ligne ou en groupe, la prévisibilité peut aller jusqu'à plusieurs heures en avance. STEPS (Storm Electrification and Precipitation Study, étude sur les orages violents et les précipitations) est actuellement utilisée au Royaume-Uni. En plus d'une prévision "la plus probable" des PQP, STEPS fournit des informations probabilistes en perturbant les vecteurs d'extrapolation et en ajoutant une variabilité artificielle à des échelles réduites et non-prévisibles. La prévision extrapolée STEPS est fusionnée avec le modèle PNT à 4 kilomètres, en tirant profit de la représentation améliorée de la tempête dans ce modèle. La précision de localisation



d'un système de prévision immédiate (prévision avec délai de 0 à 12 heures) dépend principalement de la vitesse d'extrapolation. Avec une taille de la maille de 2 kilomètres et un intervalle de 15 minutes entre les images radar, la précision du suivi est susceptible d'être seulement de l'ordre de 1 maille pour 15 minutes, ou de huit kilomètres par heure, bien que STEPS cherche à optimiser ces caractéristiques en combinant les estimations de plusieurs mailles contigües. Au-delà de la moitié de la durée de vie d'une tempête, l'erreur dans la prévision du développement domine et seul le mouvement global du groupe de tempêtes peut être prédit avec cette méthode.

La marge d'erreur inhérente aux PQP a, d'une certaine façon, dissuadé de les utiliser en tant que données d'entrée dans des modèles de prévision hydrologique et de crues, cela étant abordé de façon plus exhaustive au point 7.6. Dans la pratique, cela a permis l'utilisation des PQP dans les applications opérationnelles pour fournir une alerte précoce, ou au mieux, pour leur utilisation dans les modèles de prévision en mode différé en vue de fournir des scénarios «de simulation». Leur utilisation visant à fournir une alerte précoce a stimulé le développement de meilleures informations de PQP, qui utilisent des prévisions basées soit sur des probabilités soit sur des événements déclencheurs, c'est-à-dire une prévision du dépassement d'un seuil prédéterminé sur la base des conditions locales. Les prévisions basées sur des événements déclencheurs sont plus communément utilisées, car elles fournissent une valeur seuil sur laquelle une décision peut être prise sur la base des procédures. Les membres de la communauté des ingénieurs, qui sont généralement soucieux du déroulement des opérations d'annonce des crues, ont exprimé des réserves quant à l'utilisation des prévisions basées sur des probabilités, car elles nécessitent des prises de position concernant des situations déjà complexes.

Un prolongement de l'utilisation des estimations de PQP consiste à convertir la prévision en une estimation de ruissellement. Cette projection ne requiert pas nécessairement l'intervention d'un modèle hydrologique complexe, mais se fonde sur une approche de mise à jour du bilan hydrique. Au Royaume-Uni, le modèle Met Office Surface Exchanges Scheme (MOSES - Schéma d'échange de surface), intégrant un modèle des probabilités de distribution de l'humidité (MOSES-PDM) (Met Office et Centre pour l'écologie et l'hydrologie), est capable de fournir cet indicateur dans le cadre d'un système d'aide à la décision. Aux États-Unis, une méthode similaire est utilisée pour fournir des informations d'alerte de crue. L'avantage d'utiliser une approche à bilan hydrique est que cela prend en compte les conditions des bassins hydrographiques. Par contre, les seuils pluviométriques de déclenchement sont souvent définis à une valeur basse, pour considérer les

conditions les plus défavorables des bassins hydrographiques saturés, ce qui pourrait créer, de façon indésirable, un nombre élevé de fausses alarmes.

## 7.6 ÉVALUATION DE L'INCERTITUDE DES PRÉVISIONS ET PRÉVISION HYDROLOGIQUE D'ENSEMBLE

Le problème de l'incertitude en matière de modélisation a été abordé de façon exhaustive au chapitre 4. L'objet du rappel des tenants et aboutissants de ce thème dans ce chapitre est de mettre en perspective certains exemples opérationnels récents. Toutes les prévisions contiennent une part d'incertitude et l'une des meilleures façons de répondre à cette incertitude est l'utilisation d'ensembles. L'incertitude associée à la prévision hydrologique commence par la météorologie. Sachant que tous les modèles atmosphériques à méso-échelle s'efforcent de modéliser une atmosphère essentiellement chaotique, ce domaine a constitué la première source d'incertitude pendant des années.

Quel que soit le modèle utilisé, la présence d'erreurs est inévitable et le modèle doit être élaboré dans le cadre d'une prévision probabiliste. Les études sur le sujet indiquent une très grande disparité concernant l'adoption de la prévision probabiliste au sein de la communauté des chercheurs (Fox et Collier, 2000; Journal of Hydrology, 2001 – Special Issue on Probabilistic and Ensemble Forecasting, Volume 249). La préférence pour une approche déterministe prévaut toujours même au sein des organismes de prévision hydrologique technologiquement avancés (voir, par exemple, le site Internet du California River Forecast Center [Centre des prévisions fluviales de Californie]). Il faut reconnaître que venir à bout de cette résistance sera une tâche qui prendra du temps et nécessitera une communication considérable, même lorsque les utilisateurs peuvent faire appel à des outils d'aide à la décision qui utilisent les prévisions probabilistes (voir point 7.7). Tandis que les statistiques de performances, tel que discuté au chapitre 4, peuvent être appliquées aux quantités de ruissellement prévu par rapport au ruissellement observé et à la précision des délais (par exemple les pics de crue), l'analyse des événements doit également tenir compte des performances opérationnelles. Cette analyse inclura une étude de l'ordre et de l'échelonnement dans le temps des prévisions et des annonces météorologiques reçues, et s'attachera à déterminer si ces prévisions ont fourni un temps de réponse et une précision quantitative adéquats.

En 2006, le Met Office du Royaume-Uni a réalisé une étude détaillée de la qualité des prévisions et des données fournies à l'Agence pour l'environnement dans le cadre de l'accord visant à soutenir ses opérations de prévision et d'annonce

des crues. Les annonces de fortes précipitations, les PQP, les données radar et les prévisions de tempêtes, de marées et de marées de tempêtes (surcotes) ont toutes été soumises à une vérification rigoureuse pour décider quels éléments devaient être considérés, la façon dont ils pouvaient être évalués et comment un processus automatique de surveillance et d'évaluation pouvait être mis en place pour la fourniture de données (Met Office, 2006). Le développement du programme d'évaluation a souligné l'équilibre qui doit être trouvé entre ce qu'il est souhaitable de mesurer et ce qui est possible dans la pratique. Cet équilibre revient peut-être surtout à établir ce qu'il est utile de savoir, et non à vérifier chaque quantité uniquement parce qu'un chiffre est proposé. Les principaux problèmes et résultats sont résumés ci-après.

L'étude du Met Office souligne le volume même des manipulations de données nécessaires, à la fois lors d'un passage en revue de données historiques sélectionnées et lors de la planification d'une phase opérationnelle ultérieure. Dans le cas du Royaume-Uni, de nombreux produits et données sont générés et distribués électroniquement, et cela, en soi, induit des problèmes sur la façon dont les données sont extraites à des fins de surveillance. Cela devient un problème significatif lorsque l'extraction de données doit avoir lieu en temps réel et que ces données doivent, par la suite, être disponibles sous des formats adaptés aux différents traitements. En utilisant des données historiques, l'étude a été beaucoup moins productive en termes de résultats analytiques que ce qui avait été prévu. Elle a, cependant, permis de tester des méthodes et a généré des directives utiles concernant ce qui peut être ou ne pas être approprié dans un contexte opérationnel.

La disponibilité et l'adéquation des données de terrain s'est avérée être une contrainte à la fois pour l'étude historique et la phase opérationnelle du projet. Il a été démontré que le développement de produits de prévision et les exigences en matière d'observation peuvent être intégrés avec mutuel bénéfice. Des problèmes demeurent concernant ce qui est approprié en termes de représentativité, d'échantillonnage et de relation entre les informations ponctuelles et surfaciques.

Ce projet a utilisé des méthodes statistiques standard pour l'analyse des résultats. En termes d'observation générale des statistiques de performance, certaines des mesures ont généré des résultats très variables, ce qui a rendu difficile la définition de ce qui constitue une cible souhaitable. Ainsi, même s'il a été proposé que des rapports bimensuels soient effectués pour tous les produits, les résultats doivent être passés en revue dans le contexte de performances à plus long terme et la plupart des statistiques doivent être présentées sous

forme de moyennes mobiles sur 12 mois. Les valeurs absolues des statistiques des performances, prises individuellement, n'ont pas une grande utilité, mais le comportement d'une variable spécifique dans le temps peut illustrer des changements concernant la qualité des prévisions. Le projet a identifié que, dans certains cas, une évaluation peut être réalisée au moyen des gammes de valeurs et des seuils de confiance et que cela fournit également une indication utile concernant la précision des prévisions.

L'établissement d'une évaluation à grande échelle pour une large gamme de produits de prévisions n'est pas une tâche facile. La reconnaissance de cet état de fait dans le passé peut avoir influencé sur des décisions, pour déterminer si un tel processus était utile ou non. Une telle évaluation est, pourtant, très bénéfique si elle fournit un meilleur moyen de passer en revue les performances de manière plus objective. Il s'agit d'un progrès par rapport aux jugements subjectifs portant sur des prévisions individuelles, qui peuvent laisser une impression positive ou non, et non d'une mesure factuelle.

## 7.7

### **UTILISATION OPÉRATIONNELLE DE L'INCERTITUDE DES PRÉVISIONS POUR AMÉLIORER LA PRISE DE DÉCISION**

Les techniques de prévision d'ensemble commencent à être utilisées pour la prévision hydrologique par les services hydrologiques opérationnels du monde entier. Ces techniques sont intéressantes car elles permettent la prise en compte des effets d'une large diversité de sources d'incertitude pour les prévisions hydrologiques. Les prévisions doivent non seulement offrir une estimation de l'état futur le plus probable d'un système, mais aussi proposer une gamme de résultats possibles. En effet, les utilisateurs sont souvent plus soucieux d'avoir une estimation quantitative de la probabilité d'effets catastrophiques potentiels que de connaître l'état futur le plus probable. La prévision d'ensemble en hydrologie offre non seulement une approche générale en matière de prévision probabiliste, mais également une approche visant à améliorer la précision des prévisions hydrologiques.

Les organismes internationaux comme le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMET) ont étudié l'utilisation des ensembles basés sur des systèmes convectifs de méso-échelle (SCM) au cours des dernières années et une Expérience d'intercomparaison à grande échelle des prévisions hydrologiques d'ensemble (HEPEX) a été menée depuis 2005. Le principal objectif d'HEPEX est de réunir les communautés hydrologiques et

météorologiques internationales pour montrer comment générer des prévisions hydrologiques d'ensemble de «haute qualité» et fiables. L'objectif est de générer des prévisions qui puissent être utilisées en toute confiance pour aider les acteurs du secteur de l'eau à prendre des décisions d'importance pour l'économie, la santé publique et la sécurité. Il est prévu que des représentants des services hydrologiques opérationnels et des organismes de gestion des ressources en eau participent à la définition et à l'exécution du projet, qui vise à combiner les outils de prévisions actuellement disponibles et à améliorer la qualité des systèmes actuellement disponibles.

De nombreuses questions scientifiques doivent être traitées pour que les services hydrologiques opérationnels puissent utiliser au mieux ces techniques. Voici quelques exemples de ces questions :

- (a) Quelles sont les propriétés des prévisions météorologiques et climatiques ?
- (b) Comment les informations météorologiques et climatiques, y compris les prévisions d'ensemble, peuvent-elles être utilisées de façon fiable ? En d'autres termes, comment les propriétés d'espace et d'échelle de temps du forçage météorologique et climatique, ainsi que les propriétés similaires des systèmes hydrologiques, peuvent-elles être intégrées au mieux dans un système de prévision hydrologique d'ensemble ?
- (c) Comment l'incertitude des prévisions météorologiques se traduit-elle en incertitude hydrologique ?
- (d) Comment les phénomènes océano-atmosphériques à long terme (par exemple, El Niño) affectent-ils la prévision hydrologique à court, moyen et long termes ?
- (e) Quel est le rôle relatif des prévisions météorologiques et climatiques par rapport aux conditions hydrologiques initiales sur la qualité des prévisions hydrologiques ?
- (f) Comment des prévisions hydrologiques d'ensemble peuvent-elles être vérifiées, et que peut être fait pour qu'un système de prévision donné inspire davantage confiance ?
- (g) Quel est le rôle d'un prévisionniste humain ?

Aux États-Unis, le National Weather Service de la NOAA fournit un Service de prévision hydrologique avancé (AHPS) très développé. Dans le cadre d'une nouvelle composante des Climate, Water and Weather Services (Services pour le climat, à l'eau et la météorologie), le AHPS est une suite de produits de prévisions sur Internet, y compris des produits de prévision des crues. Les divers affichages fournissent des informations concernant la magnitude et l'incertitude de l'occurrence des crues, des heures, des jours et même des mois en avance.

Les produits AHPS ont été lancés suite aux grandes inondations du Midwest des États-Unis en 1993

puis en 1997, et couvrent désormais la plupart des bassins hydrographiques. Les produits AHPS sont développés en utilisant une combinaison de modèles informatiques sophistiqués et de gros volumes de données issues de nombreuses sources différentes. Ces sources incluent des superordinateurs, des sondes automatisées, des satellites GOES, des radars Doppler, des stations d'observation météorologique et le système de communications informatisé appelé Automated Weather Interactive Processing System (Système de traitement météorologique interactif automatisé (AWIPS)). Les prévisions hydrologiques peuvent être fournies pour environ 4 000 sites répartis sur le territoire des États-Unis, ces prévisions étant générées par des centres de prévisions fluviales et diffusées par des bureaux décentralisés à une large gamme de clients.

Les informations de prévisions sont présentées via des produits graphiques conviviaux, tel que le niveau de crue prévu qui sera atteint par la rivière et le créneau horaire du pic de crue. Les autres informations incluent :

- (a) Les chances ou la probabilité pour que la rivière excède le niveau d'une crue mineure, moyenne ou majeure ;
- (b) Les chances pour qu'une rivière excède un certain niveau, volume et débit d'eau à des points spécifiques sur la rivière durant des périodes de 90 jours ;
- (c) Une carte des zones contigües du point de prévision qui fournit des informations concernant les routes, les voies ferroviaires et les bâtiments stratégiques susceptibles d'être inondés, ainsi que les autres informations comme les niveaux de crues précédentes.

Une caractéristique supplémentaire du site Internet AHPS est une carte du bassin hydrographique et des divers points le long de la rivière pour lesquels des informations sont disponibles. Une carte type de prévision sur un bassin est illustrée en Figure 7.6.

Des sites individuels au sein d'une zone menacée de crue sont accessibles à partir de l'écran d'affichage, et des hydrogrammes actuels et prévus peuvent être obtenus. Un exemple type est illustré en Figure 7.7. Ce graphique montre les chances pour que le niveau, le débit ou le volume d'eau excède divers niveaux durant la période de prévision indiquée au-dessus du graphique. Des graphiques similaires sont généralement disponibles pour une ou plusieurs de ces variables sur ce même site de prévision. La ligne de simulation conditionnelle (SC) indique la probabilité pour que la rivière excède des niveaux donnés sur la base des conditions actuelles. La ligne de simulation historique (SH) indique la probabilité pour que la rivière excède des niveaux donnés sur la base de toute la gamme des niveaux passés.



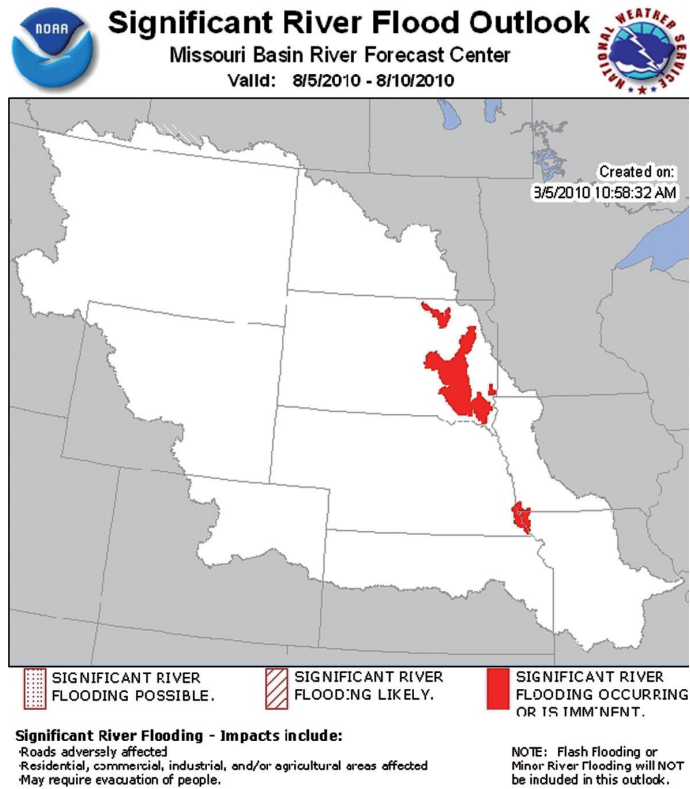


Figure 7.6. Une carte type de prévision AHPS indiquant les zones menacées de crue dans le bassin du Missouri

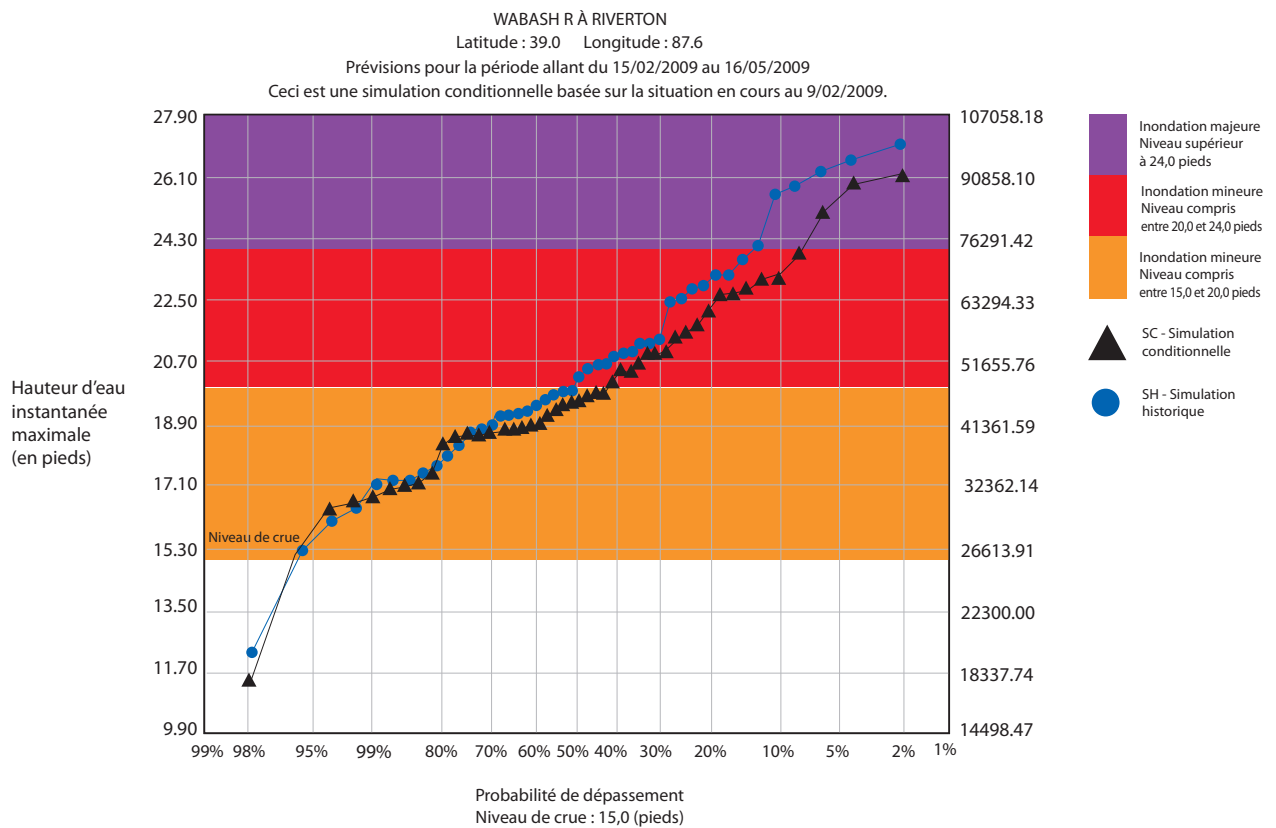


Figure 7.7. Hydrogramme AHPS de probabilité des hauteurs de crue prévues pour la rivière Wabash avec des données de l'EQPF. La ligne SC (simulation conditionnelle) indique la probabilité pour que la rivière excède des niveaux donnés sur la base des conditions actuelles. La ligne SH (simulation historique) indique la probabilité pour que la rivière excède des niveaux donnés sur la gamme totale des niveaux passés.



