



Université Sidi Mohammed Ben Abdellah

Faculté des sciences et techniques

www.fst-usmba.ac.ma



Année Universitaire : 2014-2015



Master Sciences et Techniques : Hydrologie de Surface et Qualité des Eaux

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

Annonce de crue et la mise en place d'un système d'alarme dans le bassin de Guelmim

Présenté par:

OUJBBOUR Brahim

Encadré par:

- Pr. Raouf JABRANE

- Mr. Chakir ESSADIK

Soutenu Le 25/06/2015 à 12.00 h devant le jury composé de:

Pr. Naoual RAIS de la FSTF

Pr. Abdelkader EL GAROUANI de la FSTF

Pr. Raouf JABRANE de la FSTF

Dr. Laila MESRAR

Stage effectué à : ABHSMD,

Faculté des Sciences et Techniques - Fès

☒ B.P. 2202 – Route d'Imouzer – FES

☎ 212 (0) 535 60 29 53 Fax : 212 (0) 535 60 82



Résumé :

Dans ce stage on s'intéresse à l'annonce de crues et la mise en place d'un système d'alarme dans le bassin de Guelmim. Il s'agit de présenter les préventions des risques et la protection des populations contre les inondations.

Au Maroc, en guise d'exemple, nous avons travaillé sur le bassin versant de Guelmim qui a subi dernièrement des inondations néfastes et c'est le secteur le plus touché au sud du Maroc.

Le but de cette étude est de proposer des solutions concernant l'installation des Géocapteurs tels que le capteur radar OTT RLS et le RQ 24, pour la prédétection des crues dans le bassin versant du Guelmim en se basant sur les débits mesurés dans les cours d'eau.

Mots clés : Maroc, Annonce de crue, prévision de crue, système d'alarme, Géocapteur, Guelmim.

Abstract :

In this course we look at the flood warning and the establishment of an alarm system in the Guelmim area. It is to present the risk prevention and protection of populations against flooding.

In Morocco, as an example, we worked on the watershed of Guelmim who recently suffered harmful floods and this is the most affected area in southern Morocco. The purpose of this study is to propose solutions regarding the Géocapteurs installation as the OTT RLS radar sensor and RQ 24 for predetection of floods in the watershed of Guelmim based on the flows measured in the rivers.

Keywords : Morocco, flood Announcement, flood forecasting, alarm system, Géocapteur, Guelmim

REMERCIEMENTS

*Je tiens tout d'abord à exprimer ma gratitude et mes profonds Remerciements à mon encadrant Mr. **ESSADIK Chakir** qui a bien voulu m'aider dans la réalisation de ce travail. Grâce leurs conseils judicieux, j'ai pu progresser. J'ai beaucoup apprécié leurs grande disponibilités et écoutes tout au long de la réalisation de ce travail.*

*Je tiens à remercier vivement mon maitre de stage, **JABRANE Raouf**, Grâce aussi à sa confiance j'ai pu m'accomplir totalement dans mes études avec son aide précieuse.*

Mes remerciements s'adressent également à Mesdames et Messieurs les Membres du Jury qui me font l'honneur de juger ce mémoire.

*Je tiens à témoigner ma reconnaissance, à Mr. **QAIMI Abdelati** le délégué de l'Agence du bassin hydraulique de Souss-Massa-Darâa, pour son accueil dans cet organisme.*

*Je souhaite aussi remercier la secrétaire **Haida Fatima Zahra** qui m'informer des actualités dans le stage.*

Enfin, Je ne peux pas passer sous silence sans remercier chaleureusement ma famille et mes amis et pour leur soutien moral tout au long de la réalisation de ce travail.

Liste des Figures :

➤ Fig I.1 : les deux méthodes de la prévision quantitative des précipitations.....	19
➤ Fig I.2: La chaîne de modélisation de MARINE qui est composée de deux éléments : hydrologique et hydraulique.....	21
➤ Fig I.3: Urbain flood early warning system workflow.....	23
➤ Fig I.4 : Les résultats du rendement du système de simulation d'inondation et la visualisation interactive.....	24
➤ Fig I.5 : Les consignes de sécurité en cas d'inondation.....	27
➤ Fig IV.1 : Carte de situation géographique du bassin hydraulique de Guelmim.....	30
➤ Fig IV.2 : Carte de découpage administratif du bassin hydraulique de Guelmim.....	32
➤ Fig IV.3 : Carte géologique du bassin de Guelmim (Source : cartes géologiques de Foug El Hassane - Assa et Goulmine-Draâ inférieur.....	36
➤ Fig IV.4 : Coupes géologiques au centre de la zone d'étude	37
➤ Fig IV.5 : Log lithostratigraphique synthétique de la plaine de Guelmim	38
➤ Fig V.1: pluviométrie moyenne mensuelle au niveau de station d'Assaka et Taghjiyt.....	39
➤ Fig V.2 : Evolution de la pluie enregistrée au niveau de la station de Guelmim.....	40
➤ Fig V.3 : Montre une carte de sous bassin du Guelmim.....	42
➤ Fig VI.1: Remblai d'accès du pont en cours de construction par l'ONDA emporté par la crue.....	45
➤ Fig VI.2: Débordement de la crue sur le Pont sur la N1 Vers Tantan.....	46
➤ Fig VI.3: hauteur d'eau dans l'oued Oum laachar.....	46
➤ Fig VI.4: Débordement de la crue sur le Pont sur la N12 Vers Sidi Ifni.....	47
➤ Fig VI.5: Destruction du Pont sur la N1 Vers Tantan.....	48
➤ Fig VI.6: Centre de la Ville de Guelmim inondé.....	49
➤ Fig VI.7: Destruction de la voirie dans les quartiers en points bas de la ville.....	49
➤ Fig VI.8: Destruction de ponts et d'ouvrage d'art sur différents axes routiers.....	51
➤ Fig VII.1 : montre le capteur Radar OTT_RLS.....	54
➤ Fig VII.2 : Exemple d'application 1 : Montage d'OTT RLS sur un pont.....	55
➤ Fig VII.3 : Exemple d'application2 : Montage d'OTT RLS sur une construction auxiliaire	56
➤ Fig VII.4 : Montage d'OTT RLS sur une construction auxiliaire et sur un pont.....	56
➤ Fig VII.6 : Montre Le Radar RQ-24.....	57
➤ Fig VII.7 : schéma montre le méthode de calcule le débit d'une rivière.....	59
➤ Fig VII.8: Montre la période des crues.....	60

➤ Fig VII.9 : Réseau hydrographique, sous bassins hydrologiques.....	62
➤ Fig VII.10: Schéma d'emplacement des Géocapteurs.....	63

Liste de tableaux :

- Tab I.1: La mesure du rendement de la simulation d'inondation interactive et sa visualisation pour les deux scénarios avec un hydrogramme différent.....25
- Tab IV.1 : Découpage administratif.....31
- Tab V.1: Pluviométrie moyenne annuelle.....41
- Tab V.2 : Caractéristiques morphologiques des sous bassin hydrographiques.....42
- Tab V.3 : Les pluies tombées au niveau du bassin de Guelmim et Bas Draa.....43
- Tab V.4 : Les apports calculés au niveau de la station hydrologique d'Assaka.....44

Table de matière :