## CHAPITRE 8

# STRUCTURE ET ORGANISATION DES ANNONCES DE CRUE

### 8.1 IDENTIFICATION DES UTILISATEURS FINAUX ET DE LEURS EXIGENCES

Une annonce de crue convertit une prévision en information de laquelle dépendent de nombreuses mesures d'intervention. Le but fondamental de l'annonce est de permettre aux individus et aux collectivités de réagir de façon appropriée à une menace de crue majeure pour réduire le risque de décès, les dommages et les pertes de biens. L'utilisateur final ultime d'une annonce de crue est le grand public, qui est confronté aux impacts potentiels sur ses habitations, ses propriétés, ses terres, son bétail et ses moyens de déplacements. L'exigence essentielle est que les personnes disposent du temps suffisant pour prendre les mesures qui s'imposent, qui peuvent inclure la mise en place de dispositifs de protection, l'évacuation, ainsi que la mise en sûreté des biens et du bétail. Les annonces de crue sont donc nécessaires pour informer les populations menacées sur l'échéance et l'étendue de la crue, de sorte qu'ils sachent le temps dont ils disposent pour agir, les zones affectées par la crue et, surtout, les itinéraires d'évacuation ou les accès aux abris disponibles.

Il existe généralement plusieurs niveaux d'interaction entre l'organisation qui émet l'annonce et les divers organismes qui ont des interventions à réaliser pour gérer les impacts potentiels et réels. Dans de nombreux cas, chaque organisation aura son propre système organisationnel pour mettre en application les mesures requises face à une situation de crue. Il convient également de noter que le niveau et le détail d'implication de chaque organisation peut varier conformément au stade de développement ou à la gravité de la crue. Il est important que l'organisme responsable de l'émission des prévisions et annonces possède une bonne compréhension des rôles et responsabilités des autres organismes concernés. Il incombe, toutefois, aux organisations principales, par exemple un ministère chargé de la planification des mesures d'urgence ou toute autre organisme gouvernemental central de haut niveau, d'établir la façon dont ces liens opèrent et de coordonner des réunions régulières d'organisation et d'évaluation. Cela garantit que les connaissances soient conservées par les organisations et non par les individus, que tout changement de structure ou de fonction soit compris, et que les enseignements tirés des événements précédents soient intégrés pour améliorer les performances futures.

Il existe divers exemples de chaînes et de groupes d'information impliqués dans le processus d'annonce des crues complet. Ceux-ci ont évolué et se sont adaptés au contexte et aux exigences existantes, de sorte qu'il n'y a pas de modèle «type» à suivre. Généralement, une organisation émettra des annonces à son personnel interne, aux autres services de l'Etat, à la presse et aux médias, ainsi qu'au public en général. Lorsque l'organisation émettrice fait partie d'une structure de gestion de l'eau, l'annonce interne doit préparer le personnel à d'autres mesures d'atténuation des crues. Celles-ci incluent :

- (a) La mise à disposition de personnel pour un centre de contrôle des événements ;
- (b) La mise en place d'observateurs sur le terrain pour une signalisation accrue ;
- (c) La mise en alerte des équipes de maintenance et de réparation d'urgence en cas de dégâts aux infrastructures de protection contre les crues ;
- (d) La préparation du personnel aux relations avec le public et les médias par la fourniture des informations nécessaires concernant l'événement;
- (e) La garantie que les données électroniques et les moyens d'information soient régulièrement mis à jour, par exemple via un site Internet en accès public.

Des annonces externes sont généralement émises à l'intention des entités suivantes :

- (a) Les autres Services de l'Etat impliqués dans la gestion des crues et des situations d'urgence ;
- (b) Les autorités gouvernementales locales, par exemple les conseils municipaux et de districts ;
- (c) Les services d'urgence, en particulier la police, les pompiers et, dans les cas extrêmes, l'armée ;
- (d) Les organisations non-gouvernementales (ONG) impliquées dans les actions de secours et de sauvetage, par exemple le Comité international de la Croix-Rouge (CICR), Oxfam et USAid ;
- (e) Le grand public, la presse et les médias ;
- (f) Les bâtiments et autres lieux individuels prioritaires.

### 8.2 DÉFINITION SPATIALE DES ANNONCES

Les annonces de crues doivent être spécifiques aux bassins hydrographiques et cours d'eau particuliers, même si des annonces précoces peuvent être définies pour une zone géographique au sein de

laquelle un certain nombre de rivières peuvent être affectées. Les annonces peuvent être liées à un système de prévisions météorologiques évolué, par lequel une annonce est émise du genre «un front chaud en provenance de l'Ouest s'accompagnera de fortes précipitations plusieurs heures durant, avec des risques de crue dans certaines régions du Pays de Galles».

La propagation dans le cours d'eau, soit lorsque l'onde de crue se déplace vers l'aval ou lorsque les tronçons inférieurs sont affectés par de fortes marées ou par le débordement des systèmes d'évacuation des eaux, conduit à la préparation et à l'émission d'annonces de crue basées sur des tronçons de rivières. Ainsi, sur un grand fleuve, comme le Rhin ou le Gange, où le temps de parcours de l'onde de crue prend plusieurs jours, les tronçons peuvent faire quelques centaines de kilomètres de long. Dans les bassins hydrographiques de plus petite taille, où le passage de l'onde de crue prend un à deux jours, une longueur de tronçon appropriée sera de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres. Un tronçon peut être délimité par une station de suivi de crue à ses extrémités en amont et en aval. Cette approche n'est utile que lorsque l'on sait si les zones riveraines peuvent être affectées par la crue, ou s'il existe certains «points critiques» en termes d'inondations le long du tronçon.

En Angleterre et au Pays de Galles, l'Environment Agency (Agence pour l'environnement) a abandonné le concept d'un réseau basé sur des tronçons pour se concentrer sur les zones spécifiques où le risque est élevé et où les crues auront l'impact le plus fort. Grâce à cette approche, les annonces de crues se focalisent sur les rivières passant par les zones urbaines ou les points clés où des réseaux de communication ou des infrastructures majeures sont menacés.

La définition spatiale des annonces doit également être adaptée du point de vue de la gestion des incidents et des opérations. Cela permet la mise en place d'une certaine hiérarchie au niveau des zones opérationnelles, les plus locales étant celles pour lesquelles les annonces et les interventions peuvent être coordonnées sur place, par exemple par les équipes de travail d'urgence et la mise en relation avec les collectivités et la police. Pour la gestion stratégique des ressources et la coordination des événements de plus grande portée, plusieurs zones opérationnelles plus petites peuvent être combinées. Pour chapeauter le tout, il peut y avoir une organisation nationale, qui coordonne et rend compte au plus haut niveau durant un événement majeur.

## 8.3 DÉLAIS DES ANNONCES MÉTÉOROLOGIQUES ET DE CRUES

### 8.3.1 Considérations générales

Il n'existe aucune règle stricte pour la définition des délais pour les annonces. Le niveau d'exigence dépend du besoin opérationnel spécifique et repose sur un certain nombre de considérations, notamment :

- (a) La taille du bassin hydrographique et la nature des inondations : les grands bassins hydrographiques avec de vastes plaines inondables ont un temps de réponse lent, tandis que les bassins hydrographiques amonts dans les régions vallonnées à fortes déclivités, à l'inverse, offrent peu de chances de fournir des annonces précoces d'inondations ;
- (b) La nature du risque et des impacts, et la décision de procéder ou non à une évacuation ou de fournir des dispositifs de protection physiques (par exemple, des sacs de sable, le renforcement des digues) ;
- (c) La décision d'utiliser ou non une approche d'alertes et d'annonces par niveaux.

Les délais dépendent non seulement de la mesure d'intervention appropriée en rapport avec l'annonce de crue, mais aussi du type d'informations disponibles. La discussion dans les sous-sections suivantes considère le rôle des annonces météorologiques et des annonces de crues (hydrologiques).

### 8.3.2 Annonce météorologique

Les annonces météorologiques à des fins d'annonce de crues sont dérivées de prévisions météorologiques plus générales. La Figure 8.1 illustre la relation entre les délais des divers types de prévisions météorologiques et le temps de réaction. Cela repose sur les pratiques au Royaume-Uni coordonnées entre les services d'annonce de crues du Met Office (Bureau météorologique) et de l'Environment Agency (Agence pour l'environnement), mais les principes sont similaires, quel(le) que soit l'échelle ou le pays.

Les prévisions à long terme, à savoir, celles correspondant à des périodes de plusieurs semaines ou plusieurs mois, ne sont pas suffisamment détaillées ou précises dans le cadre du processus d'annonce des crues, malgré des efforts considérables en matière de recherche et de développement pour améliorer leur précision. Cette méthode peut présenter des avantages dans une région qui est soumise à un régime de crues annuelles régulier, par exemple dans une région d'Asie au climat de mousson ou dans une zone de convergence intertropicale (ZCIT) d'Afrique, où une prévision avancée pourrait optimiser les mesures préparatoires.

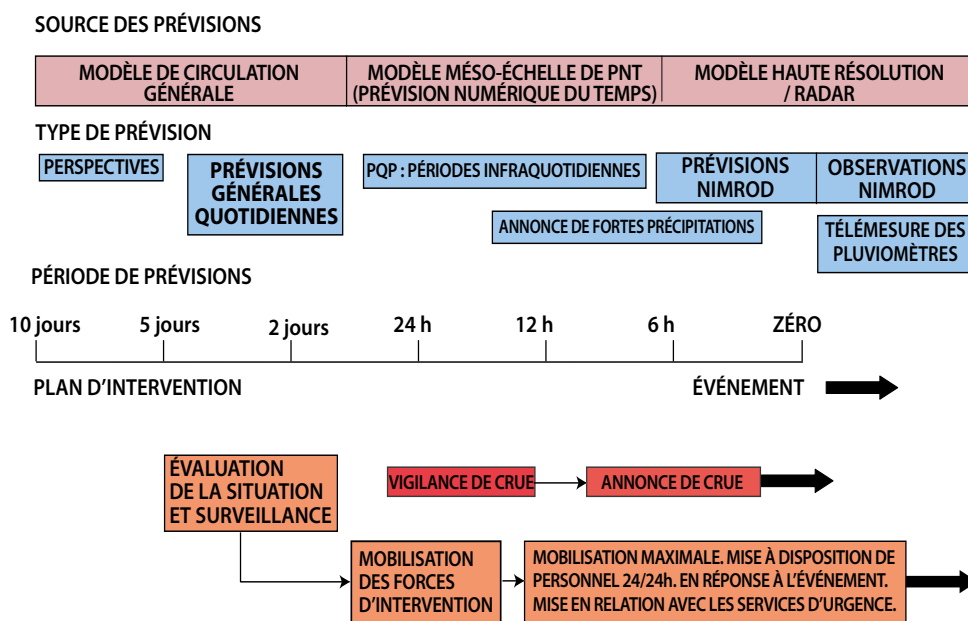


Figure 8.1. Diagramme schématique des délais de prévision de crue

En Afrique du Sud, par exemple, la prévision d'un événement El Niño est utilisée pour une planification précoce du Department of Water Affairs and Forestry (Ministère sud-africain des eaux et forêts).

Les prévisions dans une gamme de 5 à 10 jours affichent désormais un indice de confiance élevé en termes de caractéristiques météorologiques majeures, par exemple le suivi des tempêtes. Ces prévisions sont particulièrement utiles pour les grands bassins ou secteurs hydrographiques en tant qu'indicateur d'un événement d'une magnitude potentiellement élevée, en particulier si les bassins hydrographiques doivent faire face à des niveaux d'eau élevés ou s'il existe un risque lié à la fonte des neiges. L'avantage de ces prévisions est principalement d'aider aux travaux de préparation.

En-dessous de cinq jours, les prévisions peuvent fournir des informations plus précises sur la localisation et l'intensité d'un événement, même si cela reste insuffisant pour fournir des annonces de crues locales spécifiques. Certaines informations pluviométriques quantitatives générales peuvent être fournies, mais les créneaux horaires sont toujours incertains. C'est pour les délais inférieurs à deux jours que les prévisions météorologiques peuvent présenter des avantages pour le processus d'annonce de crues. Dans les grands bassins hydrographiques, une prévision de fortes précipitations avec un délai de deux jours est importante durant les périodes où le niveau des rivières est déjà élevé, et de nouvelles hausses pourraient affecter les transports et les zones menacées d'inondations. C'est le cas, par exemple, pour le delta du Gange-Brahmapoutre en Inde et

au Bangladesh durant la saison de la mousson, et pour les grands bassins hydrographiques européens comme ceux de l'Elbe et du Rhin. Même dans les bassins hydrographiques avec un temps de réponse inférieur à un jour, la prévision peut aider les autorités d'annonce des crues à prendre les premières décisions concernant le niveau des effectifs et les mesures de préparation relatives aux activités locales de protection anti-crue, jusqu'à éventuellement émettre un avertissement ou une alerte précoce pour le grand public.

Lorsque l'événement est imminent, soit par le développement d'une situation (le déclenchement d'une convection ou le rapprochement d'une dépression), ou si un événement extrême affecte des bassins hydrographiques adjacents, alors des prévisions météorologiques détaillées fournissent un outil significatif pour contribuer aux décisions et mesures d'annonce de crues. Des bassins hydrographiques spécifiques et donc leurs localités menacées peuvent alors recevoir une annonce précoce. Dans le cadre infraquotidien, et notamment pour les délais de 6 à 12 heures, les prévisions numériques peuvent être suffisamment détaillées pour fournir des données quantitatives aux modèles de prévision de crues. Au Royaume-Uni, le Système de prévision d'ensemble à court terme (STEPS) assimile progressivement les données satellite et radar à mesure que l'heure de déclenchement du modèle de prévision approche, et ces informations sont générées sur la base d'une grille et sont donc tout à fait adaptées aux données utilisées par les modèles distribués. Alors que l'Environment Agency (Agence pour l'environnement) a établi une norme de service pour fournir les annonces de crues avec un

délai minimum de deux heures, il est possible que dans certains bassins hydrographiques à temps de réponse rapide une annonce puisse être émise sur la base d'une prévision météorologique, mais, à ce jour, cela n'a pas encore été réalisé. Aux États-Unis, les alertes de crue-éclair sont émises à partir de la connaissance des conditions météorologiques.

Les prévisions météorologiques par radar sont particulièrement adaptées aux informations à délais courts pour actualiser et fournir plus de détails dans une situation critique. La visualisation d'une séquence d'images radar à des intervalles de 30 minutes ou d'une heure fournira une bonne définition qualitative du déplacement et du développement des orages et peut donc être utilisée pour annoncer que l'orage s'approche des bassins hydrographiques. Ce délai dépend de la nature du système qui produira les précipitations. Les échos pluviométriques associés avec un front ou une dépression peuvent être suivis pendant quelques heures, tandis que le développement rapide des cellules convectives et la localisation de leur déplacement peuvent être plus variables, fournissant ainsi des annonces de une à trois heures, conformément au cycle de vie des cellules convectives.

**8.3.3 Annonce de crue**

Une annonce hydrologique de crue repose sur des conditions connues (observées) et des prévisions hydrologiques. Ce processus peut impliquer divers degrés de sophistication, de l'utilisation de techniques de corrélation simples entre les sites en amont et en aval à des systèmes d'annonce complexes basés sur des modèles hydrologiques ou hydrauliques. À l'instar des annonces météorologiques, les délais pour les événements de rivière sont basés sur la taille

et le temps de réponse, mais il faut que le système hydrologique réagisse déjà à l'événement avant que les prévisions puissent être effectuées. Pour les grands fleuves, par exemple le Nil, l'Indus et le Rio de la Plata, l'évolution des conditions extrêmes vers l'aval doit permettre la fourniture d'annonces plusieurs jours en avance. À l'autre extrémité de l'échelle, des délais d'annonce minimaux peuvent être établis pour prendre en compte la capacité de recevoir des données et des prévisions en temps voulu, ainsi que le temps nécessaire pour la mise en place des mesures d'intervention requises. Cette limite inférieure est particulièrement pertinente pour les bassins hydrographiques à fortes déclivités et pour ceux situés dans les zones urbaines.

La Figure 8.2 représente la relation entre l'information, le délai et les mesures d'intervention d'une façon similaire au processus de prévision illustré en Figure 8.1. Sur l'ensemble du processus, la comparaison entre les observations et les prévisions doit être maintenue pour permettre la gestion des mesures d'intervention. Cela est particulièrement pertinent pour la mise en relation avec les services d'urgence et d'autres organismes en dehors de l'organisation de surveillance des crues, pour donner un délai suffisant en vue d'échelonner les différents niveaux d'intervention ou de rétrograder le niveau d'alerte.

**8.4 SÉLECTION DU NIVEAU DE GRAVITÉ DES ANNONCES DE CRUES**

Le système d'annonce de crues s'appuie sur des «seuils de déclenchement» en relation avec le

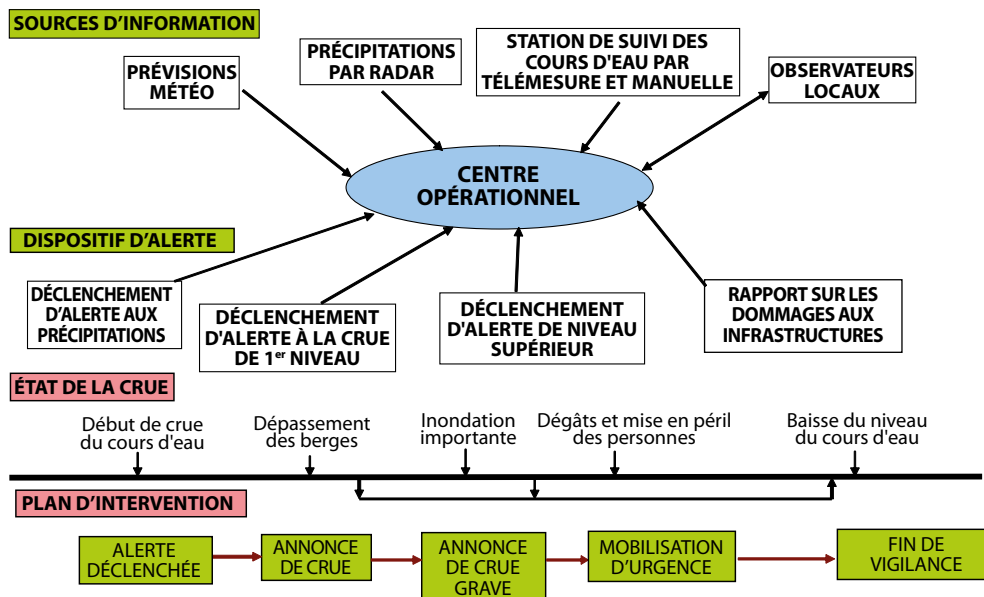


Figure 8.2. Annonces de crue et mesures d'intervention

niveau critique des rivières ou les quantités de précipitations qui sont indicatifs de l'approche ou de l'aggravation d'une crue. Les seuils de déclenchement initient certaines actions ou la fourniture d'informations aux utilisateurs externes. Ils sont utilisés pour décider du moment d'entreprendre certaines actions durant un événement de crue et doivent être conçus pour donner assez de temps pour entreprendre les mesures d'intervention. Par exemple, si le niveau d'une rivière atteint un certain seuil, cela peut signifier qu'une zone ou une collectivité sera inondée dans quelques heures et la mesure d'intervention pourrait être l'évacuation du village. Les seuils de déclenchement liés aux précipitations incluent :

- (a) Les cumuls dépassant un certain seuil sur une période de temps donnée, par exemple 100 millimètres en 12 heures ou moins ; il est possible que ce seuil doive être modifié selon la saison ;
- (b) Les cumuls de précipitations et les conditions d'humidité des bassins hydrographiques ;
- (c) L'intensité des précipitations dépassant un taux donné ; cela est particulièrement important dans les zones urbaines où les capacités d'évacuation des eaux pluviales peuvent être dépassées et des crues éclair peuvent se produire.

Les seuils de déclenchement liés au niveau d'eau incluent :

- (a) Le niveau des rivières augmentant jusqu'à un niveau de vigilance défini, par exemple un mètre en deçà du niveau de danger ;
- (b) La vitesse de montée du niveau est plus rapide qu'un seuil défini, par exemple 25 centimètres par heure.

Les seuils de déclenchement doivent être établis par une étude précise des conditions locales. Les conseils et connaissances de la collectivité locale sont donc, s'ils sont disponibles, très importants à prendre en compte. Les seuils de déclenchement ne doivent être ni arbitraires ni standard au sein d'une organisation, par exemple à un mètre du niveau «de danger» mais liés aux conditions et caractéristiques locales du risque. Lorsque des niveaux sont concernés, ceux-ci doivent être associés à des événements significatifs, par exemple :

- (a) Le niveau auquel l'eau s'écoule depuis un canal vers la plaine inondable ;
- (b) Le niveau d'eau qui submerge les zones de terres utilisées pour le bétail, ou auquel les routes situées en contrebas deviennent inondées ;
- (c) Le niveau auquel des zones importantes, incluant propriétés résidentielles et zones d'activité, et des réseaux de communication sont affectés ;
- (d) Le niveau pour lequel la profondeur associée à la vitesse de l'eau représente une menace de

dégâts aux infrastructures et un danger pour les vies humaines.

Pour définir des seuils de déclenchement appropriés pour la prévision des inondations urbaines, les critères utilisés pourraient être basés sur une prévision qui annoncerait un risque élevé (probabilité d'occurrence d'au moins 30 pour cent) de crue. Un exemple général pour les niveaux d'annonce des crues est illustré en Figure 8.3. Un diagramme illustrant la relation entre la prévision et l'annonce de crue depuis la prévision des précipitations jusqu'à la fin de l'événement est présenté en Figure 8.4.

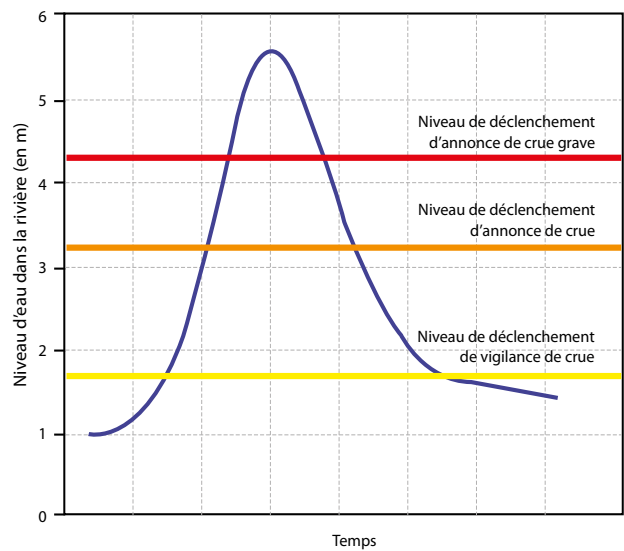


Figure 8.3. Définition des seuils de déclenchement pour les divers niveaux d'annonce de crue

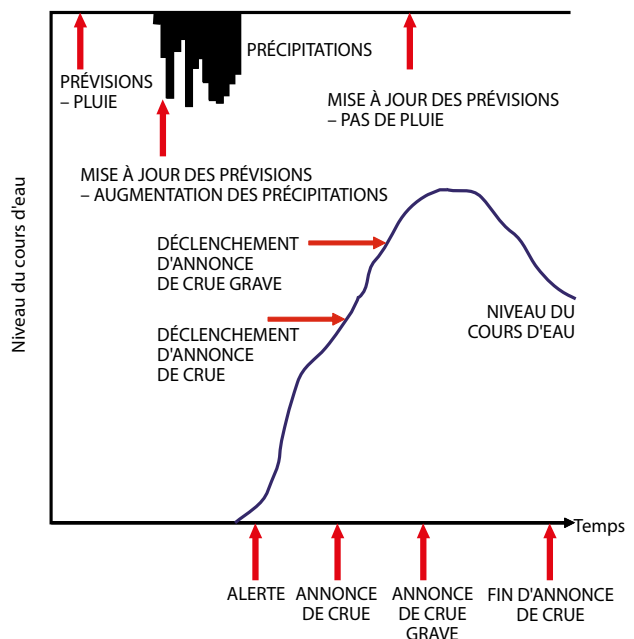


Figure 8.4. Diagramme schématique de prévision et d'annonce de crue

Les seuils de déclenchement pour les annonces de crue doivent être définis de sorte qu'ils ne soient pas atteints trop fréquemment, de façon à ne pas créer des réactions ou des perturbations inutiles. Une fréquence élevée peut également induire une attitude négligente de la part des opérateurs et du public, car les annonces ne sont plus considérées sérieusement. Un problème similaire existe si trop de fausses alertes sont données. Il est crucial de trouver le bon équilibre entre le principe de précaution et la crainte d'émettre des annonces se transformant en «fausses alertes». Un système d'alerte par niveaux permet généralement d'éviter ce genre de problèmes, dans la mesure où les différents niveaux et leurs implications sont clairement compris. Ce système doit surtout permettre de rétrograder le niveau d'alerte si les conditions s'améliorent ou si les prévisions évoluent.

Les «fausses» alertes sont inévitables étant donnée la nature des événements météorologiques et hydrologiques. Sur la durée, elles doivent représenter une petite proportion, par exemple 20 pour cent des prévisions émises, ou du nombre de prévisions correctes. De la même façon, le nombre de fois où des alertes et des annonces sont émises ne doit pas être excessif. À mesure que l'expérience des opérateurs et des utilisateurs se développe, les seuils de déclenchement peuvent être modifiés pour refléter l'équilibre entre les prévisions correctes et les fausses alertes. Un chiffre indicatif ne dépassant pas les cinq événements par an pour un lieu donné, moyenne obtenue sur plusieurs années, est considéré comme adéquat dans les régions où les inondations sont irrégulières.

## 8.5 PRÉSENTATION DES ANNONCES DE CRUES AUX UTILISATEURS

### 8.5.1 Symboles d'annonce de crue

De graves inondations se sont produites en Angleterre et au Pays de Galles en 1998, et certains se sont émus du manque d'efficacité des annonces. L'évaluation ultérieure conduite à de haut niveau par le gouvernement a souligné la nécessité d'une meilleure communication avec le public en matière d'inondations, en particulier en ce qui concerne la fourniture d'annonces de crues plus claires. Il a été question de remplacer les codes couleurs qui, d'après le rapport, se sont révélés être source de confusion et d'incompréhension par «quasiment tous ceux qui les ont reçus». Les codes couleurs (par exemple, jaune, orange, rouge) ou les codes à base de symboles faisant référence à d'autres aléas météorologiques (par

exemple les signaux coniques ou à drapeaux utilisés pour les annonces cycloniques au Bangladesh) ne sont généralement compris que par les professionnels directement impliqués, et le personnel des services d'urgence lui-même ne comprend pas toujours bien la signification ou les implications du code.

Le système qui a été introduit au Royaume-Uni à la suite de cette évaluation est la combinaison d'un symbole utilisant une illustration simplifiée, à laquelle des instructions spécifiques sont associées. La sensibilisation et l'information sur les symboles et les instructions ont été diffusées par le biais d'une campagne publicitaire exhaustive incluant des affiches promotionnelles, la télévision, des brochures et les centres d'information au public (bibliothèques, bureaux du conseil). Ces symboles sont désormais utilisés pour les prévisions météorologiques à la télévision lorsque des situations de vigilance surviennent. Les symboles et instructions explicatives sont indiqués dans le tableau ci-contre.

Ces types de symboles peuvent être considérés comme génériques et utilisent donc des représentations typiques des constructions locales. Au Bangladesh, au Mozambique et dans d'autres pays, d'autres représentations visuelles, visant à véhiculer le message aux populations illettrées, ont été développées.

### 8.5.2 Exemples d'informations sur les annonces de crues

Une large gamme de formats d'information sont utilisés par les services météorologiques et hydrologiques nationaux (SNHM) du monde entier. Pour qu'un service de prévision et d'annonce de crue en cours de développement puisse se rendre compte de la gamme d'informations et de formats de présentation utilisés, une sélection des résultats de prévision et d'annonce des crues disponibles en provenance des sites Internet des services nationaux de prévision et d'annonce des crues est indiquée au niveau des points 8.5.2.1 à 8.5.2.3 et des Encadrés 8.1 à 8.5.

Le site Internet fournissant l'annonce de crue comporte également des liens vers des affichages graphiques et cartographiques. La Figure 5.4 (chapitre 5) peut être considérée comme un exemple type, qui indique l'évolution récente du niveau de la rivière ainsi que la prévision hydrologique et la définition des différents niveaux d'annonce et de danger. Cette méthode d'illustration des informations actuelles et prévues a été adoptée au Bangladesh, mais certaines autorités considèrent que ce niveau d'information pourrait entraîner une certaine confusion ou des paniques inutiles.



## Symboles d'annonce de crue pour le Royaume-Uni et instructions associées

**Vigilance de crue**

« Il s'agit du premier niveau de vigilance. Si votre secteur fait l'objet d'une vigilance crue, cela signifie qu'il est possible qu'une inondation survienne. Nous vous conseillons de suivre attentivement les bulletins d'information de la radio locale ou de la télévision, d'alerter vos voisins, de surveiller le niveau des cours d'eau, de garder près de vous vos animaux de compagnie, de remettre à plus tard tous vos déplacements, de vous assurer de pouvoir mettre en application le plan d'évacuation en cas de crue et d'appeler la ligne d'assistance téléphonique dédiée aux crues pour obtenir davantage d'informations et de conseils. »

**Annonce de crue**

« Si votre secteur fait l'objet d'une annonce de crue, cela signifie que des inondations vont se produire et occasionner des dégâts. À ce stade, nous vous conseillons de mettre vos animaux de compagnie, véhicules, denrées alimentaires, objets de valeur et autres articles en sécurité, de vous préparer à couper le gaz et l'électricité, de vous tenir prêts pour l'évacuation de votre domicile, et de positionner des sacs de sable ou des batardeaux pour protéger votre maison. »

**Annonce de crue grave**

« Ceci est une annonce de crue émise lorsque de graves inondations sont attendues et que le danger pour les biens et les personnes est imminent. Si l'annonce de crue qui vous concerne arrive à ce niveau, vous devez vous préparer à ce que vos alimentations en gaz, électricité, eau et téléphone soient coupées. Nous vous conseillons de garder votre calme et de rassurer les autres personnes, ainsi que de coopérer avec les services d'intervention d'urgence. »

**Fin d'alerte**

« Ceci est un avertissement émis lorsque la décrue s'amorce et que plus aucune vigilance ou annonce de crue n'est en vigueur. À ce niveau, vous pouvez vérifier s'il est possible de retourner chez vous sans danger. »

## 8.5.2.1 États-Unis

Les exemples suivants sont issus du site Internet de la NOAA :

## (a) Vigilance de crue (Encadré 8.1) :

**Encadré 8.1**

VIGILANCE DE CRUE, SERVICE MÉTÉOROLOGIQUE NATIONAL DE CHARLESTON WV  
4 H 01 (HEURE NORMALE DE LA COTE EST) MER 28 JAN 2009

GREENUP-CARTER-BOYD-LAWRENCE KY-GALLIA-LAWRENCE OH-WAYNE-CABELL-MASON-JACKSON WV-LINCOLN-PUTNAM-KANAWHA-ROANE-WIRT-CALHOUN-MINGO-LOGAN-BOONE-CLAY-BRAXTON-GILMER-NICHOLAS-WEBSTER-Y COMPRIS LES VILLES DE...FLATWOODS...GREENUP...GRAYSON...OLIVE HILL...ASHLAND...LOUISA...GALLIPOLIS...IRONTON...SOUTH POINT...KENOVA...CEREDO...WAYNE...HUNTINGTON...POINT PLEASANT...NEW HAVEN...RAVENSWOOD...RIPLEY...HARTS...ALUM CREEK...HAMLIN...TEAYS VALLEY...HURRICANE...CHARLESTON...SOUTH CHARLESTON...SAINT ALBANS...SPENCER...ELIZABETH...GRANTSVILLE...WILLIAMSON...LOGAN...CHAPMANVILLE...MAN...MADISON...CLAY...SUTTON...GASSAWAY...BURNSVILLE...GLENVILLE...SUMMERSVILLE...RICHWOOD...CRAIGSVILLE...WEBSTER SPRINGS

...LA VIGILANCE DE CRUE RESTE EN VIGUEUR PENDANT TOUTE LA SOIRÉE...

LA VIGILANCE DE CRUE DEMEURE POUR

- \* CERTAINES PARTIES DU NORD-EST DU KENTUCKY...DU SUD-EST DE L'OHIO ET DE LA VIRGINIE OCCIDENTALE...Y COMPRIS LES SECTEURS SUIVANTS...DANS LE NORD-EST DU KENTUCKY...BOYD...CARTER...GREENUP ET LAWRENCE KY. DANS LE SUD-EST DE L'OHIO...GALLIA ET LAWRENCE OH. EN VIRGINIE OCCIDENTALE... BOONE... BRAXTON...CABELL...CALHOUN...CLAY...GILMER...JACKSON WV...KANAWHA...LINCOLN...LOGAN...MASON... MINGO...NICHOLAS... PUTNAM...ROANE...WAYNE...WEBSTER ET WIRT.
- \* PENDANT TOUTE LA SOIRÉE
- \* UN IMPORTANT SYSTÈME ORAGEUX HUMIDE CONTINUERA D'OCCUPER CE SECTEUR CE MATIN APPORTANT ESSENTIELLEMENT DES PRÉCIPITATIONS. LE VOLUME SIGNIFICATIF DES PRÉCIPITATIONS TOTALES...SUR DES SOLS DÉJÀ SATURÉS OU, DANS CERTAINS CAS, RECOUVERTS DE NEIGE...PEUT PROVOQUER DES INONDATIONS.
- \* UNE ÉLÉVATION DU NIVEAU DES COURS D'EAU ET DES RUISSEAUX...ET L'ACCUMULATION D'EAU DANS LES ZONES BASSES ET LES DÉPRESSIONS HABITUELLEMENT VULNÉRABLES...EST PRÉVUE. LE NIVEAU DU COURS PRINCIPAL DES RIVIÈRES PEUT ÉGALEMENT CONNAÎTRE UNE HAUSSE SIGNIFICATIVE.

UNE VEILLE DE CRUE SIGNIFIE QU'IL EXISTE UN RISQUE POTENTIEL D'INONDATIONS SUR LA BASE DES PRÉVISIONS ACTUELLES. VOUS DEVEZ VÉRIFIER LES TOUTES DERNIÈRES PRÉVISIONS ET ÊTRE RÉACTIFS QUANT AUX ANNONCES DE CRUE POTENTIELLES. LES POPULATIONS VIVANT DANS DES ZONES À RISQUE DOIVENT ÊTRE PRÉPARÉES À PRENDRE LES MESURES NÉCESSAIRES EN CAS D'INONDATION.

## (b) Annonce de crue (Encadré 8.2) :

**Encadré 8.2**

ANNONCE DE CRUE, SERVICE MÉTÉOROLOGIQUE NATIONAL DE LOUISVILLE KY  
8 H 40 (HEURE NORMALE DE LA COTE EST) MER 28 JAN 2009

LE SERVICE MÉTÉOROLOGIQUE NATIONAL DE LOUISVILLE A ÉMIS UNE ANNONCE DE CRUE\* POUR LE...  
COMTÉ D'ADAIR DANS LE CENTRE SUD DU KENTUCKY... COMTÉ DE CASEY DANS LE CENTRE SUD DU KENTUCKY...  
COMTÉ DE CLINTON DANS LE CENTRE SUD DU KENTUCKY... COMTÉ DE CUMBERLAND DANS LE CENTRE SUD DU  
KENTUCKY... METCALFE DANS LE CENTRE SUD DU KENTUCKY... COMTÉ DE MONROE DANS LE CENTRE SUD DU  
KENTUCKY... COMTÉ DE RUSSELL DANS LE CENTRE SUD DU KENTUCKY...

- \* JUSQU'À 13 H 30 (HEURE NORMALE DU CENTRE)/14 H 30 (HEURE NORMALE DE LA COTE EST)/
- \* À 7 H 35 (HEURE NORMALE DU CENTRE)/8 H 35 (HEURE NORMALE DE LA COTE EST)/ PLUSIEURS ROUTES ONT ÉTÉ FERMÉES DANS LE SECTEUR EN RAISON DU NIVEAU ÉLEVÉ DES COURS D'EAU.

UNE ANNONCE DE CRUE SIGNIFIE QUE DES INONDATIONS SONT IMMINENTES OU ONT ÉTÉ SIGNALÉES. LA MONTÉE DES EAUX SERA LENTE ET AUCUNE CRUE ÉCLAIR N'EST PRÉVUE. TOUTEFOIS...TOUTES LES ENTITÉS/PERSONNES CONCERNÉES DOIVENT PRENDRE IMMÉDIATEMENT LES MESURES QUI S'IMPOSENT.

DES CUMULS DE PRÉCIPITATIONS SUPPLÉMENTAIRES D'ENVIRON 13 MM SONT À PRÉVOIR DANS LA ZONE EN ALERTE.

NE PRENEZ PAS VOTRE VÉHICULE DANS LES ZONES OÙ LA ROUTE EST DÉJÀ SUBMERGÉE. LA PROFONDEUR DE L'EAU PEUT ÊTRE TROP IMPORTANTE POUR QUE VOTRE VOITURE PUISSE TRAVERSER EN TOUTE SÉCURITÉ. DIRIGEZ-VOUS VERS DES TERRES PLUS EN HAUTEUR.

(c) Annonce de crue éclair (Encadré 8.3) :

**Encadré 8.3**

ANNONCE DE CRUE ÉCLAIR, SERVICE MÉTÉOROLOGIQUE NATIONAL DE PADUCAH KY  
ÉMIS PAR LE SERVICE MÉTÉOROLOGIQUE NATIONAL DE SPRINGFIELD MO  
H 11 (HEURE NORMALE DU CENTRE) LE MER 28 JAN 2009

UNE ANNONCE DE CRUE ÉCLAIR RESTE EN VIGUEUR JUSQU'À MIDI (HEURE NORMALE DU CENTRE) POUR LE COMTÉ DE CHRISTIAN...

À 4 H 00 (HEURE NORMALE DU CENTRE)...LES RESPONSABLES DU COMTÉ DE CHRISTIAN ONT AVERTI VIA LE SERVICE MÉTÉOROLOGIQUE NATIONAL QUE LA RIVIÈRE LITTLE RIVER AVAIT DÉBORDÉ ET AVAIT COMMENCÉ À SUBMERGER LA ROUTE CHURCH ROAD DE LITTLE RIVER. À CE STADE...L'ONDE DE CRUE APPROCHAIT LA COLLECTIVITÉ DE HOPKINSVILLE. LE COMMISSARIAT DE POLICE DE HOPKINSVILLE PRÉCONISE QUE QUICONQUE AUX ABORDS DES ZONES MENACÉES DE CRUE AU SEIN DE LA VILLE DOIT SE DIRIGER IMMÉDIATEMENT VERS DES TERRES PLUS EN HAUTEUR. LES ZONES RÉSIDENIELLES AU SEIN DE LA VILLE SONT MENACÉES DE CRUE.