Résumé

REMERCIEMENTS

Introduction.....	7
Chapitre I- Connaissance des crues	10
I.1 Les crues à cinétique lente.....	10
I.2 Les crues à cinétique rapide.....	10
I.3 Le processus conditionnant les crues et les inondations.....	13
I.3.1 Le ruissellement.....	13
I.3.2 Le temps de concentration (ou durée caractéristique).....	13
I.3.3 La propagation de la crue.....	14
I.3.4 Le débordement.....	14
I.4 Les conséquences dues aux inondations.....	15
I.5 Mesures internationales de prévention durable des inondations	15
II.5.1 Réduire la vulnérabilité.....	15
II.5.2 Anticipation de la crise.....	16
Chapitre III-Systèmes d’annonce de crue.....	16
III.1 La prévision.....	16
III.2 La prédétermination.....	17
III.3 Exemple des systèmes d’annonce de crue dans le monde.....	17
III.3.1 Introduction	17
III.3.2 Model Output Statistics (la prévision quantitative des précipitations).....	17
III.3.3 Prédétermination des crues éclair par MARINE.....	20
III.3.4 Le système d’alerte précoce des inondations urbain (Urbain flood early warning system (EWS)).....	22
III.4 L’organisation de secours et type de protection.....	26
III.4.1 Prise en compte du risque inondation dans l’aménagement	26
III.4.2 L’information préventive	26

III.4.3 Le processus d'alerte.....	27
III.4.4 L'organisation des secours.....	28
Chapitre IV : mise en place d'un système d'alarme dans le bassin de Guelmim	
IV.1 DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE.....	30
IV.1.1 Situation géographique du bassin de Guelmim.....	30
IV.1.2 Contexte Géomorphologique.....	32
IV.1.3 Contexte géologique.....	33
IV.1.4 Lithostragraphie régionale.....	37
Chapitre V : HYDROLOGIQUE DU BASSIN GUELMIM.....	39
V.1. Climat	39
V.2. Les eaux de surface	42
V.3. Pluies et crues mesurées	43
V.4 DEGATS ENREGISTRE.....	44
Chapitre VII : Désignation matériel et Choix d'emplacement	50
VII.1 Installation des Géocapteurs	50
VII.1.1 Le capteur Radar OTT_RLS	50
VII.1.2 Le Radar RQ-24.....	53
VII.2 Choix d'emplacement :.....	59
VII.3 Coût Estimatif du projet.....	64
CONCLUSION GENERALE	65
Référence.....	68
Annexe.....	69
Liste des figures.....	71
Liste des tableaux.....	72

Introduction

De nos jours, il est devenu fréquent d'entendre des catastrophes naturelles passer ayant des impacts sur l'homme mais sur lesquelles ils peuvent avoir une incidence. Et même si la Terre est toujours ronde et bleue, elle subit ce qu'on appelle le changement climatique. Ces changements combinés à d'autres causes provoquent de plus en plus de catastrophes naturelles. De nos jours près de 300 millions de personnes en moyenne chaque année, sont affectées par des catastrophes naturelles et près de 78 000 y ont trouvé la mort. La mortalité, due aux catastrophes naturelles, a augmenté de 60 % entre les années 1980 et les années 2000 et le nombre de catastrophes a été multiplié par trois en cinquante ans, avec un coût qui atteint 1.600 milliards de dollars de 1980 à 2009.

Lorsque l'on parle de catastrophe naturelle, cela fait référence à un événement brutal, exposant des populations et leurs infrastructures à de lourds dégâts. On distingue principalement deux grandes sortes de catastrophes : les climatiques et les telluriques. Les climatiques peuvent prendre diverses formes, cyclones, tempêtes, inondations, grandes chaleurs, sécheresses. Il est à signaler que la moitié des catastrophes naturelles mondiales sont des inondations, selon la base de données internationale sur les catastrophes EM-DAT, 2 470 crues se sont produites à l'échelle internationale lors des vingt dernières années (1999 et 2009). 147 457 personnes y ont perdu la vie et les dommages ont été estimés à 372,5 milliards de \$ US.

Le phénomène des inondations au Maroc a commencé à être ressenti d'une façon plus accrue lors des deux dernières décennies, principalement en raison de l'occupation croissante des zones vulnérables d'une part et de l'aggravation des phénomènes extrêmes (sécheresse et crues), suite aux changements climatiques d'autre part engendrant de forts orages localisés à l'origine de crues rapides et violentes. Et la province de Guelmim est la meilleure preuve à ce phénomène extrême (inondation de 2014).

Si une inondation concerne des zones habitées, cela entraînera des conséquences plus ou moins graves sur les populations, leurs habitations, leurs biens et l'environnement raison pour laquelle une étude de restructuration et protection contre les inondations du bassin de Guelmim est mis en place et qui survient dans le contexte de l'aménagement de la région, et a été lancée par l'Agence du bassin hydraulique SOUS MASSA DARA.

L'étude a pour objectif de remettre à niveau et de protéger la ville de manière à contribuer à l'amélioration des conditions de vie de ses habitants. Le projet de restructuration et protection contre les inondations devra donc apporter les solutions visant à :

- Définir les mesures nécessaires pour la protection du site contre les catastrophes naturelles, notamment l'inondation d'Oued Oum Laachar
- Mettre en place un système d'alarme adapté aux contraintes du site.

Donc le présent rapport comprendra deux parties :

Tout d'abord, la 1ère partie est consacrée à la présentation de généralités sur les inondations et les systèmes d'annonce de crue.

Enfin dans la 2ème partie, nous présenterons l'étude d'intégration d'un système d'annonce de crue du bassin de Guelmim.

Chapitre I : connaissance de crues

Les mécanismes de génération des crues en rivières et fleuves, le plus souvent à la suite de précipitations abondantes ou de fonte des neiges conduisent à une élévation de l'eau dans le lit mineur, lieu des écoulements ordinaires, puis à un débordement dans le lit majeur (espace d'inondations).

Depuis le 19^{ème} siècle, on classe les crues en rapides et en lentes, différenciées par la brutalité, la durée, le volume.

I.1 Les crues à cinétique lente

Elles sont généralement dues » à des épisodes pluvieux « successifs d'origine océanique de longue durée (de plusieurs jours à plusieurs semaines, voire mois) mais d'intensité modeste, de quelques mm à quelques dizaines de mm par jour.

Leur montée des eaux, ainsi que la décrue sont lentes et progressives, et donc largement prévisibles.

Elles durent de plusieurs jours à quelques semaines avec des débits de pointe en crue centennale pouvant se situer entre 2 500 et 12 000 m³/s selon les bassins compris entre 15 000 et 100 000 km².

Ce sont essentiellement les volumes de telles crues qui sont importants : ils peuvent être de l'ordre de quelques centaines de millions de m³, voire de plusieurs milliards de m³.

Les crues lentes sont rarement la cause de décès directs, mais ont des conséquences lourdes sur les infrastructures, les biens, les activités économiques et environnementales.

I.2 Les crues à cinétique rapide

Ces crues peuvent se décomposer grossièrement en trois catégories où les principaux ingrédients sont dans l'ordre :

- ✓ intensité des pluies ;
- ✓ surface réceptrice ;
- ✓ pente;

- ✓ forme du bassin versant ;
- ✓ structure du réseau hydrologique ;
- ✓ pédologie ;
- ✓ végétation.

Elles peuvent durer d'une heure à plusieurs heures, avec une réaction rapide aux pluies, un gradient élevé de montée du débit, des débits de pointes très importants mais un volume total modeste.

On distingue :

« **Les crues instantanées**, brèves, dues à des pluies d'orages isolés, de quelques dizaines à plus de cent mm/heure pendant une ou deux heures sur quelques hectares à quelques km² (...) Il est admis qu'elles ont une possibilité d'occurrence uniforme sur une surface importante avec la même loi de probabilité d'intensité».

Si la situation météorologique générale propice à ce type d'évènements peut être souvent prévue vingt-quatre à l'avance, leur localisation et leur évolution ne sont prévisibles qu'à très courte échéance, soit souvent moins d'une heure après la détection des premières manifestations caractéristiques.

« **Les crues subites** dites "éclair" (flash flood) se produisent sur des surfaces de quelques km², dues à des pluies orageuses intenses plus structurées dans l'espace et le temps, de 100 à 300 millimètres dans certaines régions».

Là encore, la situation météorologique générale peut être prévue à l'avance, mais les caractéristiques du phénomène et les crues qui en résultent ne sont prévisibles qu'avec un délai ne dépassant guère quelques heures.

Par la suite nous désignerons par **crues soudaines** les crues instantanées et les crues subites.

« **Les crues rapides** se produisent sur des surfaces de 500 km² à 5000 km² pendant 6 à 36 heures avec un temps de concentration de moins de 12 heures pour des bassins de 1000 km². Les pluies qui en sont à l'origine en métropole (circulation météorologique de sud à sud-est ...) ont des intensités horaires de plusieurs dizaines de mm et des cumuls de plusieurs centaines de mm ».

Les crues rapides sont générées par des situations météorologiques instables de plus grande échelle correspondant à des conflits de masses d'air stationnaires ou par le soulèvement d'air chaud au contact des reliefs.

De telles situations sont souvent prévisibles avec une échéance de plus de 24 heures, mais des cellules isolées particulièrement actives et de courte durée de vie évoluent en permanence dans le système précité.

Les crues rapides, violentes, causent des pertes en vies humaines et des dégâts importants mais localisés.

Cependant des définitions plus récentes des crues rapides ont été proposées à l'aune des réflexions sur la prévention des risques :

Une crue est dite **rapide** « lorsque le temps nécessaire à la mise en sécurité des personnes, incluant le délai de déclenchement de l'alerte et l'évacuation, est supérieur au temps de mise en fonctionnement des déversoirs (temps de concentration de la crue) ». Ceci nous semble important pour la suite du rapport.

Une telle définition ne repose pas sur l'hydraulique, ni sur l'hydrologie car elle fait appel à des considérations relevant de l'organisation administrative retenue pour gérer la crise. Une même crue serait ainsi plus ou moins rapide selon les performances de l'organisation administrative.

I.3 Le processus conditionnant les crues et les inondations

Le processus à l'origine des crues et des inondations suppose se basé sur des différents facteurs contribuant à la formation et à l'augmentation temporaire des débits d'un cours d'eau notamment :

I.3.1 L'eau mobilisable

La source de l'eau mobilisable capable d'engendrer des inondations peut s'agir :

- De la fonte de neiges ou de glaces au moment d'un redoux, associée ou non à des pluies ;
- des pluies répétées et prolongées de régime océanique, qui affecteront plutôt un grand bassin versant ;
- D'averses relativement courtes mais intenses qui pourront toucher la totalité de la superficie de petits bassins versants de quelques kilomètres carrés.

I.3.2 Le ruissellement

Le ruissellement étroitement lié à la nature du sol et de son occupation de surface, correspond à la part de l'eau qui n'a pas été interceptée par le feuillage, ni restituée à l'atmosphère par évaporation, et qui n'a pas pu s'infiltrer, ou qui resurgit très rapidement après infiltration et écoulement hypodermique ou souterrain. Il sera donc d'autant plus faible que la couverture végétale sera dense (arbres, herbes et tapis d'humus) et que les sols seront profonds et non saturés par des épisodes pluvieux récents. Inversement, l'imperméabilisation des sols due à l'urbanisation (infrastructures, constructions) le favorisera. Par ailleurs, l'intensité de la pluie joue aussi un rôle non négligeable en créant, au-delà d'une certaine valeur, un film d'eau à la surface du sol, qui va conduire à un écoulement maximum.

1.3.3 Le temps de concentration (ou durée caractéristique)

Le temps de concentration est défini par la durée nécessaire pour qu'une goutte d'eau ayant le plus long chemin hydraulique à parcourir parvienne jusqu'à l'exutoire. Il est donc fonction de la taille et de la forme du bassin versant, de la topographie et de l'occupation des sols.

1.3.4 La propagation de la crue

L'eau de ruissellement se rassemble dans un axe drainant où elle forme une crue qui se propage vers l'aval. Le débit de pointe de la crue est d'autant plus amorti et sa propagation ralentie que le champ d'écoulement est plus large et que la pente est plus faible.

1.3.5 Le débordement

Le phénomène de débordement est consécutif à la propagation d'un débit supérieur à celui que peut évacuer le lit mineur, dont la capacité est généralement limitée à des débits de crues de période de retour de l'ordre de 1 à 5 ans. Il peut se produire une ou plusieurs fois par an ou seulement tous les dix ans en moyenne voire tous les cent ans. En débordant, l'eau alimente massivement la nappe phréatique située sous le champ d'inondation et approvisionne les milieux de vie des végétaux et des animaux aquatiques ou hygrophiles.

1.4 Les conséquences dues aux inondations

L'impact le plus fréquent des inondations sur l'activité humaine réside dans les activités agricoles qui sont les premières touchées, en bordure des plans et cours d'eau en particulier lors des crues saisonnières avec parfois des pertes de récoltes.

Les effets directs les plus significatifs sur la santé de l'homme se manifestent durant l'inondation et comprennent :

La mortalité due à la noyade, aux crises cardiaques et aux blessures, le nombre de décès associés à des inondations est étroitement lié à la dangerosité de l'inondation (rapidité de

la montée des eaux, hauteur atteinte par la crue, objets charriés par les eaux en crue) et le comportement des victimes.

Blessures (entorses/foules, lacérations, contusions, etc.) sont occasionnées par les objets charriés, chutes de bâtiments et d'ouvrages et la conséquence de l'entraînement des personnes par l'eau.

I.5 Mesures internationales de prévention durable des inondations

La prévention regroupe l'ensemble des dispositions à mettre en œuvre pour réduire l'impact d'un phénomène naturel prévisible sur les personnes, les biens et l'environnement.

En matière d'inondation, il est difficile d'empêcher les événements de se produire. De plus, les ouvrages de protection collectifs, comme les digues, ne peuvent garantir une protection absolue. En conséquence, le meilleur moyen de prévention contre les risques d'inondation est d'éviter d'urbaniser les zones exposées. Pour autant, de nombreuses habitations et zones d'activités existent déjà dans ces zones.

La sensibilisation du public, l'éducation et l'information constituent un élément important des stratégies préventives : on estime qu'environ 40% des effets des inondations sur la santé sont directement liés à des erreurs de comportement.

II.5.1 Réduire la vulnérabilité

Face au risque d'inondation, les spécialistes préconisent d'agir sur la réduction de la vulnérabilité des enjeux, c'est-à-dire sur la limitation des éventuels dommages : on parle de mitigation. Celle-ci concerne les biens économiques : les constructions (privées et publiques), les bâtiments industriels et commerciaux, ceux nécessaires à la gestion de crise, les réseaux de communication, d'électricité, d'eau, de communication, etc. La mitigation suppose notamment la formation des divers intervenants (architectes, ingénieurs en génie civil, entrepreneurs etc.) en matière de conception et de prise en

compte des phénomènes naturels (climatiques et géologiques), ainsi que la définition de règles de construction. Leur application doit par ailleurs être garantie par un contrôle des ouvrages. Cette action sera d'autant plus efficace quand tous les acteurs concernés, c'est-à-dire également les intermédiaires tels que les assureurs et les maîtres d'œuvre, y seront sensibilisés. Si l'État et les communes ont des responsabilités dans ce domaine, les propriétaires, locataires ou plus simples citoyens, peuvent contribuer à se protéger efficacement et diminuer leur propre vulnérabilité. Pour cela, il est primordial que chacun connaisse au préalable le phénomène auquel il est exposé, en s'informant sur sa description, l'accident possible et les dommages potentiels.