LE RUISSELLEMENT PROVENANT DE CET EXCÉDENT DE PRÉCIPITATIONS PEUT ÉGALEMENT PROVOQUER DES INONDATIONS DANS D'AUTRES SECTEURS DU COMTÉ. LES RUISSEAUX...LES COURS D'EAU ET LES GUÉS SERONT NOTAMMENT MENACÉS PAR LES DANGERS D'UNE CRUE ÉCLAIR.

### 8.5.2.2 Australie

Comme cela est le cas aux États-Unis, les prévisions et annonces de crue en Australie sont gérées et émises par le Service météorologique national, le Bureau of Meteorology. Les informations sont répercutées en cascade du niveau national au niveau des États, la Figure 8.5 présentant l'exemple du nord du Queensland.

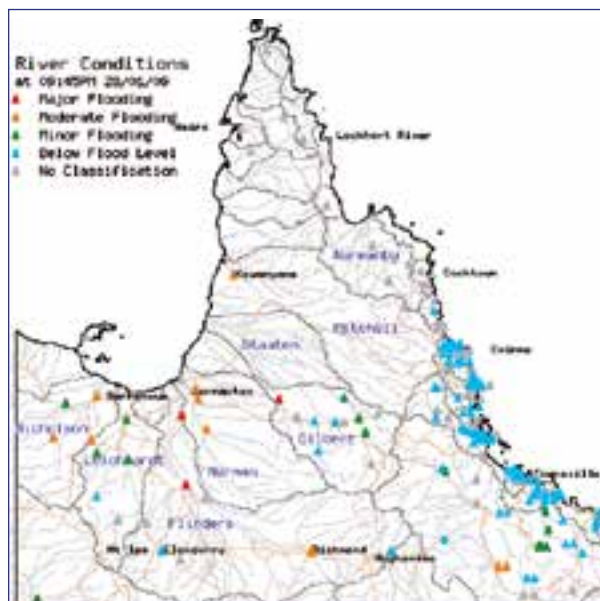


Figure 8.5. Carte régionale de la situation de crue, Nord Queensland, Australie

Source : Bureau of Meteorology (Bureau de la météorologie), Australie (<http://www.bom.gov.au>)

Sur le site Internet cité dans la figure, les informations d'annonce de crue sont obtenues en cliquant sur l'un des triangles rouges (signalant une crue majeure, détails dans l'Encadré 8.4 ci-dessous). Il convient de noter que les informations sont précédées d'une référence numérotée séquentiellement (ou identifiant), ce qui évite toute confusion si les annonces sont actualisées pour la même localisation.

(a) Annonce de crue (Encadré 8.4) :

**Encadré 8.4**

IDQ20865, Australian Government Bureau of Meteorology (Bureau de la météorologie du gouvernement australien), Queensland

ANNONCE DE CRUE POUR LA RIVIÈRE DIAMANTINA

Émise à 10 h 02 le mercredi 28 janvier 2009 par le Bureau of Meteorology (Bureau de la météorologie) à Brisbane.

Des inondations modérées à majeures continuent d'affecter la rivière Diamantina entre les lacs Diamantina et Roseberth. De nouvelles crues ont provoqué des inondations modérées dans le tronçon supérieur de la Diamantina à Elderslie. Les niveaux de crue à Birdsville sont descendus sous le seuil de crue modérée mais de nouvelles crues et inondations modérées sont prévues au cours des prochains jours.

De nouvelles crues se produisent actuellement à Elderslie dans le tronçon supérieur de la Diamantina provoquant des inondations modérées. Les crues modérées se poursuivront sur la rivière Diamantina au niveau des lacs Diamantina avec une décrue très lente. Les inondations modérées devraient se poursuivre au niveau des lacs Diamantina ainsi qu'en aval au niveau de Monkira durant cette semaine.

De nouvelles crues se sont produites sur la rivière Diamantina au niveau de Roseberth : à 6 h 00 le mercredi, le niveau de la rivière avait atteint 5,20 mètres et continuait d'augmenter lentement provoquant des inondations majeures. En aval à Birdsville, le niveau de la rivière a baissé sous le seuil de crue modérée. De nouvelles crues et des inondations modérées sont prévues à Birdsville au cours des prochains jours. Le pic de crue devrait être similaire au niveau atteint en fin de semaine dernière où il avait atteint 6,5 mètres.

Prévision météorologique :

Assez beau temps. Pas de précipitations significatives prévues au cours des prochaines 24 heures.

Prochaine édition : La prochaine annonce sera émise à environ 10 h 00 mardi.

Derniers relevés limnimétriques :

Rivière Diamantina à Elderslie (2,6 m)	Hausse	6 h 00 le MER 28/01/09
Mills Ck à Oondooroo*	Stable (1,77 m)	8 h 00 le MER 28/01/09
Diamantina à Monkira	Stable (4 m)	6 h 00 le MER 28/01/09
Rivière Diamantina à Roseberth lente (5,2 m)	Hausse	6 h 00 le MER 28/01/09
Rivière Diamantina à Birdsville lente (4,6 m)	Baisse	7 h 30 le MER 28/01/09

\* signale une station automatique.

Les annonces et les bulletins de relevés limnimétriques sont disponibles sur le site <http://www.bom.gov.au/hydro/flood/qld>. Les annonces de crue sont également disponibles par téléphone au (+61) 1300 659 219 pour le prix d'un appel à faible coût de 27,5 cents australiens, et pour des tarifs plus élevés depuis des téléphones mobiles, publics et satellites.

### 8.5.2.3 Royaume-Uni

L'Environment Agency (Agence pour l'environnement) est l'organisme responsable pour les prévisions et les annonces de crue en Angleterre et au Pays de Galles et fournit des informations via des liens sur son site Internet principal. Les premières informations sur le site énumèrent les vigilances et annonces en matière de crue, à partir desquelles des informations plus spécifiques peuvent être obtenues en naviguant sur le site. En adoptant cette approche, l'agence a décidé qu'une description des localités convenait mieux qu'une carte des localités concernées. Toutefois, des critiques ont été formulées concernant le fait que le grand public ne serait pas nécessairement capable d'identifier le nom de la rivière et le tronçon correspondant à leur localisation.

- (a) Annonce de crue : Dans la description de l'annonce de crue, il existe un lien vers une carte de la zone menacée de crue. Dans l'exemple indiqué en Figure 8.6, la zone colorée représente la zone où les inondations devraient se produire, sur la base des données historiques et de la modélisation, et non l'étendue réelle ou prévue.
- (b) Vigilance de crue : Un exemple de texte type est présenté dans l'Encadré 8.5. Sur le site internet, les textes sont accompagnés de liens vers les cartes des différentes zones menacées de crue.

#### Encadré 8.5

Affluents (rivières et ruisseaux) dans le West Cambridgeshire et les North Beds

Situation actuelle: Lieux placés en Vigilance de crue : la région des rivières Kym & Til et des ruisseaux Alconbury, Ellington, Riseley et Bury : Mises à jour pour l'Anglia : Appelez la ligne d'assistance téléphonique sur les crues au (+44) 0845 988 1188 et saisissez le numéro de secteur 03362 pour obtenir davantage d'informations

Ce secteur est couvert par notre dispositif d'alerte générale précoce en matière de crue, également dénommé Vigilance de crue. Nous pouvons également émettre des Annonces de crue plus spécifiques pour ce secteur. Suivez le(s) lien(s) ci-après pour vérifier si les Annonces de crue sont également en vigueur pour le(s) localisation(s) suivante(s) :

- Ellington, Hamerton et Alconbury sont regroupés sous la dénomination Alconbury Brook (ruisseau Alconbury)
- Rivière Kym de Kimbolton à Great Staughton
- Ruisseau Riseley – Riseley et Pertenhall
- Yelden, Upper Dean & Lower Dean

Mises à jour à la radio locale : Mises à jour de la BBC Radio Cambridgeshire sur la TV locale :

- BBC – East
- ITV – Anglia

Les progrès en matière de couplage entre les modèles hydrologiques et les bases de données SIG en forte expansion ont eu pour conséquence le développement et la mise en œuvre de produits de prévision hydrologique très visuels. Cette nouvelle catégorie de produits indique les prévisions de zones inondées via des modèles reliés à des informations de MNE (modèle numérique d'élévation) haute résolution. En reliant les données MNE et les niveaux prévus des modèles hydrologiques calculées pour les cours des rivières, la zone d'inondations dans la plaine inondable peut être superposée aux cartes numériques détaillées des infrastructures humaines, indiquant ainsi la façon dont les inondations prévues affecteront une localisation donnée. La Figure 8.7 donne une représentation d'un produit cartographique de crue.

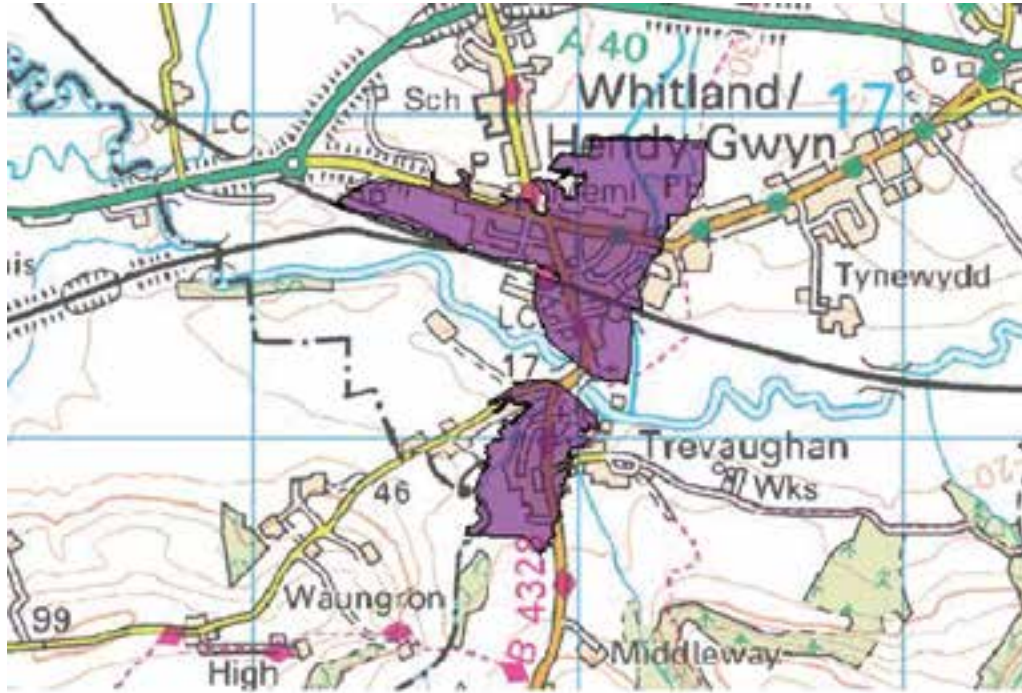
### 8.6 CONTRIBUTION DES INFORMATIONS DE CRUE AUX MESURES D'INTERVENTION

Les collectivités se trouvant dans des zones reculées peuvent ne pas être en mesure de recevoir les types d'annonces décrits dans la section précédente. Les échelons inférieurs de l'administration et des services d'urgence nécessitent des responsabilités claires et prédéfinies avec ces collectivités. Parmi ces responsabilités et liens, citons :

- (a) La radio locale, qui doit être alimentée en informations claires et précises ;
- (b) L'utilisation d'observateurs désignés par la collectivité équipés de postes émetteur-récepteur ou de téléphones portables pour pouvoir rester en contact avec les organismes d'annonce et les autorités chargées de la gestion des situations d'urgence ;
- (c) Les moyens locaux de transmission d'alerte, par exemple les cloches des églises, les sirènes et les porte-voix. Ces moyens pourraient être sous la responsabilité de personnes sélectionnées ou observateurs, qui doivent disposer de l'équipement et des moyens de transport adéquats, par exemple des motos ou des vélos ;
- (d) L'«Alerte» par hélicoptère de la part des services d'urgence.

Les autorités de prévision, par exemple les agences météorologiques et les organismes de gestion des bassins hydrographiques, doivent être conscients des collectivités isolées et menacées. Bien qu'il ne soit pas nécessaire de préparer des prévisions individuelles pour ces localisations, il est essentiel d'acquiescer une compréhension des effets de conditions extrêmes à une localité spécifique. Les niveaux locaux des services administratifs et d'urgence doivent également être équipés de cartes actualisées des zones menacées de crue. Bien que





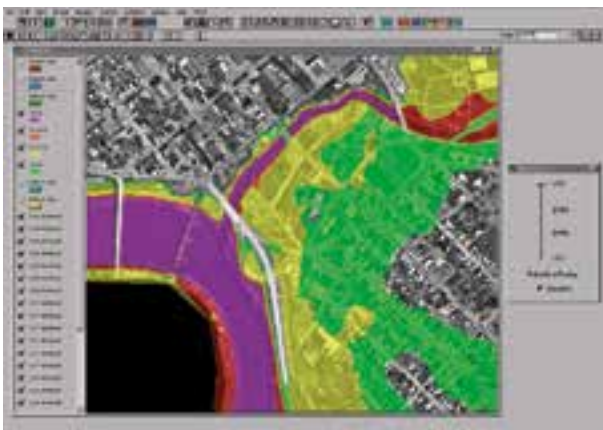
**Figure 8.6. Un exemple de cartographie des zones d'annonces de crue pour Whitland, Trevaughan et ses environs au Pays de Galles, émise par l'United Kingdom Environment Agency (Agence pour l'environnement du Royaume-Uni)**

Source : <http://www.environment-agency.gov.uk/>

les connaissances locales des impacts des crues soient très précieuses, il convient de s'assurer que les cartes locales et les cartes utilisées par les organismes centraux de prévision et d'annonce soient compatibles.

À des niveaux très localisés, par exemples les villages, il se peut que l'organisme compétent de gestion des crues ou l'administration locale qui conserve les cartes de référence ou les fait afficher pour le grand public ne soit pas représenté(e). Il est donc important de conserver les repères de crue sur les principaux

bâtiments ou dans les endroits où ils peuvent être facilement observés comme moyen de référence en matière d'impact. Dans certaines régions du Bangladesh, les repères de crue sont indiqués sur les bornes kilométriques, ce qui peut être utile pour signaler l'impact des crues sur le réseau routier. Dans les endroits où des crues majeures ne surviennent pas régulièrement, l'enregistrement des niveaux de crue maximaux constitue également un élément important, car les grandes crues peuvent ne pas se produire au cours de la durée de vie des résidents actuels. À Dresde par exemple, les repères de crue remontant à plus de deux siècles ont été d'un précieux secours pour situer les crues de 2002 de la rivière Elbe au sein d'une longue série temporelle. Ces informations deviennent certainement plus intéressantes à mesure que des prévisions de crue d'une gravité accrue sont attendues du fait du changement climatique.



**Figure 8.7. Une cartographie informatique de zone inondée**

## 8.7 SYSTÈMES LOCAUX D'ALERTE DE CRUE

### 8.7.1 Mise en place de systèmes de surveillance des crues, y compris des moyens de communication

Les dispositifs de surveillance des crues locaux sont très importants non seulement pour la préparation

des collectivités, mais aussi pour permettre aux observateurs locaux de fournir aux autorités des informations précoces concernant une situation en cours de développement. Très souvent, des inondations localisées peuvent se produire sans être repérées par les réseaux de surveillance. Ces dispositifs incluent notamment :

- (a) La fourniture de pluviomètres simples et d'échelles limnimétriques devant être relevés par une personne désignée : les pluviomètres sont particulièrement importants pour les bassins hydrographiques à ruissellement rapide pour lesquels des inondations peuvent se produire rapidement et des délais d'annonce maximaux sont impératifs ;
- (b) La maintenance de la surveillance du niveau des rivières et de l'état des digues dans la zone localisée : la fréquence de la surveillance des rivières et des digues doit être accrue à mesure que la hauteur de crue approche et dépasse le seuil critique ;
- (c) L'autorisation pour les observateurs de diffuser des annonces locales ;
- (d) La fourniture aux observateurs de moyens de communication comme les postes émetteur-récepteur et les porte-voix.

Par ailleurs, les observateurs locaux peuvent apporter une contribution précieuse par leurs connaissances des lieux. L'observation des conditions météorologiques générales, le comportement des rivières et les réactions des animaux connus pour être associés à des inondations imminentes doivent être communiqués aux autorités. L'observateur peut également jouer le rôle de diffuseur d'informations aux collectivités locales. Cette action constitue un engagement social fort et elle peut être dirigée par des responsables désignés de la collectivité. Le personnel devra avoir les compétences adéquates suivantes :

- (a) La capacité d'installer des sondes et de fournir des directives sur la signification des quantités de précipitations et du niveau des rivières ;
- (b) La capacité de lire les sondes et d'interpréter les résultats.

En particulier, les observateurs de crue locaux doivent pouvoir déterminer si le niveau de la rivière monte et la vitesse de montée du niveau d'eau.

### 8.7.2 **Mise en place de sondes pour des systèmes d'annonce de crue au niveau local**

Ces systèmes impliquent la fourniture de pluviomètres et de limnimètres aux collectivités. Ces sondes fournissent des relevés de la pluviométrie ou du niveau d'eau qui peuvent contribuer au processus global de prévision et d'annonce des crues.

L'équipement de mesure utilisé doit permettre une lecture immédiate. Les équipements suivants sont concernés :

- (a) Un pluviomètre à accumulation, dont l'observateur doit relever et enregistrer quotidiennement les résultats, mais qui peut être relevé plus fréquemment, par exemple lors de fortes tempêtes ;
- (b) Une échelle limnimétrique mesurant l'élévation du niveau de l'eau à un point adéquat à proximité de la collectivité concernée. Les résultats d'une telle échelle, une fois encore, doivent être relevés et enregistrés quotidiennement, mais peuvent être relevés plus fréquemment durant les événements de crue.

Les dispositifs à bas coût sont disponibles pour fournir des affichages et des signaux d'alerte à distance, et peuvent fonctionner sur batterie. Cela permet à l'observateur d'obtenir des relevés sans devoir sortir dans des conditions défavorables, ce qui, dans le cas d'une mesure limnimétrique dans l'obscurité pourrait s'avérer dangereux. Un réglage de l'alarme permet le relevé des informations à tout moment. Les sondes doivent être fournies par le biais d'agences gouvernementales ou d'ONG, et doivent être conformes aux normes nationales de localisation et de construction. Les observateurs doivent être formés de façon appropriée. L'importance des observateurs utilisant cet équipement mérite d'être reconnue au sein de la collectivité et ils doivent recevoir un soutien financier, par exemple pour l'achat de vélos, de piles pour la radio ainsi que d'autres équipements essentiels.

Des alarmes automatiques sont associées aux systèmes de gestion des crues plus sophistiqués. Les tout derniers dispositifs d'annonce de crues de l'Environment Agency (Agence pour l'environnement) en Angleterre et au Pays de Galles s'appliquent aux biens immobiliers, individuels et professionnels, dans les zones à fort risque de crue. Des accords peuvent être passés avec des propriétaires de biens immobiliers résidentiels et professionnels pour que ceux-ci reçoivent des annonces de crue par téléphone fixe ou portable, fax ou radiomessagerie.

## 8.8 **ANNONCE DE CRUE ET SOCIÉTÉ**

### 8.8.1 **Considérations générales**

Un service d'annonce de crue peut être très organisé aux niveaux technique et administratif, mais la perception et la réaction dépendent toujours des structures et cadres sociaux. Le niveau de ces structures et cadres peut être extrêmement variable et souvent imprévisible.