II.5.2 Anticipation de la crise

Une bonne anticipation de la crise est toujours nécessaire. La meilleure réponse permettant de faire face à la gravité d'une inondation en attendant les secours est un plan familial de mise en sûreté (PFMS). Un tel plan se prépare à l'avance, afin d'éviter la panique au moment de l'événement. Il est recommandé d'y faire figurer des informations sur le signal d'alerte (s'il existe) et les consignes de sécurité, les numéros utiles (urgence, services de l'État, compagnie).

Chapitre III : Systèmes d'annonce de crue

L'inondation est un risque prévisible dans son intensité, mais il est difficile de connaître le moment où il se manifesterá. La prévention des risques et la protection des populations nécessitent que soient prises des mesures collectives et des mesures individuelles.

III.1 La prévision

La prévision regroupe l'ensemble des dispositions à mettre en œuvre pour réduire l'impact d'un phénomène naturel prévisible sur les personnes et les biens. L'inondation est un risque prévisible dans son intensité, mais il est difficile de connaître le moment où elle se manifesterá. Les paramètres concourant à la formation des crues sont nombreux, cependant l'un d'eux est déterminant : la pluie. La prévision des inondations consiste donc principalement en une observation continue des précipitations.

La surveillance météorologique est complétée par un suivi des débits dans la plupart des cours d'eau de plaine, à l'aide de réseaux de collecte de données.

Ce système fonctionne pour les rivières possédant un grand bassin versant, dont le temps de concentration est supérieur à 10 heures. Les cours d'eau à crues brutales ne peuvent être couverts par un tel service, sachant qu'on ne pourrait pas en garantir la fiabilité lors d'une montée rapide des eaux : à chaque citoyen d'être alors vigilant lorsqu'il se trouve dans une zone soumise à ce risque.

L'amélioration de la prévision des crues passe ainsi par :

- la mise en place d'un réseau de surveillance météorologique permettant de mesurer les pluies couvrant les zones à risque ;
- la mise en œuvre de modèles performants de prévision des crues ;

- la mise à disposition des autorités locales d'une information plus compréhensible et plus fiable.

III.2 La prédétermination

La prédétermination peut être définie comme l'annonce des caractéristiques physiques et statistiques d'un événement futur non précisément daté, différant en cela de la prévision qui s'attache à dater l'annonce d'un événement physique spécifié. La prédétermination sera donc inséparable de la notion de probabilité d'occurrence d'un événement donné ou, de façon équivalente, de sa durée de retour. En matière de crues, la prédétermination sert à estimer, pour une section donnée d'un cours d'eau, soit la probabilité de dépassement d'un débit donné, soit, de façon symétrique, le débit ayant une probabilité donnée d'être dépassé.

Ces estimations, à l'encontre des approches basées sur les PMP/QMP (pluies et débits maximums possibles).

III.3 Exemple des systèmes d'annonce de crue dans le monde :

III.3.1 Introduction

Les prévisions de précipitations à échéance de deux ou trois jours correspondent à des besoins socio-économiques importants. En particulier, la prévision des fortes pluies potentiellement génératrices de catastrophe suscite une attention particulière. Or, cette prévision est particulièrement difficile à élaborer à l'aide de modules météorologiques, en raison de la complexité et du nombre de processus mis en jeu. Ceci explique les performances relativement décevantes de ces modèles, dont tout le monde reconnaît, par ailleurs, les progrès dans le domaine de la prévision de la circulation générale (champs de pression, vent, température).

III.3.2 Model Output Statistics (la prévision quantitative des précipitations)

La prévision des fortes pluies potentiellement génératrices de catastrophe suscite une attention particulière. Or, cette prévision est particulièrement difficile à élaborer à l'aide de modules météorologiques, en raison de la complexité et du nombre de processus mis en jeu. Ceci explique l'adaptation statistique en sortie de module météorologique par des Model Output Statistics ou MOS qui ont été utilisés pour relier la variable à prévoir ou prédictant aux prédicteurs issus d'un module météorologique. La méthode est fondée sur un traitement statistique des observations passées et revient à formaliser la démarche naturelle du prévisionniste : sélectionner dans l'historique des situations météorologiques analogues à une situation en cours appelée C - analogue. On en déduit alors, à partir des effets observés pour ces situations analogues, les effets potentiels pour la situation en cours C. Cette approche subjective du prévisionniste a été transposée dans une procédure numérique reproductible qui consiste à sélectionner, dans un fichier historique, les situations calculent une prévision de pluie à partir des précipitations observées lors de ces situations analogues. Cette méthode, a été utilisée de façon opérationnelle pour répondre aux préoccupations de la production hydraulique. En effet, pour mieux gérer à court terme les ressources en eau et anticiper les risques de crue sur des bassins français montagneux équipés d'aménagements hydroélectriques, une prévision quantitative des précipitations pour les 96 h à venir, par tranches de 24 h, était utile. Dans ce chapitre nous présenterons deux types de modèles et leur comparaison, il s'agit du modèle de référence et celui de TW-GR.

Pour le modèle de référence, chaque jour est représenté par les six premières composantes principales (CP) du champ de Géo-potentiel 700 hPa, Z1700 à Z6700. Puis, un ensemble d'analogues est sélectionné grâce à une distance euclidienne entre la journée en cours C et la situation analogue J du passé :

$$D^2 (J, C) = \sum_{i=1}^6 [Z_i^{700} (J) - Z_i^{700} (C)]^2$$

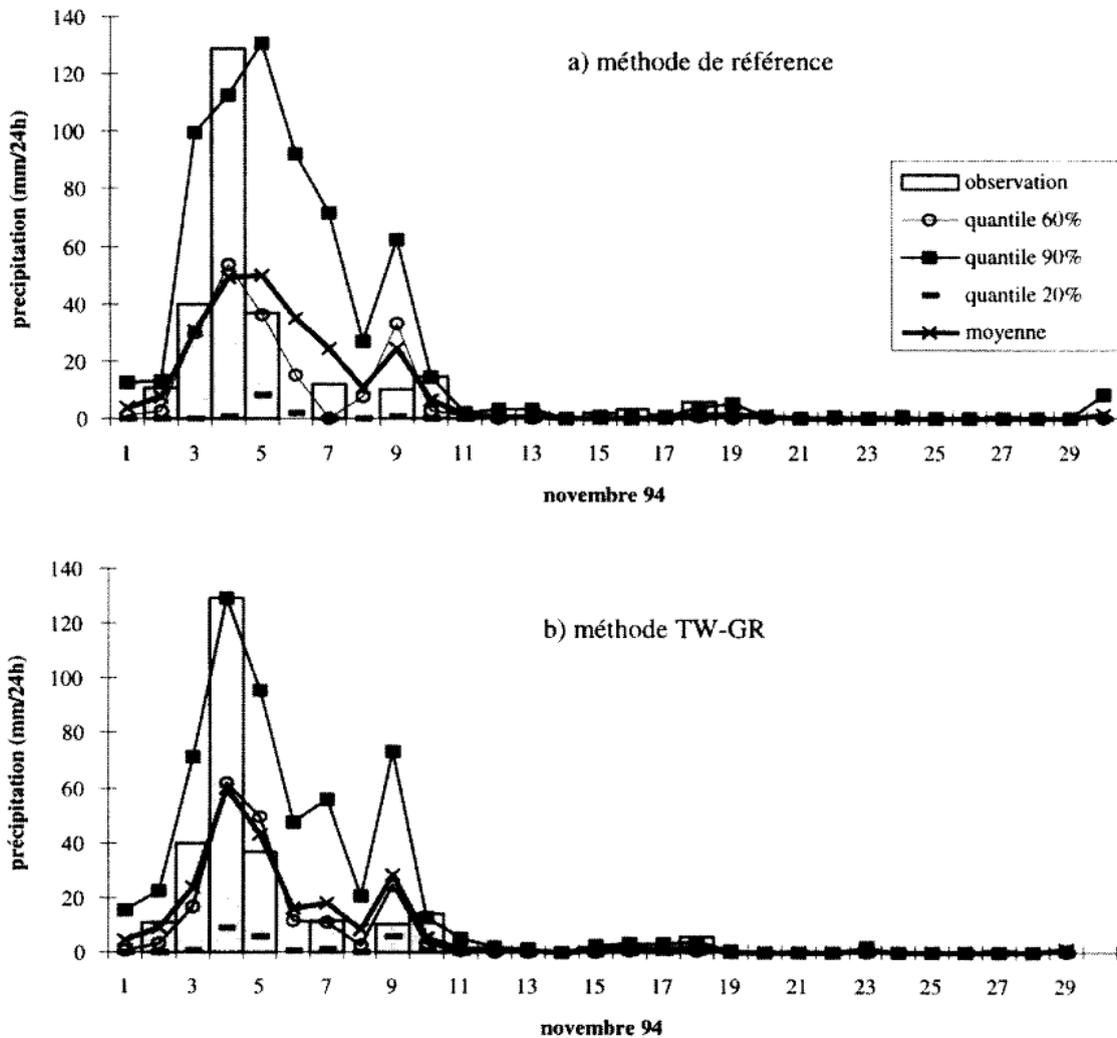


Fig III.1 : les deux méthodes de la prévision quantitative des précipitations

La prévision quantilique, d'abord donnée par la méthode de référence, puis par la méthode TW-GR, est comparée aux précipitations observées. Si la méthode de référence avait prévu, et même anticipé, le pic du 4 novembre, la méthode TW-GR l'a mieux ciblé.

La méthode TW-GR utilise comme prédicteurs les champs de géopotentiels 700 et 1 000 hPa observés, à 0 h et prévus à 24 h, fournis aux points d'une grille optimisée, et

sélectionne les analogues avec le score de Teweles-Wobus. Le critère de Teweles-Wobus (Teweles-Wobus, 1954), déjà proposé dans la littérature pour sélectionner les analogues dans le cadre d'une prévision de température (Woodcock, 1980), remplit ces conditions. Mis au point dans les années 50 pour juger de la qualité des prévisions, il met l'accent sur la circulation, donc plutôt sur les champs de vents que sur les champs de géopotential, en considérant en chaque point de grille, non pas le géopotential, mais ses deux gradients sud-nord et est-ouest :

$$TW = 100 \times \frac{\sum_i |e_G^i| + \sum_j |e_G^j|}{\sum_i |G_L^i| + \sum_j |G_L^j|}$$

Où e_G est l'écart entre les gradients de géopotential prévu et observe, entre deux points de grille adjacents et G_L le maximum de ces deux gradients. La sommation se fait sur tous les couples de points adjacents d'un domaine prédéfini. En fait, l'objection principale mise en avant pour l'utilisation de ce type de méthode est la nécessité de constituer, ou d'acquérir, un fichier historique de situations d'au moins 40 ans, le plus homogène possible.

III.3.3 Prédétermination des crues éclair par MARINE :

L'outil MARINE (Modélisation de l'Anticipation du Ruissellement et des Inondations pour des événements Extrêmes) est utilisé pour modéliser le type des crues de fréquence faible générées par des événements météorologiques intenses et localisés en temps réel. Il s'agit d'un modèle à base physique et distribué pour tous les compartiments de la modélisation : en amont, la genèse de la crue par le ruissellement de la pluie sur les versants (modèle pluie-débit) ; en aval, la propagation de la crue dans la rivière (résolution des équations de Saint-Venant). Il intègre des données issues de technologies récentes – satellitales pour les modèles numériques de terrain, le réseau de drainage ou

l'occupation des sols et radars hydrologiques pour la variabilité spatiale et temporelle de la pluie. L'objectif final de MARINE est de fournir des informations pertinentes pour les utilisateurs en temps réel. Les résultats des simulations obtenus pour la crue de l'Orbieu montrent que MARINE peut fournir des prévisions directement exploitables par les prévisionnistes pour anticiper ce type de crue éclair (figure 2). Par ailleurs, ce modèle est déjà testé dans le Service d'annonce des crues en Haute-Garonne.

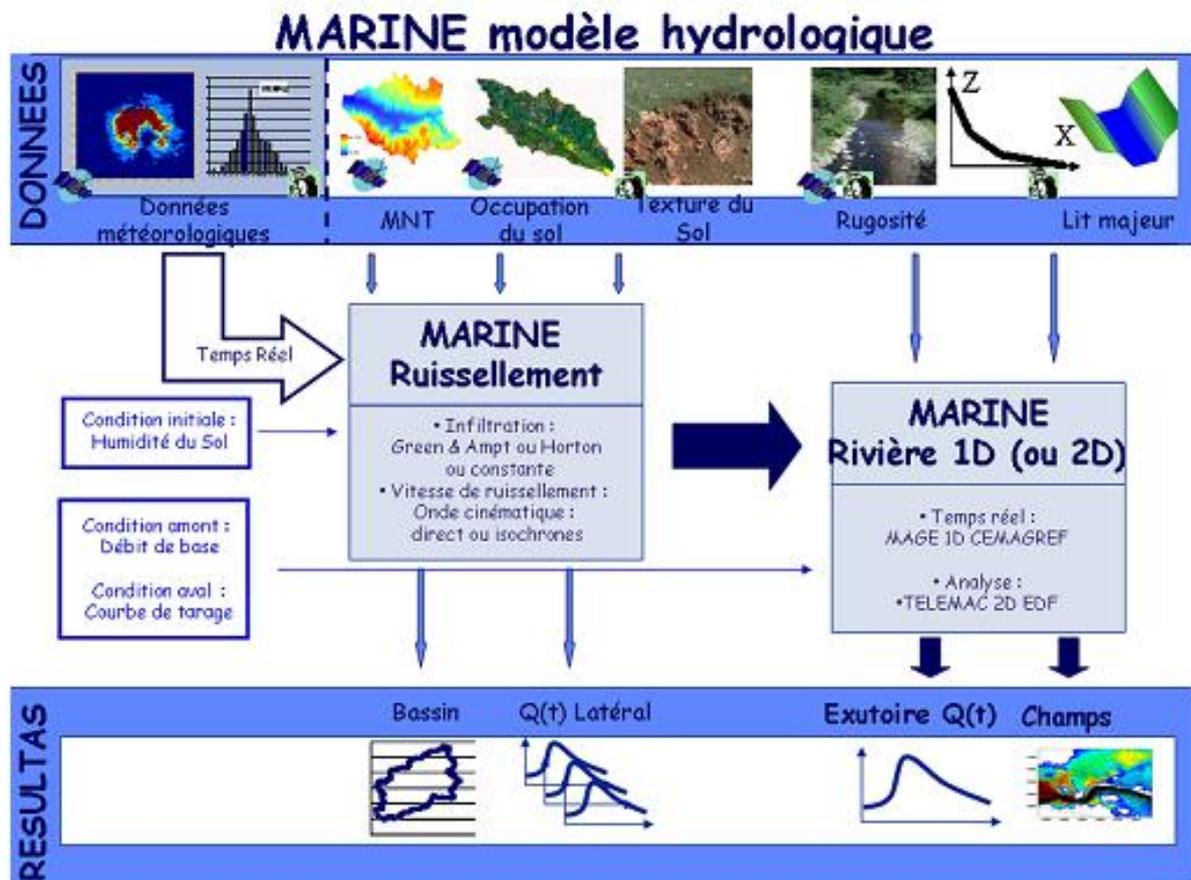


Fig III.2: La chaîne de modélisation de MARINE qui est composée de deux éléments : hydrologique et hydraulique