L'objectif au niveau de la collectivité est que les annonces soient reçues par tous les individus. La façon dont les messages sont diffusés au sein des collectivités dépendra des conditions locales, mais prendra généralement l'une des formes suivantes :

- (a) Annonces par les médias ;
- (b) Signaux d'annonce généraux, par exemple des sirènes ;
- (c) Annonces délivrées aux responsables des collectivités ou aux services d'urgence ;
- (d) Annonces téléphoniques automatiques dédiées pour prévenir de la menace sur des biens immobiliers ;
- (e) Diffusion des informations sur les conditions de crue et d'inondations qui affectent les collectivités en amont. Une approche pour parvenir à cela est de transmettre les messages d'annonce de village en village à mesure que l'onde de crue se déplace vers l'aval ;
- (f) Surveillance et transmission régulière d'informations concernant le niveau des rivières et l'état des digues dans la zone localisée. La fréquence des veilles de rivière et de digue doit être accrue à mesure que la hauteur de crue augmente et dépasse le seuil de danger critique ;
- (g) Un système d'annonce collectif pour transmettre toute information concernant l'approche d'une crue à toutes les familles.

### 8.8.2 Sensibilisation des médias

Les médias, par exemple la presse et les émissions à la télévision et à la radio, sont considérés comme des éléments vitaux dans le processus d'annonce des crues. Toutefois, les rapports entre les services de prévision et d'annonce d'une part et les médias d'autre part doivent être gérés avec soin. Les reporters et les présentateurs ne sont pas des techniciens spécialisés et leur objectif principal est de médiatiser un «événement». Cela signifie fréquemment qu'ils mettront l'accent sur des erreurs et des défaillances, par exemple les erreurs en matière de prévisions d'événements météorologiques extrêmes ou d'alertes à la crue, les problèmes rencontrés par les services d'intervention d'urgence et les victimes. Bien souvent, le succès d'une opération n'est pas «salué» avec la même emphase.

Les médias tendent à éviter les termes techniques en matière de météorologie et d'hydrologie, et possèdent leurs propres terminologie et tournures de phrases en matière d'inondations, bien souvent en vue de provoquer un effet spectaculaire. Ainsi, les rivières «sortent de leur lit», plutôt qu'elles ne submergent la plaine inondable, et une crue éclair est parfois qualifiée de «débit torrentueux des eaux». Les fortes précipitations sont «torrentielles» ou, dans les pays à climat tempéré, «comparables à la mousson». Ces termes sont choisis davantage pour

leur impact que pour leur qualité descriptive, alors qu'il conviendrait de replacer les événements dans leur contexte. Une tendance récente dans la presse et les flashes infos au Royaume-Uni vise à comparer un événement pluviométrique à un chiffre mensuel moyen. Ainsi, des précipitations orageuses de 50 mm, qui n'ont rien d'inhabituelles dans le contexte d'un orage, peuvent sembler spectaculaires si elles sont présentées comme équivalentes aux «trois quarts de la moyenne pluviométrique mensuelle habituellement observée». Les événements sont fréquemment décrits comme «sans précédent» ou «les plus graves connus de mémoire d'homme», sans aucune référence à des données historiques. Au cours des dernières années, les hommes politiques comme les médias ont été enclins à désigner les événements inhabituels de tempête et de crue comme des «preuves du changement climatique», alors qu'en réalité l'événement en question fait tout simplement partie de la variabilité naturelle des séries de données.

Les principaux SMN et services d'annonce de crues ont, durant un certain temps, opéré des unités de presse et médiatiques bien organisées, à la fois pour répondre aux questions des médias et pour être proactifs sur les reportages qui font appel à du contenu spécialisé. Cela est survenu parce que les spécialistes techniques manquent souvent d'expérience pour débattre avec les professionnels des médias, qui peuvent ajouter leur propre interprétation à une déclaration technique, ou extraire des phrases de leur contexte. Ces responsables sélectionnés pour leur connaissance des médias doivent recevoir une formation spécialisée dans la présentation, l'écriture de communiqués de presse et l'émission de matériaux de sensibilisation du public. Les responsables et présentateurs médiatiques peuvent être issus du monde des médias (et bien souvent le sont), même s'ils devront recevoir une formation en météorologie et en hydrologie, ce qui peut s'avérer plus efficace que de former un spécialiste technique à la gestion des relations médiatiques. Les chaînes météorologiques prolifèrent à la télévision et à la radio aux États-Unis. À l'inverse, la British Broadcasting Corporation (BBC) n'utilise que du personnel qualifié du Met Office (Bureau météorologique).

Il est à souhaiter que la sensibilisation autour de la technologie d'annonce des crues trouvera un plus large écho du fait que les organisations officielles sont proactives, ou tout du moins coopératives avec les médias. Il est donc bénéfique d'organiser des communiqués de presse réguliers, en particulier durant les événements critiques. Les relations avec la presse, la télévision et la radio sont très importantes lorsque de nouveaux processus sont lancés, comme les nouveaux codes d'annonce pour les crues ou les conditions météorologiques extrêmes. Lorsque les

nouveaux codes ont été introduits en Angleterre et au Pays de Galles par l'Environment Agency (Agence pour l'environnement) en 2001, ce changement a été accompagné par une campagne médiatique concertée. L'Internet a offert des possibilités accrues pour les services météorologiques et hydrologiques en vue de fournir des documents explicatifs et des communiqués de presse concernant les développements techniques et les comptes rendus de situation, sans devoir organiser de réunions d'information spécifiques.

### 8.8.3 Participation des collectivités à la collecte de données et aux systèmes locaux d'annonce de crues

Si les collectivités comprennent l'importance de leur rôle et deviennent impliquées dans la collecte de données pour la prévision des crues, cela permettra une plus grande responsabilisation des individus. Des personnes peuvent être désignées pour les tâches suivantes :

- La maintenance des installations ;
- La formation au rôle de lecteur des sondes pour les instruments manuels (pluviomètres, limnimètres) ;
- Le rôle d'opérateur pour transmettre les observations en temps réel.

Les lecteurs des sondes et les observateurs ont un double rôle à jouer. Outre leur rôle de consignation et de signalisation des informations, ils peuvent utiliser leurs connaissances locales et leur compréhension pour ajouter des commentaires utiles aux comptes rendus de situation. Ils peuvent également jouer un rôle important en recevant des informations du centre d'opération et en les transmettant à la collectivité locale. Des personnes formées au sein de la collectivité doivent être capables de collecter et d'actualiser les informations concernant les domaines suivants :

- La magnitude des précédents événements extrêmes de crue dans leur région ;
- Les causes d'inondations dans leur région ;
- La vitesse à laquelle les eaux peuvent monter ;
- La durée pendant laquelle les eaux de crue peuvent demeurer dans la localité ;
- Le sens de déplacement des eaux de crue.

L'implication des membres de la collectivité contribue également à empêcher le vandalisme et les dégâts aux installations et à garantir leur signalement, le cas échéant. Pour maintenir ce soutien, les personnes nommées localement doivent recevoir des honoraires ou une petite indemnité. Un exemple des accords mis en place pour les communautés rurales en Jamaïque est illustré en Figure 8.8.

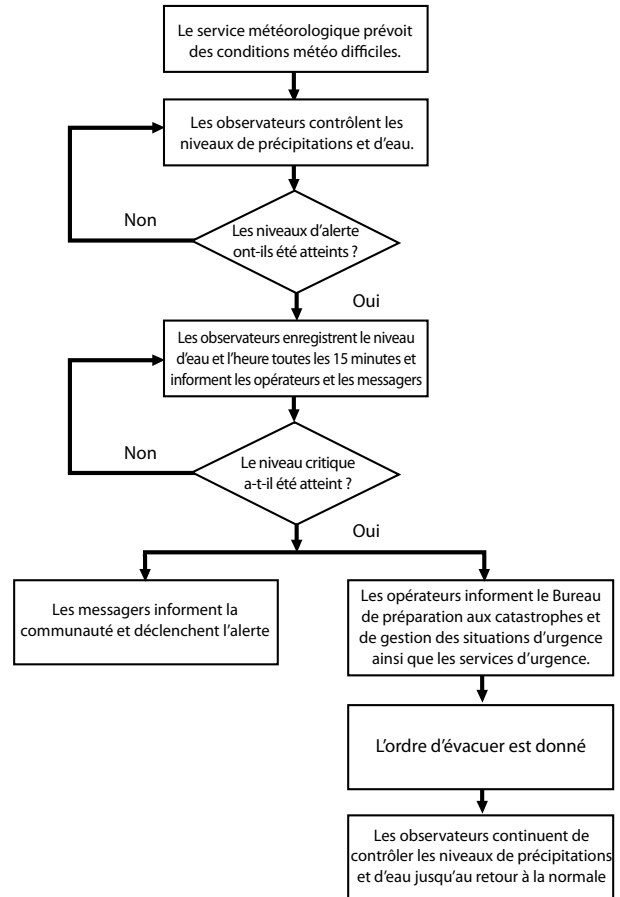


Figure 8.8. Procédures d'émission d'annonces de crue pour les collectivités rurales en Jamaïque

### 8.8.4 Un exemple d'évaluation de la nécessité d'un système local d'annonce des crues aux États-Unis

Aux États-Unis, l'Office of Hydrologic Development (Bureau du développement hydrologique), qui fait partie du SMN, a élaboré un programme complet destiné à soutenir les activités d'annonce de crues dans le cadre du Système de prévision hydrologique pour les collectivités (CHPS). Les principaux objectifs du CHPS sont les suivants :

- Réduire le nombre de victimes et les dégâts aux biens provoqués par les inondations ;
- Réduire les perturbations des activités humaines et économiques.

Les techniques utilisées pour atteindre ces objectifs sont les suivantes :

- Amélioration et maintenance d'un système de communication efficace entre les organismes et les individus qui ont le besoin d'être informés de la situation ;
- Encouragement de l'implication de la collectivité locale et de la planification des interventions ;
- Formation du public pour qu'il réagisse et se comporte conformément aux prévisions de crues éclair, aux avis de vigilance et aux annonces ;



- (d) Promotion d'une gestion efficace de la plaine inondable ;
- (e) Minimisation des délais de réaction à partir de l'émission d'une annonce de crue éclair.

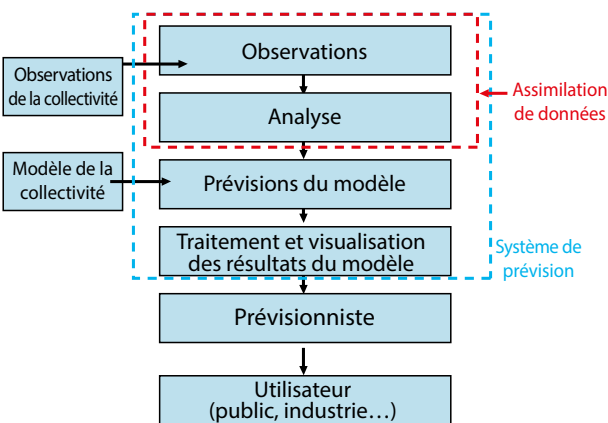
De nombreux systèmes d'annonce de crues locaux en opération aux États-Unis actuellement sont des systèmes autonomes manuels peu coûteux et faciles à utiliser. Ils sont intégrés dans le système de prévision et d'annonce des crues global, tel qu'indiqué en Figure 8.9.

Le système autonome comprend un système de collecte de données local, un coordinateur de crue au niveau de la collectivité, une procédure de prévision de crues facile à utiliser, un réseau de communication visant à diffuser les annonces ainsi qu'un plan d'intervention. Il a été démontré que l'approche la plus simple et la moins onéreuse pour la collecte de données est de recruter des observateurs volontaires pour relever les données pluviométriques et limnimétriques. Des pluviomètres en plastique très peu coûteux sont disponibles auprès du SMN pour les observateurs volontaires qui relèvent les quantités de précipitations pour le coordinateur de crue de la collectivité. Le coordinateur de crue gère les réseaux de volontaires.

Des pluviomètres automatisés plus sophistiqués peuvent être nécessaires dans les régions isolées ou dans des situations où des observateurs ne sont pas disponibles. La complexité des limnimètres peut également varier : des échelles limnimétriques aux sondes de télémessure automatiques.

**8.8.5 Efficacité des annonces de crues et psychologie humaine**

Il existe un très grand nombre d'études sur les raisons qui expliquent la défaillance des annonces



**Le CHPS unit les collectivités soumises au risque hydrologique**

Figure 8.9. Le rôle du CHPS aux États-Unis

de crues, et un récapitulatif de ces raisons est disponible dans l'Encadré 8.6. Les raisons sont classées suivant qu'une «interprétation commune» entre l'autorité émettrice de l'annonce et le grand public a été obtenue ou non.

Ces systèmes doivent être évalués périodiquement pour vérifier si le matériel et les accords sont toujours adaptés. En particulier, la performance en matière de fourniture des annonces, de réception de celles-ci et les interventions connexes doivent être passées en revue après chaque événement majeur. Si besoin est, des exercices de simulation peuvent être réalisés. Il est important que les

**Encadré 8.6**

Une compréhension partagée des annonces de crue est acceptée mais elle présente un intérêt limité car :

- (a) Certaines personnes ne redoutent pas le risque de crue et, par conséquent, même lorsque les annonces sont comprises, celles-ci sont ignorées voire prises comme un défi à relever ;
- (b) D'autres priorités peuvent interférer avec la réaction immédiate au message d'annonce, par exemple les personnes sont généralement peu disposées à réagir tant qu'elles ne se sont pas informées du sort des membres de leur foyer ;
- (c) Les habitants peuvent ne pas vouloir abandonner leurs logements, biens et bétail, par crainte du pillage et du vandalisme ;
- (d) D'autres facteurs, tels que les réactions des voisins ou la météo, peuvent démentir une annonce officielle. Les personnes recherchent souvent la confirmation d'un événement de crue avant d'agir ;
- (e) Certaines personnes ont une aversion pour l'autorité et peuvent ignorer les recommandations officielles. Dans de nombreux cas, les personnes sont réticentes à suivre les préconisations, préférant prendre leurs propres décisions sur la base des informations dont elles disposent ;
- (f) Certaines personnes ne sont pas en mesure de réagir et, de ce fait, les annonces n'ont aucune valeur pour elles, par exemple elles peuvent ne pas disposer des capacités physiques et mentales pour réagir, ou alors elles peuvent ne pas être joignables ;
- (g) Certaines des personnes menacées peuvent ne pas s'inquiéter jusqu'à ce que les inondations commencent à provoquer des dégâts.

Une compréhension partagée des annonces de crue est difficile à obtenir car :

- (a) Dans de nombreux cas, la population menacée sera très diversifiée. Cette diversité peut signifier qu'il existe des priorités, langues, et niveaux de compréhension différents des annonces de crue ;
- (b) Certains groupes de personnes peuvent ne pas recevoir les annonces même si le système fonctionne parfaitement ;
- (c) Les réseaux d'annonce personnels informels peuvent renforcer, mais aussi menacer ou dévier, les communications officielles.

personnes de chaque collectivité reçoivent les informations dès que possible concernant la possibilité d'une inondation dans leur secteur. Outre les informations précieuses issues du système d'annonce des crues officiel, les collectivités doivent s'efforcer de développer leurs propres systèmes d'annonce.

Toutefois, les efforts visant à développer une sensibilisation et une implication collective ne produisent pas toujours les résultats escomptés par l'administration. Les opinions et préjugés locaux peuvent prendre le pas sur les données techniques en matière de réaction aux annonces de crue, tel qu'illustré par l'article de presse reproduit dans l'Encadré 8.7.

### Encadré 8.7

Description d'annonces de crue qui ont été ignorées par la population du *Botswana Daily News*:

«Une autre très petite communauté insulaire de Xaxaba, située dans le delta de l'Okavango, a rejeté les recommandations des autorités du District nord-ouest de fuir devant les crues imminentes de la rivière Okavango. Lors d'une réunion organisée par les membres du comité de gestion des catastrophes naturelles pour les avertir des crues dévastatrices, les résidents ont déclaré qu'ils préféreraient «attendre pour voir ce qui se passerait» plutôt que de quitter la terre de leurs ancêtres. En revanche, ils ont demandé à ce que leur soit fournis des tentes et des bateaux ou des canoës, en cas de besoin. Ils ont ajouté qu'ils ne se sentaient pas menacés par les crues, qu'ils considèrent comme normales.

Sur l'île de Jao Flats dans le delta, les autorités ont échoué pour la quatrième fois à convaincre la communauté de se déplacer vers des zones plus sécurisées, malgré le fait que l'onde de crue avait déjà encerclé leur île minuscule. Même les conseils du Premier Ministre Joseph Kavindama n'ont pas pu les faire revenir sur leur décision et les habitants ont continué d'affirmer que les annonces des autorités étaient alarmistes. Kavindama avait indiqué à ses électeurs que le gouvernement était inquiet pour leurs vies, déclarant que si le gouvernement les laissait se noyer, cela lui serait certainement reproché par la suite. Il a ajouté que les résidents devaient faire attention de ne pas prendre de mauvaises décisions qui pourraient mettre en danger la vie de leurs enfants. Malgré cela, ils n'ont pas voulu changer d'avis.

Ils ont dit devant l'assemblée réunie qu'ils vivaient sur cette île depuis des générations. Tholego Motswai a déclaré que si et seulement si la situation était de l'ampleur de la «crue de Noë» dans la Bible, alors il conviendrait de s'alarmer, ajoutant que, même dans une telle situation, elle préférerait mourir sur l'île pour rejoindre ses ancêtres. Pour montrer combien les crues ne constituaient pas pour eux un problème important et par conséquent que l'argument était nul, Dihawa Tuelo a délibérément changé de sujet en s'enquérant de la formation du fonds communautaire tant attendu par leur communauté, affirmant ainsi qu'il y avait des sujets plus urgents à traiter.

David Nthaba a dit qu'il était trop tôt pour affirmer qu'une crue allait se produire, ajoutant que des repères terrestres comme les arbres étaient utilisés depuis des générations pour mesurer l'intensité des crues, et, qu'en tant que tel, il n'y avait aucune chance qu'une crue puisse les prendre au dépourvu. Un autre intervenant non identifié a demandé pourquoi le gouvernement n'était pas intervenu, par le passé, dans des situations similaires, soupçonnant ainsi quelque sombre motif. D'autres intervenants, exigeant qu'on les laisse en paix, ont indiqué qu'ils pouvaient tout à fait gérer des inondations catastrophiques sans l'intervention du gouvernement. Seuls deux résidents semblaient préoccupés par les annonces, car ils ont indiqué qu'ils étaient prêts à se diriger vers des zones sécurisées plus en hauteur. Le Commissaire de district Badumetse Hobona a accepté de fournir des tentes, suivant les demandes et conditions des résidents mais les a avertis qu'il restait peu de temps pour décider les plus réticents».

## CHAPITRE 9

### FORMATION REQUISE

#### 9.1 PRISE EN COMPTE DES RESSOURCES EXISTANTES

Ce chapitre part du principe que, pour tout nouveau système de prévision et d'annonce des crues, il existe toujours un cadre technique et organisationnel de base en matière de météorologie et d'hydrologie sur lequel s'appuyer. Quel que soit le type d'organisation en matière de prévision des crues dans tout pays donné, cette activité n'est généralement pas considérée comme étant prévue pour fournir un service en continu, à l'inverse des prévisions météorologiques. L'activité de prévision des crues repose sur un service de veille, qui devient actif lorsqu'un avis d'événement extrême est reçu. Ainsi, l'activité des prévisionnistes de crue risque davantage d'être divisée entre leurs fonctions opérationnelles et leur poste à temps plein. Même s'il existe une structure de prévision et d'annonce de crues dédiée, les tâches quotidiennes sont très différentes des tâches opérationnelles.

Par ailleurs, il existe un turnover constant du personnel dans toute organisation, ce qui rapproche les nouveaux employés et les anciens. Toutes les nouvelles recrues doivent être formées pour satisfaire à toutes les exigences liées aux activités de prévision des crues. Le personnel existant doit donc être formé pour les nouveaux concepts et les techniques les plus récentes, tandis que les nouvelles recrues doivent également recevoir une formation adaptée pour leur nouveau poste au moment de prendre leurs fonctions.

Une analyse des profils de personnel au sein de toute organisation de prévision et d'annonce des crues montrera que le niveau de qualification professionnelle varie considérablement, avec des techniciens et des universitaires de niveau doctoral travaillant ensemble. Clairement, les techniques et les pratiques doivent être standardisées, et des directives et structures organisationnelles cohérentes établies, pour définir clairement tous les rôles et responsabilités. Si une nouvelle structure organisationnelle est établie, il faudra aborder le problème de la façon de définir les compétences et de les conserver dans le temps.

Le développement d'une unité de prévision et d'annonce des crues à partir d'organisations existantes nécessitera une sélection parmi une gamme de compétences. Les activités du personnel travaillant dans les services de prévision des crues se répartissent en quatre catégories :

- (a) Les activités opérationnelles, qui impliquent l'analyse de la situation hydrométéorologique et la réalisation de prévisions au moyen de modèles de simulation ;
- (b) La modélisation, pour laquelle les membres du personnel doivent déterminer les exigences pour la conception des outils de simulation qui peuvent varier grandement selon les types de bassin étudiés : le calage préalable et la mise en œuvre opérationnelle sont des opérations techniquement complexes ;
- (c) L'hydrométrie, qui va de la collecte de données à leur utilisation dans les bases de données opérationnelles et d'archivage ; ce domaine couvre également la transmission de données et le contrôle de la qualité des données ;
- (d) L'informatique, qui implique la vérification que l'équipement et les applications en temps réel fonctionnent correctement 24 heures sur 24 ; les spécialistes des technologies de l'information (TI) sont également responsables de la fourniture et de la mise en œuvre de tous les formats de résultats sous forme de cartes, diagrammes et texte.

Ces activités sont étroitement interdépendantes et le personnel au sein des services accomplit généralement des tâches qui recouvrent deux ou trois activités, en particulier lorsque la taille du service est réduite. Ainsi, les modélisateurs peuvent devoir rester en service opérationnel de veille. Les compétences suivantes sont typiques de profils professionnels appropriés pour une inclusion dans le personnel :

- Hydrologues
- Modélisateurs
- Gestionnaires et développeurs système
- Techniciens informatiques
- Techniciens système
- Météorologues
- Techniciens en télécommunications
- Spécialistes de la sensibilisation du public et de la communication
- Gestionnaires de situations d'urgence
- Observateurs sur le terrain

En supposant que l'activité d'annonce de crue ait été développée à partir d'une organisation responsable de la gestion de l'eau, il est probable que la plupart des compétences nécessaires soient déjà disponibles au sein de l'organisation. Il est impossible d'être directif sur le nombre précis, la structure et l'équilibre compétences-qualification-expérience. Parmi tous les postes et domaines d'activité susmentionnés, il existe un degré

considérable de connaissances spécifiques, non universitaires, qui ne peuvent être acquises qu'en travaillant dans le cadre d'un système de prévision et d'annonce des crues, et qui ne peuvent être apprises que par la pratique.

## 9.2 QUALIFICATIONS PROFESSIONNELLES

Presque tous les membres de personnel figurant dans les catégories susmentionnées, en raison des compétences nécessaires à leur travail, possèdent un certain degré de qualification technique, universitaire ou professionnelle. Dans la plupart des cas, ces compétences et expériences seront reconnues par un type de processus de certification ou d'enregistrement. L'attribution d'un poste donné est toujours une question d'équilibre entre les diplômes, la formation et l'expérience.

Dans la plupart des pays, le personnel travaillant dans ces catégories professionnelles a suivi un certain type d'enseignement supérieur auprès d'une université ou d'une école technique. Ces établissements fournissent généralement un cursus dans diverses disciplines pertinentes, par exemple le génie civil, les sciences de la terre, les sciences physiques, l'informatique et les technologies de l'information (TI), ainsi que l'électronique. Les avantages de ce type d'enseignement sont l'acquisition du socle commun et la culture générale de chaque discipline. À part peut-être pour la météorologie et certains aspects des TI, il n'existe pas de cursus spécifique qui donne immédiatement les compétences requises pour le poste de «prévisionniste de crue».

Du fait que les candidats peuvent présenter une large gamme de profils différents, il est recommandé de ne pas suivre une approche trop rigide concernant les exigences requises en termes de diplômes. Une telle approche est pourtant susceptible d'être adoptée en raison des obligations imposées par les réglementations gouvernementales en matière de recrutement. Ces réglementations peuvent généralement exiger de la part du personnel d'administration de posséder un diplôme universitaire ou post-universitaire en génie civil (pour l'hydrologie) ou en physique (pour la météorologie). Il est préférable que les candidats aient acquis les compétences nécessaires suivant une combinaison de diplômes, de formation et d'expérience professionnelle. Cela se traduit fréquemment par des spécialisations post-universitaires, par exemple une maîtrise ou un doctorat, ou une qualification émanant d'un organisme professionnel, par exemple un institut pour les ingénieurs professionnels.

Certains pays ou groupements de pays (par exemple, le Commonwealth britannique et l'UE) ont adopté un processus de reconnaissance mutuelle des qualifications dans les États membres, et peuvent les accepter par enregistrement, par exemple la qualification d'Ingénieur professionnel. Au moment de la rédaction de ce document, la France envisage de lancer un processus de certification qui réunirait tous les processus de formation dans le cadre d'un programme de formation cohérent. Par exemple, une certification technique en informatique équivaldrait à technicien en instruments. Au Royaume-Uni, un système de Qualifications nationales professionnelles (National Vocational Qualifications) a été introduit, certaines couvrant les compétences météorologiques. Ce type de reconnaissance de l'expérience contribue à l'attribution des postes au sein d'une structure organisationnelle. De la même façon, de nombreuses organisations au Royaume-Uni insistent sur le processus de Formation professionnelle continue, en vertu duquel la production de rapports périodiques sur l'expérience professionnelle et la formation contribuent au maintien d'une certification donnée. C'est le cas, par exemple, pour le statut d'Expert météorologue, qui est géré par Royal Meteorological Society (la Société météorologique royale) du Royaume-Uni. Ces initiatives permettent d'établir et de maintenir le niveau requis de compétences et de motivation.

## 9.3 FORMATION ET ENSEIGNEMENT CONTINU

Évidemment, les compétences requises dans chaque discipline ou activité spécialisée peuvent évoluer avec le temps, principalement du fait des progrès scientifiques et techniques, mais également parce que les connaissances des individus peuvent stagner. Par exemple, de nombreux membres de personnel travaillant dans le domaine de l'hydrométrie, dont la formation et l'expérience étaient basées initialement sur des instruments manuels ou à enregistrement graphique, ont dû, au cours des dernières années, s'adapter à des instruments électroniques et à semi-conducteurs. La nécessité de gérer, entretenir et réparer des instruments de terrain a également évolué, passant de l'extraction manuelle des données sur les graphiques à l'utilisation d'équipements de téléchargement vers des unités de stockage de données portatives ou des ordinateurs portables. C'est pour cette raison que lorsqu'un service d'annonce de crues effectue un programme de développement ou de rééquipement majeur, la formation doit faire partie intégrante du contrat de fourniture. Un renouvellement des effectifs trop

important au sein de l'unité, ou sur diverses divisions d'une organisation plus importante, peut également provoquer des pertes de connaissances pratiques, et réduire la confiance des individus dans leurs capacités.

Il est utile, quoique non essentiel, que tous les membres de l'organisation de prévision et d'annonce des crues aient accès aux programmes de formation réguliers, soit pour compléter leurs fondamentaux soit pour entretenir ou développer de nouvelles compétences. Dans le cas d'une organisation suffisamment grande, par exemple si l'unité d'annonce des crues fait partie d'un SHN ou SMN plus important, il peut y avoir un centre spécialisé qui organise les cours de formation. Dans ce cas, les cours portant sur les compétences opérationnelles fondamentales pourront inclure la formation pratique en matière de prévision des crues, la météorologie, l'hydrométrie, l'hydrologie et l'hydraulique, l'administration, la sensibilisation du public et les responsabilités environnementales. Ces programmes peuvent être organisés annuellement, pour permettre la formation des nouvelles recrues.

La formation continue ne peut couvrir tous les besoins et dans les unités d'annonce des crues plus petites, en particulier dans les pays moins développés, il peut être difficile d'avoir accès à une formation appropriée, car cela peut supposer de partir à l'étranger. Les coûts et temps de déplacement associés aux formations à l'étranger sont très importants, et si les cours ne peuvent être suivis régulièrement, se pose le problème de la continuité. Une solution à cela est parfois le processus de «formation des formateurs» par lequel des membres clés du personnel peuvent recevoir une formation à l'étranger, puis revenir dans leur organisation mère où ils dispenseront les modules de formation qu'ils y ont reçus aux autres membres du personnel. Cette approche a été appliquée avec succès en Papouasie-Nouvelle-Guinée et au Bangladesh, où des responsables techniques de haut niveau ont passé un certain temps dans les services d'annonce des crues de Nouvelle-Zélande puis sont revenus pour dispenser cette formation aux services hydrologiques et d'annonce des crues nationaux de leur pays.

Une autre approche possible est l'autoformation, qui peut également constituer un complément essentiel à d'autres types de formation. L'autoformation peut permettre de développer certains aspects éventuellement absents de l'enseignement de base et de la formation continue, et peut également cibler certains sujets très spécifiques. Auparavant disponible par correspondance et via des centres d'apprentissage à distance (par exemple, l'Open University du Royaume-Uni), cette approche est de plus en plus accessible via des sources Internet. L'autoformation présente les avantages suivants :

- (a) Les cours sont flexibles et ne sont pas figés dans des cycles annuels ou des lieux précis ;
- (b) Il est possible d'apprendre rapidement à l'aide de produits audiovisuels interactifs ;
- (c) Elle est facilement accessible, de sorte que les étudiants peuvent apprendre selon leur propre rythme, quand et où ils le veulent ;
- (d) Les concepts de base peuvent être passés en revue ;
- (e) Les matériaux et les produits peuvent être constamment mis à jour ;
- (f) Une collaboration peut être facilement établie entre les organismes nationaux ou internationaux.

L'autoformation via des cours sur Internet peut être utilisée dans un cadre élargi de cours préparatoires ou de formation continue. Néanmoins, il existe certains désavantages, qui peuvent limiter la pertinence de cette approche. Les cours sur Internet sont chers à concevoir, en particulier s'ils s'attachent à inclure des produits de pointe et interactifs. Les fournisseurs peuvent décider après quelques années d'abandonner tel ou tel cours par manque d'utilisateurs. Si les cours sont liés à un produit spécifique, ils peuvent être abandonnés ou modifiés si le produit en question est réactualisé ou devenu obsolète. La langue peut également poser problème pour certains étudiants, surtout si du vocabulaire technique est utilisé.

Le processus d'autoformation ne favorise pas le contact humain, qui constitue pourtant une part importante du processus d'apprentissage. L'étudiant a donc besoin d'une motivation sans faille, ce qui peut passer par une forme de soutien financier ou des perspectives de promotion. Les cours sur le Web peuvent également ne pas être certifiés ou suffisamment reconnus par les organismes compétents.

L'autoformation, dans le cadre d'un programme de formation global, peut revêtir un certain nombre de formes de plus grande complexité, tel que décrit ci-dessous.

#### Niveau 1 : Recherche d'informations

Cela suppose de pouvoir avoir accès à tous les types de supports d'information, par des recherches par mot clé dans des navigateurs internationaux (Google, Wikipedia) ou sur le site Internet d'une organisation. Le principal avantage est que ces matériaux sont facilement accessibles, mais il faut reconnaître que les normes en matière d'informations sont très hétérogènes, et que leur rédaction peut souvent être dictée par des impératifs autres que la fourniture d'une formation de haute qualité. Les produits disponibles sont généralement des fichiers texte, des images et des vidéos.

### Niveau 2 : Apprentissage sur Internet

Cela suppose qu'un fournisseur mette en ligne des produits spécifiques, bien souvent organisés en leçons. Il est possible d'accéder à ces produits à l'aide de mots clés ou en naviguant sur un site Internet dédié. Le fournisseur vise ou s'engage généralement à aider l'étudiant à acquérir les connaissances via l'achèvement d'un module de formation complet. Il s'agit d'un progrès par rapport au niveau 1, car le contenu et les produits sont mieux définis, même si le problème de l'étudiant travaillant seul demeure.

### Niveau 3 : Apprentissage mixte

Ce niveau fournit l'enseignement ou la formation dans un cadre plus formel. Cela nécessite la mise en place d'une initiative pédagogique basée sur un profil de départ et un profil cible. L'initiative se focalise sur l'étude d'un domaine particulier plutôt que sur un sujet spécifique. Fréquemment, le programme comporte deux parties. Un ensemble de matériaux de cours sont disponibles en ligne, proposant à l'étudiant tout le contenu nécessaire, et l'étudiant peut également avoir accès à des conférences pré-enregistrées données par des professeurs («formation en ligne asynchrone»). Les matériaux en ligne sont complétés par des leçons, qui peuvent également être présentées sous la forme de séances de classe ou de leçons virtuelles. Dans ce cas, les leçons sont pré-programmées, avec un professeur présent en même temps que les étudiants, d'où une interaction possible («formation en ligne synchrone»). Toutefois, cette approche présente un désavantage dans la mesure où la technologie nécessaire est sophistiquée, et où l'organisation des classes est une activité complexe qui peut être difficile à justifier dans le cadre d'un environnement de travail ministériel.

La combinaison de l'autoformation et de l'enseignement professionnel continu dans un cadre coordonné au niveau international pourrait être une initiative importante pour améliorer les services d'annonce des crues dans un certain nombre de pays confrontés à des problèmes similaires. Des directives sont déjà générées par l'OMM sur les normes en matière de formation et de compétences pour le personnel travaillant dans les SMN. Si cela était étendu aux services d'annonce de crues nationaux, cela pourrait permettre une plus grande coopération entre les services des différents pays, les produits pédagogiques étant traduits et adaptés aux situations locales.

Même si une éducation de base complète et une formation continue sont des éléments pertinents pour permettre aux membres du service de prévision des crues d'acquérir les connaissances

nécessaires à la compréhension et à l'exécution de leurs fonctions, l'expérience pratique est sans doute la meilleure façon de savoir comment travailler dans une situation opérationnelle. Quelques services hydrologiques utilisent des simulateurs de leur logiciel de prévision, ce qui permet aux professionnels de s'entraîner, de simuler des scénarios possibles ou de se familiariser avec de nouvelles technologies et de nouvelles pratiques. Toutefois, cette approche n'est pas normalement menée de façon aussi approfondie que dans d'autres professions, comme lors de la formation des pilotes de ligne.

Cette approche de simulation peut être étendue à des exercices de formation. Ceux-ci peuvent être réalisés « au bureau » : le personnel du service d'annonce des crues doit alors répondre à une série de situations hypothétiques. Sous sa forme la plus élaborée, l'exercice peut être réalisé en temps quasi-réel, et impliquer une large gamme d'associations partenaires, par exemple le gouvernement local ou les services d'urgence. De cette façon, les mesures d'intervention peuvent être testées ainsi que les aspects techniques de la simulation d'une situation de crue.

Dans le cadre d'un exercice complet, le service de prévision et d'annonce est placé dans une situation qui représente un cas réel, et cela peut inclure les éléments suivants :

- (a) Le processus commence par des informations des services météorologiques qui activeront le mode opérationnel complet ;
- (b) L'interaction en temps réel avec les services météorologiques sera maintenue en continu durant l'événement ;
- (c) Des simulations des modèles de bassins versants et cours d'eau sont utilisées pour générer des situations réalistes visant à permettre au prévisionniste de crues de fournir des informations destinées à générer des annonces ;
- (d) Des situations critiques peuvent être introduites, par exemple la perte de transmissions de données, des pannes informatiques, etc. ;
- (e) Un ensemble réaliste d'informations d'alerte peut être généré pour faire réagir les différents échelons de l'organisation ;
- (f) Le contact avec les services de la protection civile sera établi pour les tenir informés de l'évolution de la situation ;
- (g) Des informations peuvent être fournies aux autorités au niveau national et à la presse ;
- (h) Les informations publiées sur Internet sont préparées et utilisées pour informer les services de la protection civile et le grand public en temps réel.

L'organisation des communications pour l'exercice avec les services météorologiques nationaux et la

sécurité civile locale doit être ajustée à la situation locale, en fonction de la façon dont les autres organismes sont prêts à coopérer. Toutefois, une telle approche intégrée est très précieuse pour établir et tester des procédures spécifiques durant les événements de crise.

L'exercice complet doit être géré par des professionnels et sa réalisation nécessite de gros efforts. Il sera donc coûteux et ne pourra pas être réédité très fréquemment. Dans quelques pays, les unités locales des services d'annonce des crues peuvent organiser des séances de formation dans leurs propres bureaux, le plus souvent en dehors de la saison des crues. Peu d'exercices sont réalisés au niveau national : l'Opération Trident a été mise en œuvre au Royaume-Uni en 2004 par l'Agence pour l'environnement (Environment Agency, 2005), mais elle n'a pas été rééditée depuis. Il est intéressant de se demander si un exercice de simulation de crue pourrait être mis en œuvre sur un bassin international, avec l'implication des services des pays participants.

#### 9.4 **FORMATION OPÉRATIONNELLE DU PERSONNEL DES SERVICES DE PRÉVISION ET D'ANNONCE DES CRUES**

La formation opérationnelle du personnel est vitale pour conserver et développer les compétences pour les divers aspects et disciplines concernés dans la prévision et l'annonce des crues. La plupart des membres de personnel employés par les organismes de prévision et d'annonce des crues doivent posséder une formation et des qualifications spécialisées, et c'est pour cette raison que le niveau d'éducation général d'un pays est un point de départ important. Toutefois, quel que soit le niveau d'études et l'adéquation des qualifications formelles ou professionnelles, il est nécessaire de passer par une formation et un développement des compétences en rapport avec le travail concerné. Cela peut se faire via la structure hiérarchique lorsque les membres de personnel ayant le plus d'ancienneté et le plus d'expérience transmettent le savoir aux nouvelles recrues. L'augmentation de la spécialisation technique au cours des dernières années a eu pour effets que certains individus et groupes d'agents d'une organisation peuvent ne plus comprendre facilement les détails ou la pertinence de compétences particulières. Ainsi, la formation opérationnelle peut se dérouler à plusieurs niveaux, comme suit :

(a) Formation aux compétences techniques pour rester à jour par rapport aux toutes dernières évolutions, aux nouveaux équipements et aux dernières technologies ;

- (b) Formation de familiarisation pour les différentes unités au sein de l'organisation, par exemple pour que les responsables de terrain soient sensibilisés aux besoins du personnel en charge du traitement de données ;
- (c) Formation pour l'ensemble de l'unité : exercices internes et conjoints ;
- (d) Formation pour l'interfaçage avec d'autres organisations, comme la formation technique dans les domaines associés, ou les compétences de communication, par exemple pour l'information à la presse et aux médias.

Quand de nouveaux équipements de surveillance, modèles et logiciels de gestion de données sont introduits, le personnel devra recevoir la formation préalable requise. Cette formation doit être professionnelle et dédiée, car le personnel qui a été habitué à certaines procédures peut être, de façon compréhensible, quelque peu réticent au changement. Cela est particulièrement important lorsque des changements sont introduits dans le cadre d'un programme d'aide internationale : on ne peut pas attendre qu'une organisation reçoive des instruments et des systèmes dont elle n'a aucune expérience et qu'elle puisse les utiliser de façon efficace. Les donateurs et les gouvernements receveurs ainsi que leurs organisations spécialisées doivent accorder une attention particulière à cet aspect. La part de la formation dans un projet est trop souvent négligée pour des raisons de restrictions budgétaires. Une bonne option consiste à former de façon approfondie des éléments clés du personnel qui, à leur tour, peuvent développer les compétences de leurs collègues («formation des formateurs»). Des ensembles de formation de ce type ont été fournis pendant quelques années par le National Institute of Water and Atmospheric Research (NIWA) (Institut national de recherche sur l'eau et l'atmosphère) qui gère les services hydrologiques et météorologiques de Nouvelle-Zélande. Des personnes clés venant d'autres pays, par exemple des techniciens en instrumentation, des observateurs et des techniciens hydrométriques, suivent un stage de plusieurs semaines et quelques cours théoriques avec diverses unités opérationnelles, ensuite ils sont encouragés à fournir une formation interne au personnel de leur organisation «mère». Une partie de l'accord consiste aussi à ce que les formateurs de Nouvelle-Zélande passent un certain temps avec les organisations intéressées pour s'assurer de bien comprendre les différents environnements de travail et les besoins de chaque participant.