Le module hydrologique de MARINE est un modèle de type pluie-débit qui utilise des données minimales nécessaires qui sont le modèle numérique de terrain, la carte d'occupation des sols et la carte pédologique de celui-ci. Les conditions initiales résultent

d'une estimation de la teneur en eau initiale du sol, et des données en temps réel qui sont la hauteur d'eau précipitée (calculée à partir des images radar par les modèles météorologiques). Toutes ces données peuvent être d'origine satellitale. Le modèle fournit les hydrogrammes de crue des sous-bassins en n'importe quel point de la rivière, ces derniers sont les entrées du second module de MARINE.

Le module hydraulique de MARINE propage la crue dans les cours d'eau principaux et permet de connaître l'hydrogramme de crue à l'aval. Pour permettre une utilisation en temps réel, il résout les équations de Barré de Saint-Venant, à l'aide du code de calcul. Les données minimales requises sont une représentation du lit mineur (profil en long, profils en travers, rugosité...) ainsi qu'une représentation du lit moyen (reconstitué à partir des lignes de niveau du MNT). Ce module fournit des hydrogrammes de crue tout le long de la rivière et en particulier à l'exutoire du bassin versant. Lorsque les mesures précises font défaut, une schématisation bien construite du lit de la rivière peut suffire à fournir des résultats adaptés à la prévision en temps réel. Les données disponibles vont ainsi fixer la précision des hydrogrammes de crue calculés par le modèle hydraulique et, par suite, la précision des zones inondées. La prévision en temps réel impose que l'on fasse des hypothèses sur le fonctionnement de la crue.

III.3.4 Le système d'alerte précoce des inondations urbain (Urban flood early warning system (EWS))

Il s'agit d'un prototype du système d'alerte précoce des inondations. Le système réseaux des capteurs de moniteurs installés dans défenses contre les inondations (digues, barrage, etc.), détecte des anomalies de signal du capteur, calcule la probabilité de défaillance de la digue, et simule des scénarios possibles de brèche de digue et la propagation des crues. Tous les informations et les résultats de simulation sont introduits ensuite dans un système d'aide à la décision interactive qui aide les gestionnaires de la digue et les autorités de la ville à prendre des décisions éclairées en cas d'urgence et dans l'évaluation de routine de la qualité de la digue (*figure 3*).

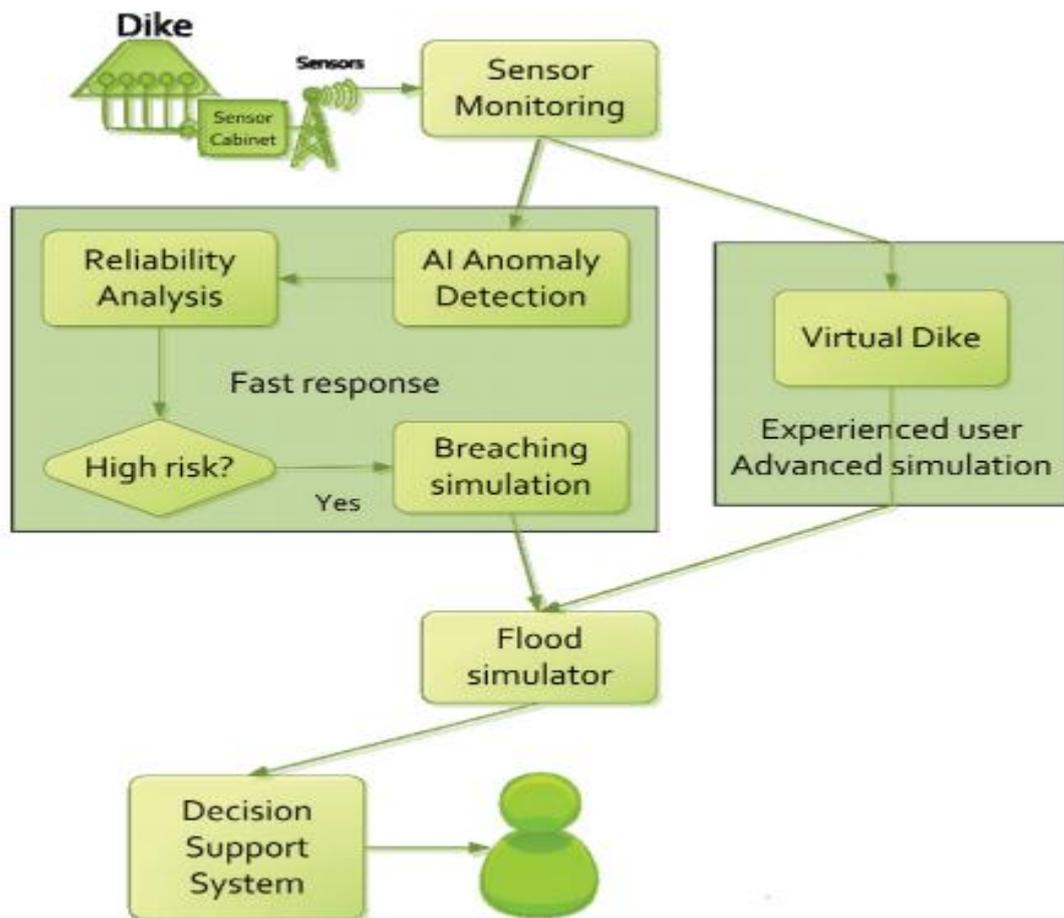


Figure III.3: Le système d'alerte précoce des inondations urbain

Le module de surveillance du capteur reçoit des flux de données provenant des capteurs installés dans la digue. Les données brutes du capteur est filtré par le détecteur d'anomalie AI qu'identifie les anomalies de comportement ou des dysfonctionnements de capteurs de digues. Le module d'analyse de fiabilité calcule la probabilité de défaillance en cas de niveaux d'eau anormalement élevés ou une tempête à venir et des précipitations extrêmes.

Si la probabilité de défaillance est élevée, alors la Brèche Simulator prédit la dynamique d'une rupture de digue possible, calcule l'évacuation de l'eau et estime la durée totale de l'inondation. Après cela, les simulateurs modélisent leur dynamique d'inondation.

Les Informations acquises de tous les modules sont introduit dans le système aide à la décision (DSS). Les modules de simulation et de visualisation de composants sont intégrés dans l'espace commun d'informations. Ils sont accessibles à partir de l'environnement graphique interactif de la table multitouche ou par une application basée sur le Web (*figure 4*).