Les organisations responsables de la prévision et de l'annonce des crues sont généralement de grands ministères ou organismes qui ont leurs propres programmes de formation internes. Toutefois, le terrain des opérations nécessite que les opérateurs des services d'annonce des crues maîtrisent d'autres

disciplines, en particulier lorsqu'ils doivent se coordonner avec d'autres services. Ci-après sont récapitulés les cours de formation fournis par le Met Office du Royaume-Uni au personnel de l'Agence pour l'environnement engagé dans les activités de prévision et d'annonce des crues. Le but est de fournir les informations nécessaires aux différents niveaux de personnel pour faire en sorte qu'ils comprennent et utilisent au mieux les informations fournies par les prévisions et les bulletins météorologiques.

#### Cours 1 : Météorologie pour les fonctionnaires spécialisés en matière d'annonce de crues

Objet : fournir une formation appropriée pour permettre aux fonctionnaires spécialisés en matière d'annonce de crues de développer une meilleure compréhension de la météorologie, des informations radar, des mouvements de marée et des produits du Met Office, pour les aider à effectuer leur travail plus efficacement.

Objectifs prioritaires : à la fin du cours, l'étudiant doit être capable de :

- (a) Interpréter la situation synoptique et énoncer comment les masses d'air et les fronts façonnent le climat du Royaume-Uni ;
- (b) Décrire le champ de pluie ;
- (c) Interpréter les prévisions quotidiennes, les annonces de fortes précipitations et les alertes nationales aux événements climatiques extrêmes ;
- (d) Acquérir une compréhension des observations pluviométriques par radar, des prévisions radar et leurs limitations ;
- (e) Exposer la façon dont les prévisions pluviométriques sont générées et leurs limitations ;
- (f) Décrire les caractéristiques des fortes marées et des marées de tempête, y compris les produits de prévision concernés et leurs limitations.

#### Cours 2 : Météorologie générale

Ce cours est plus général que le cours 1 et s'adresse aux membres de personnel qui ont un rôle accessoire en matière de prévision et d'annonce des crues, par exemple les observateurs, les assistants de salle de contrôle ou des salariés détachés temporairement au service d'annonce des crues en provenance d'autres unités. Le cours vise à satisfaire certains niveaux de compétence spécifiques, définis par l'Agence pour l'environnement dans le cadre du programme de formation interne pour les membres de personnel, à savoir :

- (a) Comment interpréter des données et informations météorologiques ;
- (b) Comment interpréter les conditions météorologiques et les données du Met Office;

Objet : fournir une formation météorologique appropriée pour permettre au personnel des organismes de développer une meilleure compréhension des prévisions météorologiques, et donc effectuer leur travail plus efficacement.

Objectifs prioritaires : à la fin du cours, les participants doivent être capables de :

- (a) Interpréter la situation synoptique ;
- (b) Exposer la façon dont les masses d'air et les fronts façonnent le climat du Royaume-Uni ;
- (c) Comprendre comment leur zone locale de bassins versants peut affecter les cumuls pluviométriques ;
- (d) Expliquer les principes de la prévision météorologique et les relier aux pratiques opérationnelles au sein de l'organisme.

Objectifs secondaires:

- (a) Renforcer la compréhension des principes de base de l'interprétation des cartes et données météorologiques ;
- (b) Susciter un intérêt et un enthousiasme pour la météorologie.

#### Cours 3 : Météorologie par radar

Ce cours s'adresse au personnel de prévision et d'annonce des crues avec un besoin spécifique d'interpréter les données météorologiques par radar, c'est-à-dire qu'il est conçu pour les prévisionnistes de service principaux.

Objet : fournir au personnel une compréhension approfondie des radars météorologiques, y compris de ses utilisations et limitations opérationnelles, pour les aider à prendre des décisions en connaissance de cause dans le cadre de leurs fonctions.

Objectifs : à la fin du cours, les participants doivent être capables de :

- (a) Relier les capacités des radars aux exigences opérationnelles ;
- (b) Comprendre les forces et les faiblesses des mesures pluviométriques par radar ;
- (c) Expliquer et utiliser les avantages des images radar en temps réel et les prévisions.

#### Cours 4 : Prévision des marées et des surcotes

De nombreuses régions concernées par l'annonce de crues sont situées le long des estuaires et du littoral où les inondations de la partie aval des fleuves peuvent être influencées par les conditions de marées. Il est donc important que le personnel de prévision et d'annonce des crues prenne conscience des prévisions spécifiques liées aux marées et aux marées de tempêtes.



Objet : cibler les compétences de l'Agence pour l'environnement en matière de gestion des risques de crues, en fournissant des directives pour l'interprétation et la compréhension des prévisions des marées, des marées de tempête, de l'activité des vagues et des raz de marées.

Objectifs : à la fin du cours, les participants doivent être capables de :

- (a) Expliquer l'impact des vagues et des fortes marées sur les inondations ;
- (b) Connaître les avantages et limitations des prévisions des tempêtes et des marées, tel stipulé par le Met Office;
- (c) Démontrer des capacités à interpréter correctement des messages d'alerte aux fortes marées.

Les autres formations appropriées pour le travail de liaison avec les organisations partenaires seraient :

- (a) La présentation aux médias ;
- (b) La gestion des catastrophes et la coordination des services d'urgence ;
- (c) Les campagnes de sensibilisation du public.

### 9.5 **ACQUISITION DE LA COMPRÉHENSION DES PRÉVISIONS ET DES ANNONCES PAR LES UTILISATEURS**

Il est essentiel pour les gestionnaires d'annonce de crues de pleinement comprendre et reconnaître le niveau d'exigences des utilisateurs de sorte que les produits, données et informations en matière d'annonce des crues soient personnalisés selon les besoins (voir également les points 6.4, 8.5 et 8.9). Il existe de nombreux domaines de l'économie nationale, comme le transport, la gestion des situations d'urgence, l'agriculture, l'énergie et la fourniture en eau qui possèdent leurs propres besoins en termes d'information. Reconnaître et satisfaire les besoins des utilisateurs garantit que les avantages dérivés du service de prévision et d'annonce soient considérés comme précieux, et que des investissements soient encouragés. L'accès libre des données et prévisions à de nombreux utilisateurs accroît la valeur et les bénéfices des services de prévision et permet l'établissement d'une communauté d'utilisateurs qui est nécessaire au maintien des activités du service à l'avenir.

Il existe des problèmes dans certains pays préoccupés par l'accès à l'information pour décider si certains éléments spécifiques sur les conditions hydrologiques doivent être accessibles au grand public. Ce sujet peut devenir progressivement très important concernant les rivières transfrontalières, par exemple le Gange et le Brahmapoutre entre l'Inde et le Bangladesh ainsi que le Limpopo

partagé par le Zimbabwe, l'Afrique du Sud et le Mozambique. Les annonces de crue doivent être considérées séparément des bulletins sur l'eau que les organismes de gestion des rivières, dans certains pays, génèrent de façon régulière. Pour des raisons humanitaires, tous les efforts doivent être faits pour faciliter l'information transfrontalière aux pays situés en aval.

La composition et la diffusion des produits de prévision et d'annonce des crues sont très variables. Comme cela est mentionné dans les chapitres précédents, il existe divers moyens de diffuser les produits de prévision et d'annonce. Quels que soient les moyens de diffusion, les éléments critiques du message doivent être communiqués aux utilisateurs et aux populations menacées avec des délais suffisants pour que des mesures préparatives puissent être mises en œuvre ; de plus ces éléments doivent être fournis sous une forme facilement compréhensible. Les produits doivent clairement décrire le danger de crue, identifier la localisation de l'événement, les rivières et cours d'eau concernés, la magnitude prévue de l'événement (pic de crue), le moment où le pic se produira et, si possible, quand le niveau de la rivière redescendra au-dessous du seuil de crue. Des informations spécifiques complémentaires, telles que les infrastructures qui risquent d'être affectées par l'événement, sont importantes à fournir, le cas échéant. Néanmoins, une annonce de ce type représentera inévitablement un compromis entre les informations à fournir idéalement et celles qui peuvent être réellement fournies; de plus les informations fournies seront également classées par ordre de priorité (classement parfois établi en catégories de «ce qu'il est bon de savoir» ou ce qu'il est «nécessaire de savoir»).

Une gamme complète d'annonces rédigées, de diagrammes et de produits cartographiques est produite par différents organismes nationaux (voir point 8.5). Il est essentiel que les autorités émettant les annonces fournissent la formation adéquate aux utilisateurs finaux pour qu'ils sachent comment comprendre et utiliser ces informations pour leurs propres activités. Lorsque des informations de prévision et d'annonce de crues sont diffusées «manuellement», par exemple par fax ou téléphone, le format est largement standardisé pour répondre aux besoins d'une grande diversité d'utilisateurs. Les utilisateurs pourraient être formés pour mieux comprendre et mettre en application ces informations. Cette présentation sous forme de tableau et de texte est désormais commune pour les annonces diffusées par courriel ou sur les sites Internet. On peut critiquer la multiplication de l'utilisation de sites Internet pour diffuser les bulletins et les annonces qui, bien qu'augmentant de façon considérable la disponibilité des informations,

peut aussi créer un sentiment de confusion chez l'utilisateur final devant une telle profusion d'informations, ou cela peut, au contraire, lui permettre de découvrir toute une gamme de services qu'il

ignorait. Cela peut faire l'objet d'un nouveau débat, car les services de prévision et d'annonce des crues ont le devoir de maintenir et de développer la sensibilisation du public.



## ANNEXE I

### RÉFÉRENCES

#### CHAPITRE 1

- Arduino, G., P. Reggiani et E. Todini (éditeurs), 2005 : Special issue: Advances in flood forecasting. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 9(4).
- Bangladesh Water Development Board, Flood Forecasting and Warning Centre (Conseil de développement de l'eau au Bangladesh, Centre de prévision et d'annonce des crues), 2010 : *Annual Flood Report, 2009*. <http://www.ffwc.gov.bd/>.
- Flood Risk Management Research Consortium. <http://www.floodrisk.org.uk>.
- Linnerooth-Bayer, J. et A. Amendola, 2003 : Introduction to special issue on flood risks in Europe. *Risk Anal.*, 23(3):537–543.
- Moore, R.J., A.V. Bell, et D.A. Jones, 2005 : Forecasting for flood warning. *C.R. Geosci.*, 337(1–2):203–217.
- National Oceanic and Atmospheric Administration. <http://www.nws.noaa.gov>.
- Organisation météorologique mondiale : Natural hazards – Floods and flash floods. <http://www.wmo.int/pages/themes/hazards>.
- Organisation météorologique mondiale–Partenariat mondial pour l'eau : Associated Programme on Flood Management. <http://www.apfm.info>.
- Organisation météorologique mondiale–Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO), 1992 : *Glossaire international d'hydrologie*. (OMM-N° 385), Genève.
- United Kingdom Environment Agency (Agence pour l'environnement du Royaume-Uni), 2010 : *The costs of the summer 2007 floods in England*. Flood and Coastal Erosion Risk Management Research and Development Programme, Project SC070039/R1. <http://publications.environmentagency.gov.uk>.

#### CHAPITRE 2

- Bowler, N., C. Pierce et A. Seed, 2006: STEPS: A probabilistic precipitation forecasting scheme which merges an extrapolation nowcast with downscaled NWP. *Q. J. R. Meteorolog. Soc.*, 132:2127–2155.
- Bruen, M., 1999: Some general comments on flood forecasting. Dans : *Proceedings of the EuroConference on Global Change and Catastrophe Risk Management: Flood Risks in Europe*, Laxenburg, Austria, 6–9 juin 1999, IIASA.
- Todini, E., 2001: A Bayesian technique for conditioning radar precipitation estimates to raingauge measurements. *Hydrol. Earth. Syst. Sci.*, 5:187–199.
- Veneziano, D., 2002: *Accuracy evaluation of LIDAR-derived terrain data for highway location*. Center for

Transportation Research and Education (Centre pour la recherche et l'éducation en matière de transport), Iowa State University.

#### CHAPITRE 3

- Beven, K.J., 1997a: TOPMODEL: A critique. *Hydrol. Processes*, 11(9):1069–1086.
- , 1997b: *Distributed Hydrological Modelling: Application of the TOPMODEL Concept*. Chichester, John Wiley and Sons.
- Beven, K.J. et M.J. Kirkby, 1979 : A physically-based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.*, 24(1):43–69.
- Beven, K. et E.F. Wood, 1993 : Flow routing and the hydrological response of channel networks. Dans : *Channel Network Hydrology* (K. Beven et M.J. Kirkby, éditeurs). Chichester, John Wiley and Sons.
- Bonazountas, M. et J.-M. Camboulives, 1981 : Multi-decision analysis for large-scale river-basin reservoir systems. *J. Hydrol.*, 51:139–149.
- Bowles, D.S., J.D. Mathias, S.S. Chauhan et J.D. Countryman, 2004: Reservoir release forecast model for flood operation of the Folsom Project including pre-releases. Dans : *Proceedings of the 2004 USSD Annual Lecture*, St. Louis, MO, United States, March 2004.
- Braga, B. Jr. et O. Massambani (éditeurs), 1997 : *Weather Radar Technology for Water Resources Management*. Montevideo, UNESCO Press.
- Chagnon, S.A., 1999: Record flood-producing rainstorms of 17–18 July 1996 in the Chicago metropolitan area. Part III: Impacts and responses to the flash flooding. *J. Appl. Meteorol.*, 38:273–280.
- Ciarapica, L. et E. Todini, 2002: TOPKAPI: a model for the representation of the rainfall-runoff process at different scales. *Hydrol. Processes*, 16(2):207–229.
- Cluckie, I.D. et C.G. Collier (éditeurs), 1991 : *Hydrological Applications of Weather Radar*. New York, Ellis Harwood.
- Dabberdt, W.F., A. Crook, C. Mueller, J. Hales, S. Zubrick, W. Krajewski, J.C. Doran, C. King, R.N. Keener, R. Bornstein, D. Rodenhuis, P. Kocin, M.A. Rossetti, F. Sharrocks et E.M. Stanley Sr., 2000 : Forecast issues in the urban zone: Report of the 10th Prospectus Development team of the U.S. Weather Research Program. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 81(9):2047–2064.
- DeVries, J.J. et T.V. Hromadka, 1993 : Computer models for surface water. Dans : *Handbook of Hydrology* (D.R. Maidment, ed.). New York, McGraw-Hill.
- Dooge, J.C.I., 1986: Theory of flood routing. Dans : *River Flow Modelling and Forecasting* (D.A. Kraijenhoff et J.R. Moll, éditeurs). Dordrecht. D. Reidel Publishing.
- Duan, Q., H.V. Gupta, S. Sorooshian, A.N. Rousseau et R. Turcotte (éditeurs), 2003 : *Calibration of Watershed*

- Models. Water Science and Application Volume 6.* Washington, American Geophysical Union.
- Engman, E.T. et R.J. Gurney, 1991 : Recent advances and future implications of remote-sensing for hydrologic modelling. Dans : *Recent Advances in the Modeling of Hydrologic Systems, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Recent Advances in the Modeling of Hydrologic Systems*, Sintra, Portugal, 10–23 July 1988 (D.S. Bowles, ed.). Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- Fread, D.L., 1993 : Flow routing. Dans : *Handbook of Hydrology* (D.R. Maidment, ed.). New York, McGraw-Hill.
- Georgakakos, K.P., 1986 : On the design of national, real-time warning systems with capability for site-specific flash flood forecasts. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 67(10):1233–1239.
- Georgakakos, K.P. et W.F. Krajewski, (éditeurs), 2000 : Hydrologic Applications of Weather Radar. *J. Geophys. Res.-Atmospheres*, 105(D2):2213–2313. Special Issue.
- Goswami, M. et K.M. O'Connor, 2007 : Real-time flow forecasting in the absence of quantitative precipitation forecasts: a multi-model approach. *J. Hydrol.*, 334(1–2):125–140.
- Goswami, M., K.M. O'Connor, K.P. Bhattarai et A.Y. Shamseldin, 2005 : Assessing the performance of eight real-time updating models and procedures for the Brosna River. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 9(4):394–411.
- Gray, D.M. et T.D. Prowse, 1993 : Snow and floating ice. Dans : *Handbook of Hydrology* (D.R. Maidment, ed.). New York, McGraw-Hill.
- Güitrón, A., 1981 : Hydroelectrical model for optimal operation of a single multipurpose reservoir. *J. Hydrol.*, 51:67–73.
- Jonkman, S.N., 2005 : Global perspectives on loss of human life caused by floods. *Nat. Hazards*, 34:151–175.
- Kachroo, R.K., 1992: River flow forecasting. Part 5: Applications of a conceptual model. *J. Hydrol.*, 133:141–178.
- Klemeš, V., 2002: Risk analysis: the unbearable cleverness of bluffing. Dans : *Risk, Reliability, Uncertainty and Robustness of Water Resources Systems* (J.J. Bogardi et Z.W. Kundzewicz, éditeurs). International Hydrology Series (UNESCO). Cambridge, Cambridge University Press.
- Knight, D.W. et A.Y. Shamseldin (éditeurs), 2006 : *River Basin Modelling for Flood Risk Mitigation*. London, Taylor and Francis Group.
- Kovar, K. et H.P. Nachtnebel (éditeurs), 1996 : *HydroGIS '96: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management*. IAHS Publication No. 235. Wallingford, IAHS Press.
- Kuo, C.Y. (ed.), 1993 : *Engineering Hydrology*. New York, American Society of Civil Engineers.
- Laurenson, E.M., 1962 : *Hydrograph Synthesis by Runoff Routing* (PhD thesis). Water Research Laboratory, (Laboratoire de recherche sur l'eau), University of New South Wales.
- , 1964: A catchment storage model for runoff routing. *J. Hydrol.*, 2:141–163.
- Laurenson, E.M. and R.G. Mein, 1995 : RORB: hydrograph synthesis by runoff routing. Dans : *Computer Models of Watershed Hydrology* (V.P. Singh, ed.). Littleton, Colorado, Water Resources Publications.
- Liang, G.C., K.M. O'Connor et R.K. Kachroo, 1994 : A multiple-input single-output, variable gain-factor model. *J. Hydrol.*, 155:185–198.
- Malone, T., M. Hartman, S. Tes, P. Katry, S. Pich et B. Pengel, 2007 : Development of improved hydrological forecasting models for the lower Mekong river basin. Dans : *Proceedings of the 5th Annual Flood Forum*. Hô Chi Minh-Ville, Vietnam, 17–18 mai 2007. Mekong River Commission (Commission du fleuve Mekong).
- Mariño, M.A. et B. Mohammadi, 1984 : Multipurpose reservoir operation: 1. Monthly model for a single reservoir. *J. Hydrol.*, 69:1–14.
- Maurier, E.P., J.D. Rhoads, R.O. Dubayah et D.P. Lettenmaier, 2003 : Evaluation of the snow-covered area data product from MODIS. *Hydrol. Processes*, 17:59–71.
- Mohammadi, B. et M.A. Mariño, 1984 : Multipurpose reservoir operation: 2. Daily operation of a multiple reservoir system. *J. Hydrol.*, 69:15–28.
- Moore, R.J., 2002 : Aspects of uncertainty, reliability and risk in flood forecasting systems incorporating weather radar. Dans : *Risk, Reliability, Uncertainty and Robustness of Water Resources Systems* (J.J. Bogardi et Z.W. Kundzewicz, éditeurs). International Hydrology Series (UNESCO). Cambridge, Cambridge University Press.
- Moore, R.J., A.V. Bell, S.J. Cole and D.A. Jones, 2006 : Issues in flood forecasting: ungauged basins, extreme floods and uncertainty. Dans : *Frontiers in Flood Research, 8th Kovacs Colloquium*. UNESCO, Paris, June–July 2006 (I. Tchiguirinskaia, K.N.N. Thein et P. Hubert, éditeurs). IAHS Publ., 305:103–122.
- Moore, R.J., A.V. Bell et D.A. Jones, 2005 : Forecasting for flood warning. *C.R. Geosci.*, 337(1–2):203–217.
- Mutreja, K.N., 1986 : *Applied Hydrology*. New Delhi. Tata McGraw-Hill.
- Nalbantis, I., C. Obled et J.Y. Rodriguez, 1988 : Modélisation pluie-débit: validation par simulation de la méthode DPFT (Rainfall-runoff modelling: validation by simulation of the FDTF method). *La Houille Blanche*, 5–6:415–424.
- Natale, L. et E. Todini, 1977 : A constrained parameter estimation technique for linear models in hydrology. Dans : *Mathematical Models for Surface Water Hydrology* (T.A. Ciriani, U. Maione et J.R. Wallis, éditeurs). Chichester, John Wiley and Sons.
- National Oceanic and Atmospheric Administration-National Weather Service, 2005 : *Summary of Natural Hazard Statistics in the United States*. National Weather Service Office of Climate, Water and