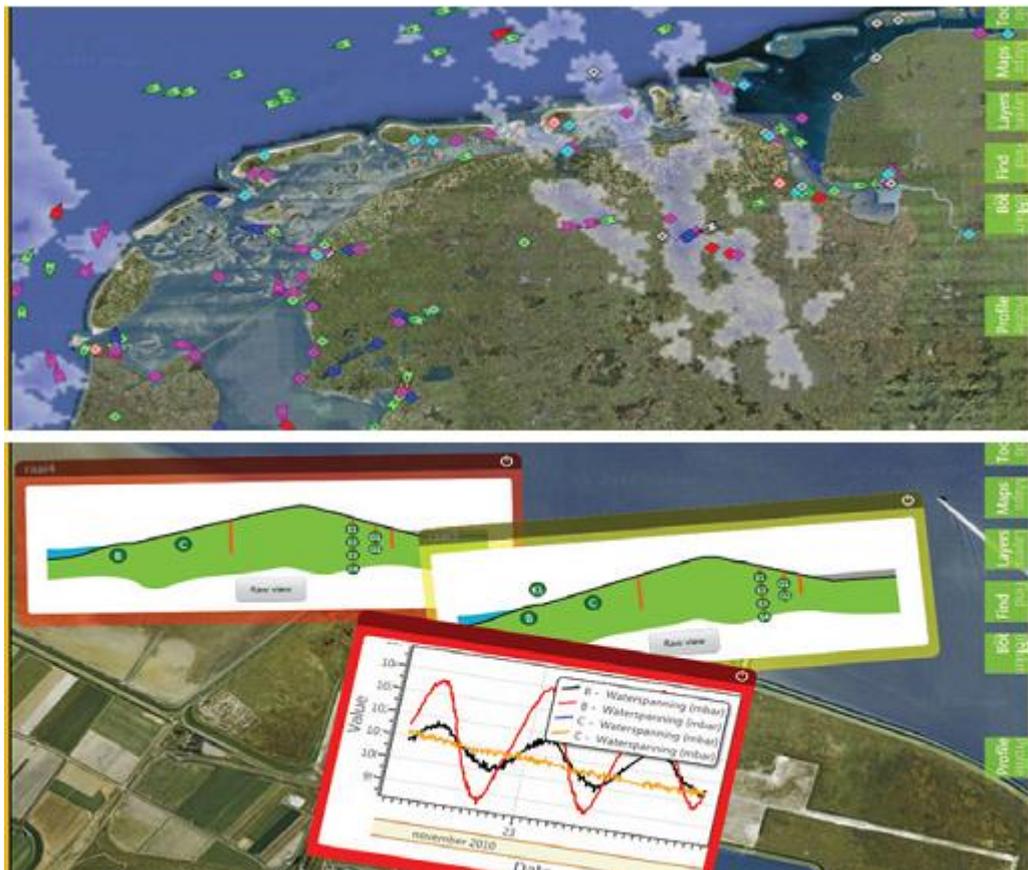
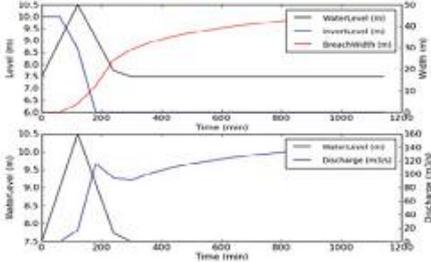
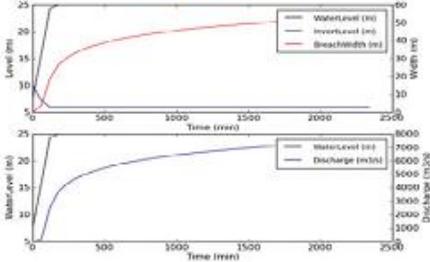


Fig III.4 : Les résultats du rendement du système de simulation d'inondation et la visualisation interactive

Malgré la complexité de l'architecture du système, les simulations sont calculées et visualisés dans un délai de moins d'une minute. Ceci permet au système d'être utilisé pour les tests interactifs des différents scénarios d'inondation. Tableau 1 illustre ces deux scénarios qui utilisaient les mêmes paramètres de simulation, mais l'hydrographe dans le deuxième scénario génère plus afflux d'eau que la première,

comme illustré au bas de la table. L'hydrogramme affecte la zone inondée et par conséquent la taille des données de sortie de simulation qui doit être transmis à chaque pas de temps. Le tableau montre que le temps pour chaque simulation est bien en dessous d'une minute et le temps entre les mises à jour est en quelques secondes, même pour les scénarios dans lesquels la demande de ressources de calcul est beaucoup plus élevée (*tableau 1*).

Table III. 1: La mesure du rendement de la simulation d'inondation interactive et sa visualisation pour les deux scénarios avec un hydrogramme différent

Simulated time (minutes from T0)	Scenario 1		Scenario 2	
	Update duration (seconds from previous time step)	Data Size (KB)	Update duration (seconds from previous time step)	Data Size (KB)
300	+4.78	18	+7.46	70
600	+1.70	47	+4.06	263
900	+1.35	53	+5.24	350
1200	+1.54	56	+5.66	381
1500	+1.31	63	+6.15	404
1800	+1.09	69	+6.22	427
2100	+1.63	77	+6.06	448
Total	13.40s	373 KB	40.85 s	2342 KB
<i>Flood image at time step 2100 min</i>				
<i>Hydrograph</i>				

III.4 L'organisation de secours et type de protection

III.4.1 Prise en compte du risque inondation dans l'aménagement

Le moyen le plus efficace ayant fait ses preuves dans plusieurs pays est l'instauration d'une loi réglementaire qui imposerait la prise en compte des risques dans les documents d'urbanisme. Ainsi, les plans locaux d'urbanisme (PLU) permettent de refuser ou d'accepter sous certaines conditions un permis de construire, notamment dans des zones inondables. Dans une même optique, l'Etat se doit de définir des zones d'interdiction et des zones de prescription, constructibles sous réserve. Il peut imposer d'agir sur l'existant pour réduire la vulnérabilité des biens. La loi réglemente l'installation d'ouvrages susceptibles de provoquer une gêne à l'écoulement des eaux en période d'inondation. L'objectif de cette approche est double :

- le contrôle du développement en zone inondable jusqu'au niveau de la crue de référence,
- la préservation des champs d'expansion des crues.

III.4.2 L'information préventive

Elle a pour but d'informer les populations sur les dangers auxquels elles sont exposées, ainsi que sur les mesures de prévention, de protection et de secours mises en œuvre (*figure 5*).