- Weather Services Report. <http://www.nws.noaa.gov/om/hazstats.shtml>.
- National Research Council, 1991 : *Opportunities in the Hydrologic Sciences*. Washington, The National Academies Press.
- , 2006 : *Completing the Forecast: Characterizing and Communicating Uncertainty for Better Decisions Using Weather and Climate Forecasts*. Washington, The National Academies Press.
- O'Connell, P.E., 1991 : A historical perspective. Dans : *Recent Advances in the Modeling of Hydrologic Systems, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Recent Advances in the Modeling of Hydrologic Systems*, Sintra, Portugal, 10-23 July 1988 (D.S. Bowles, ed.). Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- O'Connor, K.M., 2006: River flow forecasting. Dans : *River Basin Modelling for Flood Risk Mitigation* (et A.Y. Shamseldin, éditeurs). London, Taylor and Francis Group.
- Organisation météorologique mondiale, 1988 : *Simulated Real-Time Intercomparison of Hydrological Models*. Rapport d'hydrologie opérationnelle N° 38 (WMO-No. 779), Genève.
- , 1994 : *Guide des pratiques hydrologiques*. Cinquième édition (OMM-N° 168), Genève.
- , 2004 : *Intercomparison of Forecast Models for Streamflow Routing in Large Catchments* (P. Serban, N.L. Crookshank et D.H. Willis). Rapports techniques de l'OMM sur l'hydrologie et les ressources en eau N° 77. (WMO/TD-No. 1247), Genève.
- , 2007 : *Règlement technique*. Vol. III: *Hydrologie*. (OMM-N° 49), Genève.
- Oudin, L., F. Hervieu, C. Michel, C. Perrin, V. Andréassian, F. Anctil et C. Loumagne, 2005a : Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 2 – Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. *J. Hydrol.*, 303:290–306.
- Oudin, L., C. Michel et F. Anctil, 2005b : Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 1 – Can rainfall-runoff models effectively handle detailed potential evapotranspiration inputs? *J. Hydrol.*, 303:275–289.
- Perrin, C., C. Michel et V. Andréassian, 2001 : Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *J. Hydrol.*, 242:275–301.
- , 2003 : Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *J. Hydrol.*, 279:275–289.
- Pielke, R.A. Jr. et M.W. Downton, 2000 : Precipitation and damaging floods: trends in the United States, 1932–1997. *J. Climate*, 13:3625–3637.
- Refsgaard, J.C., 1997 : Validation and intercomparison of different updating procedures for real-time forecasting. *Nord. Hydrol.*, 28:65–84.
- Rehman, H.U., M.W. Zollinger et G.B. Collings, 2003 : Hydrological versus hydraulic routing. Dans : *Proceedings of the Institution of Engineers 28th International Hydrology and Water Resources Symposium*, Wollongong, Australia, 10–14 novembre 2003.
- Riccardi, G.A., E.D. Zimmermann et R.-A. Navarro, 1997 : Zonification of areas with inundation risk by means of mathematical modelling in the Rosario region Argentina. Dans : *Destructive Water, Water-Caused Natural Disasters, Their Abatement and Control* (G.H. Leavesley, H.F. Lins, F. Nobilis, R.S. Parker, V.R. Schneider et F.H.M. van de Ven, éditeurs). Wallingford, IAHS Press.
- Rohde, F.G. et K. Naparaxawong, 1981 : Modified standard operation rules for reservoirs. *J. Hydrol.*, 51:169–177.
- Serban, P. et A.J. Askew, 1991 : Hydrological forecasting and updating procedures. *IAHS Publ.*, 201:357–369.
- Shamseldin, A.Y., 2006 : Real-time river flow forecasting. Dans : *River Basin Modelling for Flood Risk Mitigation* (D.W. Knight et A.Y. Shamseldin, éditeurs). Londres, Taylor and Francis Group.
- Singh, V.P., 1996 : *Kinematic Wave Modeling in Water Resources: Surface Water Hydrology*. New York, John Wiley and Sons.
- Sittner, W.T., C.E. Schauss et J.C. Monro, 1969 : Continuous hydrograph synthesis with an API-type hydrologic model. *Water Resour. Res.*, 5(5):1007–1022.
- Sugawara, M., 1995 : Tank model. Dans : *Computer Models of Watershed Hydrology* (V.P. Singh, ed.). Colorado, Water Resources Publications.
- Szilágyi, J., 2003 : State-space discretization of the Kalinin–Milyukov–Nash cascade in a sample-data system framework for streamflow forecasting. *J. Hydrol. Eng.*, 8(6):339–347.
- Szollösi-Nagy, A., 1976 : Introductory remarks on the state space modelling of water resources systems. *Workshop on the Vistula and Tisza River Basins*, LLASA, Laxenburg, Austria, 11–13 février 1975 (A. Szollösi-Nagy, ed.). *Res. Mem.*, 76(73).
- , 1982 : The discretization of the continuous linear cascade by means of state space analysis. *J. Hydrol.*, 58(3–4):223–236.
- Tan, B.Q. et K.M. O'Connor, 1996 : Application of an empirical infiltration equation in the SMAR conceptual model. *J. Hydrol.*, 185:275–295.
- Tangara, M., 2005 : *Nouvelle Méthode de Prévision de Crue Utilisant un Modèle Pluie-Débit Global* (A New Flood Forecasting Method Based on a Lumped Rainfall-Runoff Model) (PhD thesis). EPHE, Paris. [http://www.cemagref.fr/webgr/Download/Rapports\\_et\\_thèses/2005-TANGARA.pdf](http://www.cemagref.fr/webgr/Download/Rapports_et_thèses/2005-TANGARA.pdf).
- Todini, E., 2007 : Hydrological catchment modelling: past, present and future. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11(1):468–482.
- Todini, E. et L. Ciarapica, 2002 : The TOPKAPI model. Dans : *Mathematical Models of Large Watershed Hydrology* (V.P. Singh et D.K. Frevert, éditeurs). Colorado, Water Resources Publications.
- Toth, E., A. Brath et A. Montanari, 2000 : Comparison of short-term rainfall prediction models for real-time flood forecasting. *J. Hydrol.*, 239:132–147.

- United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR): Integrated flood forecasting, warning and response system. <http://www.unisdr.org/eng/library/isdr-publication/flood-guidelines/isdr-publication-floods-chapitre3.pdf>.
- Urbonas, B.R. et L.A. Roesner, 1993 : Hydrologic design for urban drainage and flood control. Dans : *Handbook of Hydrology* (D.R. Maidment, ed.). New York, McGraw-Hill.
- Vrugt, J.A., 2004 : *Towards Improved Treatment of Parameter Uncertainty in Hydrologic Modelling* (PhD thesis). Université d'Amsterdam. ISBN: 90-76894-46-9.
- Wheater, H.S., A.J. Jakeman et K.J. Beven, 1993 : Progress and directions in rainfall-runoff modelling. Dans : *Modelling Change in Environmental Systems* (A.J. Jakeman, M.B. Beck et M.J. McAleer, éditeurs). Chichester, John Wiley and Sons.
- Xiong, L. et K.M. O'Connor, 2002 : Comparison of four updating models for real-time river flow forecasting. *Hydrol. Sci. J.*, 47(4):621–639.
- Xiong, L., K.M. O'Connor et S. Guo, 2004 : Comparison of three updating schemes using artificial neural networks in flow forecasting. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 8(2):247–255.
- Zhao, R.J., 1992 : The Xinanjiang model applied in China. *J. Hydrol.*, 135:371–381.
- Zhao, R.J. et X.R. Liu, 1995 : The Xinanjiang model. Dans : *Computer Models of Watershed Hydrology* (V.P. Singh, ed.). Colorado, Water Resources Publications.
- Zhao, R.J., Y.L. Zhuang L.R. Fang, X.R. Liu et Q.S. Zhang, 1980 : The Xinanjiang model. Dans : *Hydrological Forecasting, Proceedings of the Oxford Symposium*. Oxford, United Kingdom, April 1980. IAHS Publication 129. Wallingford, IAHS Press.
- #### CHAPITRE 4
- Georgakakos, K.P., 1986 : On the design of national, real-time warning systems with capability for site-specific flash flood forecasts. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 67(10):1233–1239.
- Golding, B., 2006 : Performance of Met Office Forecasting Systems as a Function of Lead Time: Report to Environment Agency. Exeter, Met Office.
- Hankin B., S. Waller, G. Astle et R. Kellagher, 2008 : Mapping space for water: screening for urban flash flooding. *J. Flood Risk Manage.*, 1(1):13–22.
- HR Wallingford, 2002 : Global Hydrological Forecasting Technical and Market Appraisal. Final Report from HR Wallingford to the Met Office. Report EX 4651. Wallingford, HR Wallingford.
- Kalman, R.E., 1960 : A new approach to linear filtering and prediction theory. *Trans. ASME, J. Basic Eng.*, Ser. D., 82:35–45.
- Todini, E. et P. Bongioannini Cerlini, 1999 : TELFLOOD: Technical Report. DISTGA, Université de Bologne.
- #### CHAPITRE 5
- Centre for Ecology and Hydrology, 2007 : *Revitalisation of the FSR/FEH Rainfall-Runoff Method*. Projet de recherche FD1913. Wallingford, Centre for Ecology and Hydrology (Centre pour l'écologie et l'hydrologie).
- Organisation météorologique mondiale, 1983 : *Guide des pratiques climatologiques* (OMM-N° 100), Genève.
- , 2007: *Hydrological Data Rescue (HydRes). Project Proposal/Concept Note* (D. Rutashobya). Genève.
- , 2008: *Guide des pratiques hydrologiques*. Sixième édition (OMM-N° 168), Genève.
- Scottish Environment Protection Agency (Agence écossaise de protection de l'environnement), 2007 : *Extreme Event Analysis. Final Report*. Glasgow, EnviroCentre et le Met Office.
- , 2008 : *Extreme Event and Flood Warning Decision Support Framework (DSF)*. Glasgow, EnviroCentre et le Met Office.
- #### CHAPITRE 7
- Department for Environment, Food and Rural Affairs (Ministère de l'Environnement, de l'Alimentation et des Affaires rurales du Royaume-Uni), 2007 : *Making Space for Water. Feasibility Study into Expanding Flood Warning to Cover Other Flood Risks*, Rapport technique de faisabilité (référence RF5). Londres, Defra.
- Fox, N.I. et C.G. Collier, 2000 : Estimating medium-range catchment flood potential. *Journal of Hydrology*, 237:1–16.
- Golding, B., 2006: *Performance of Met Office Forecasting Systems as a Function of Lead Time: Report to Environment Agency*. Exeter, Met Office.
- Journal of Hydrology, 2001 : *Probabilistic and Ensemble Forecasting in Hydrology* (K.P. Georgakakos et R. Krzysztofowicz, éditeurs). Volume 249. Édition spéciale.
- Met Office, 2006 : Baseline Assessment of Current Forecast Services to the Environment Agency. Phase 1: *Evaluation and Methodology*. Exeter, Met Office.
- #### CHAPITRE 9
- Environment Agency (Agence pour l'environnement), 2005: *Report on Operation Trident Flood Warning Exercise, 2004*. Londres, United Kingdom
- Environment Agency (Agence pour l'environnement du Royaume-Uni).

## ANNEXE II

### ABRÉVIATIONS

AHPS	Service de prévision hydrologique avancé (États-Unis)	GRDC	Centre mondial des données sur l'écoulement
ARCHISS	Programme d'enquête archivistique sur l'histoire du climat (OMM/UNESCO)	GUI	Interface utilisateur graphique
AWIPS	Système avancé de traitement météorologique interactif (États-Unis)	GWP	Partenariat Mondial pour l'Eau
BADC	Centre britannique des données atmosphériques	HEC	Centre d'ingénierie hydrologique (États-Unis)
BBC	Office de la radiodiffusion et télévision britannique	HEPEX	Expérience sur les prévisions hydrologiques d'ensemble
BMD	Département météorologique du Bangladesh	HEC	Centre d'ingénierie hydrologique (États-Unis)
CAD	Cadre d'aide à la décision	HEPEX	Expérience sur les prévisions hydrologiques d'ensemble
CEPMMT	Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme	HIRLAM	Modèle haute résolution à domaine limité
CHPS	Système de prévision hydrologique pour les collectivités (États-Unis)	HMS	Hydrologic Modeling System (HEC, États-Unis)
CICR	Comité international de la Croix-Rouge	HRU	Unité de réponse hydrologique
CLS	Système linéaire contraint	HYRAD	Hydrological Radar System (Royaume-Uni)
CNFFS	China National Flood Forecasting System	IA	Intelligence artificielle
CRC	Contrôle de redondance cyclique	IM	Indice de menace
CSOT	Comité sur les satellites d'observation de la Terre	INMARSAT	Système international de satellites maritimes
Defra	Ministère de l'environnement, de l'alimentation et des affaires rurales (Royaume-Uni)	IP	Protocole Internet
DSL	Ligne d'abonné numérique	IPA	Indice des précipitations antécédentes
DSS	Système d'aide à la prise de décision	IR	Infrarouge
EFFORTS	Système opérationnel européen de prévision des crues en temps réel	IT	Technologies de l'information
EFAS	Système de vigilance des crues européen	KFMWS	Système de prévision et d'annonce des crues coréen
EKF	Filtre de Kalman étendu	LAMBO	Modèle à domaine limité de Bologne (Italie)
EMA	Erreur moyenne absolue	LIDAR	Détection et localisation par la lumière
EnKF	Filtre de Kalman d'ensemble	MAN	Modèle altimétrique numérique
EO	Observation de la Terre	MCG	Modèle de circulation générale
EOS	Système d'observation de la Terre	MCL	Modèle climatique local ou modèle à domaine limité
EQM	Erreur quadratique moyenne	MCR	Modèle climatique régional
EQP	Estimation quantitative des précipitations	MDF	Modulation par déplacement de fréquence
ESA	Agence spatiale européenne	MMMP	Missions mondiales de mesure des précipitations
EUMETSAT	Organisation européenne pour l'exploitation des satellites météorologiques	MNT	Modèle numérique de terrain
FFC	Centre de prévision des crues (Royaume-Uni)	MOSES	Met Office Surface Exchanges Scheme (Royaume-Uni)
FFWC	Centre de prévision et d'annonce des crues (Bangladesh)	MOSES-PDM	MOSES intégrant un modèle d'humidité à distribution de probabilité
FK	Filtre de Kalman	MRC	Commission du fleuve Mekong
FTP	Protocole de transfert de fichiers	MRF	Modèle de prévision à échéance moyenne (États-Unis)
GEM	Global Environmental Multiscale Model (Canada)	MSK	Modulation par déplacement minimal
GFS	Global Forecast System (États-Unis)	MV	Maximum de vraisemblance
GHF	Prévisions hydrologiques mondiales	MUSIC	Projet intégré des mesures de précipitations à capteurs multiples
GIRE	Gestion intégrée des ressources en eau	NAM	Modèle méso-échelle nord-américain
GMSK	Modulation par déplacement minimal gaussien	NASA	Administration américaine pour l'aéronautique et l'espace (États-Unis)
GOES	Satellite géostationnaire d'exploitation pour l'étude de l'environnement	NCEP	Centres nationaux de prévision environnementale (États-Unis)

NEXRAD	Radar de nouvelle génération (États-Unis)	SEPA	Agence écossaise de protection de l'environnement
NGM	Modèle à grilles emboîtées (États-Unis)	SH	Simulation historique
NIWA	Institut national de recherche sur l'eau et l'atmosphère (Nouvelle-Zélande)	SHN	Service hydrologique national
NOAA	Administration américaine pour les océans et l'atmosphère (États-Unis)	SHOFM	Système hydrologique opérationnel à fins multiples (OMM)
NOGAPS	Système opérationnel mondial de prévision atmosphérique de l'US Navy (États-Unis)	SIG	Système d'informations géographiques
NRL	Laboratoire de recherche de la Marine (États-Unis)	SMAR	Modèle conceptuel de prise en compte de l'humidité du sol et de propagation
NWS	Service météorologique national (États-Unis)	SMHN	Service météorologique et hydrologique national
NWSRFS	Système de prévisions fluviales du Service météorologique national (États-Unis)	SMN	Service météorologique national
OMM	Organisation météorologique mondiale	SMS	Service de message court
ONG	Organisation non gouvernementale	SPC	Service de prévisions des crues (France)
ORSM	Modèle spectral régional opérationnel (Hong Kong, Chine)	SSARR	Modèle des écoulements et de gestion des réservoirs
PA	Probabilité d'apparition	STDH	Système de transmission de données hydrométriques
PD	Probabilité de détection	STEPS	Système de prévision d'ensemble à court terme
PDM	Modèle d'humidité à distribution de probabilité (Royaume-Uni)	TFA	Taux de fausses alarmes
PNT	Prévision numérique du temps	TOPKAPI	Modèle d'approximation et d'intégration topographique cinématique
PNUD	Programme des Nations Unies pour le développement	TRMM	Mission de mesure des pluies tropicales
PQP	Prévisions quantitatives des précipitations	TS	Taux de succès
RAMS	Systèmes de modélisation atmosphérique régionaux (États-Unis)	UE	Union européenne
RFMFC	Centre régional de prévision et de gestion des crues (Royaume-Uni)	UIT	Union internationale des télécommunications
RNA	Réseau de neurone artificiel	UM	Modèle global (Met Office du Royaume-Uni)
RORB	Modèle événementiel de propagation du ruissellement de Burroughs	UNESCO	Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture
RSO	Radar à synthèse d'ouverture	UPS	Unité d'alimentation permanente (électrique) ou alimentation sans interruption (ASI)
RVL	Radar à visée latérale	UTC	Temps universel coordonné
SC	Simulation conditionnelle	VSAT	Station terminale à antenne à petite ouverture
SCLS	Système linéaire contraint mixte	WFO	Bureaux de prévisions météorologiques (États-Unis)
SCM	Système convectif à méso-échelle	WHYCOS	Système mondial d'observation du cycle hydrologique
		ZCIT	Zone de convergence intertropicale

---





Pour de plus amples informations, veuillez vous adresser à:

**Organisation météorologique mondiale**

7 bis, avenue de la Paix – Case postale 2300 – CH-1211 Genève 2 – Suisse

**Bureau de la communication et des relations publiques**

Tél.: +41 (0) 22 730 83 14/15 – Fax: +41 (0) 22 730 80 27

Courriel: [cpa@wmo.int](mailto:cpa@wmo.int)

**Bureau de l'hydrologie et des ressources en eau**

**Département du climat et de l'eau**

Tél.: +41 (0) 22 730 84 79 – Fax: +41 (0) 22 730 80 43

Courriel: [dhwr@wmo.int](mailto:dhwr@wmo.int)

[www.wmo.int](http://www.wmo.int)