AVANT (Prévention)	
<ul style="list-style-type: none"> ▶ Prévoir un plan familial de mise en sûreté (radio, lampe torche, médicaments, eau potable, papiers personnels, médicaments urgents, couvertures, matériel de confinement, etc.). ▶ S'informer sur le risque d'inondation auprès des autorités locales. 	
PENDANT	
<ul style="list-style-type: none"> ▶ N'entreprendre une évacuation que si vous en recevez l'ordre des autorités ou si vous êtes forcés par la crue. ▶ Ne pas s'engager sur une route inondée (à pied ou en voiture). 	
	▶ Alerter la Protection Civile au 15 ou au 112 (portables)
	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Couper l'électricité ▶ Couper le gaz
	▶ Fermer et obturer les entrées possibles d'eau
	▶ Regagner les étages les plus hauts
	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Écouter la radio ▶ Suivre les consignes des autorités
	▶ Ne pas aller chercher les enfants à l'école
	▶ Ne pas encombrer les lignes téléphoniques

APRES	
<ul style="list-style-type: none"> ▶ Evaluer les dégâts et les points dangereux. ▶ Informer les autorités de tout danger observé. ▶ Ecouter la radio et suivre les consignes des autorités. ▶ Apporter une première aide aux personnes blessées et invalides. ▶ Se mettre à la disposition des secours. ▶ Dans la maison : <ul style="list-style-type: none"> ⇒ aérer ; ⇒ désinfecter à l'eau de javel ; ⇒ chauffer dès que possible ; ⇒ ne rétablir le courant électrique que si l'installation est sèche. 	
	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Garder sur soi ses papiers d'identité, de l'eau potable, des vivres, une radio, une lampe torche, des vêtements chauds et des médicaments, ... ▶ Rester calme et signaler sa présence à la vue des secours

Fig III.5 : Les consignes de sécurité en cas d'inondation

III.4.3 Le processus d'alerte

Le processus d'alerte généralement instauré par l'Etat et déclenché par les autorités locales se décompose en trois phases :

1. Emission d'un signal sonore spécifique diffusé par tous les moyens disponibles. Il est relayé par les dispositifs d'alarme et d'avertissement dont sont dotés les établissements recevant du public.
2. Diffusion de messages d'alerte contiennent des informations relatives à l'étendue du phénomène (tout ou partie du territoire national) et indiquent la conduite à tenir et peuvent être diffusés notamment par les radios, les télévisions.
3. Emission d'un signal sonore de fin d'alerte. Cette dernière peut être également annoncée sous la forme de messages diffusés par les services de radiodiffusion sonore et de télévision, dans les mêmes conditions que pour la diffusion des messages d'alerte.

III.4.4 L'organisation des secours

Les secours ont pour mission la protection des personnes menacées et des zones habitées ou aménagées. Il est donc nécessaire d'effectuer une intervention rapide et efficace :

- alerte et mobilisation des moyens (Plan d'Urgence),
- organisation de la chaîne des secours (de la détection à la médicalisation), etc.
- application des consignes de sécurité spécifiques au risque d'inondation.

En général, la seule solution pour les secours est d'évacuer les victimes, vers les hôpitaux des grandes villes. En effet, seule peut intervenir efficacement une organisation solide disposant de moyens de transport importants (camions, ambulances, hélicoptères), et d'un service médical avec des formations chirurgicales légères sous tente.

Chapitre IV :

Mise en Place d'un Système d'Alarme dans le Bassin de GUELMIM

IV-1 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

IV.1.1 Situation géographique du bassin de Guelmim

Le bassin hydraulique de Guelmim se situe au sud du Maroc, il couvre une superficie de près de 10240 km². Il est limité au Nord par le bassin hydraulique de Souss Massa, à l'Ouest par l'océan Atlantique sur une longueur d'environ 120 km de côtes. Au Sud et à l'Est, la limite est soulignée par le bassin hydraulique de Draâ.

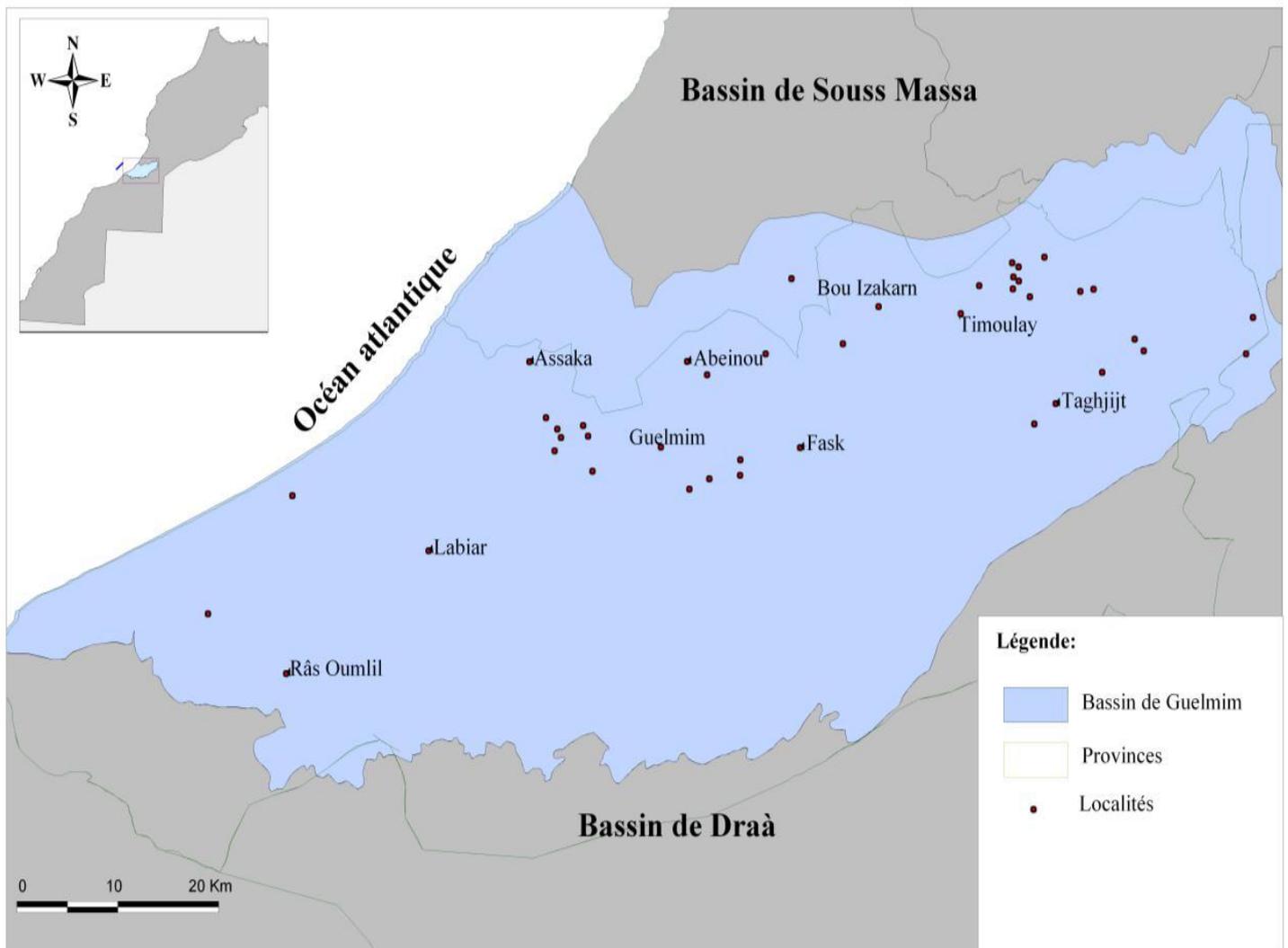


Figure VI.1 : Carte de situation géographique du bassin hydraulique de Guelmim

Découpage administratif :

Sur le plan administratif, le bassin de Guelmim s'étend en quatre provinces:

- Province de Guelmim
- Province de Tata
- Province de Tiznit
- Province d'Assa Zag

Le découpage administratif est détaillé au niveau du Tableau 1 et illustré au niveau de la Figure, ci-après (figure 2).

Tableau VI.1: Découpage administratif

Région	Provinces	Nombre de cles	Nombre de communes			Superficie
			Urbain	Rural	Total	
Guelmim-Es Smara	Guelmim	4	3	1	2	8650
	Tata	1		1	1	25
	Assa-Zag	1		1	1	3
Souss Massa	Tiznit	3		1	1	1300
Total		9	3	3	3	10240

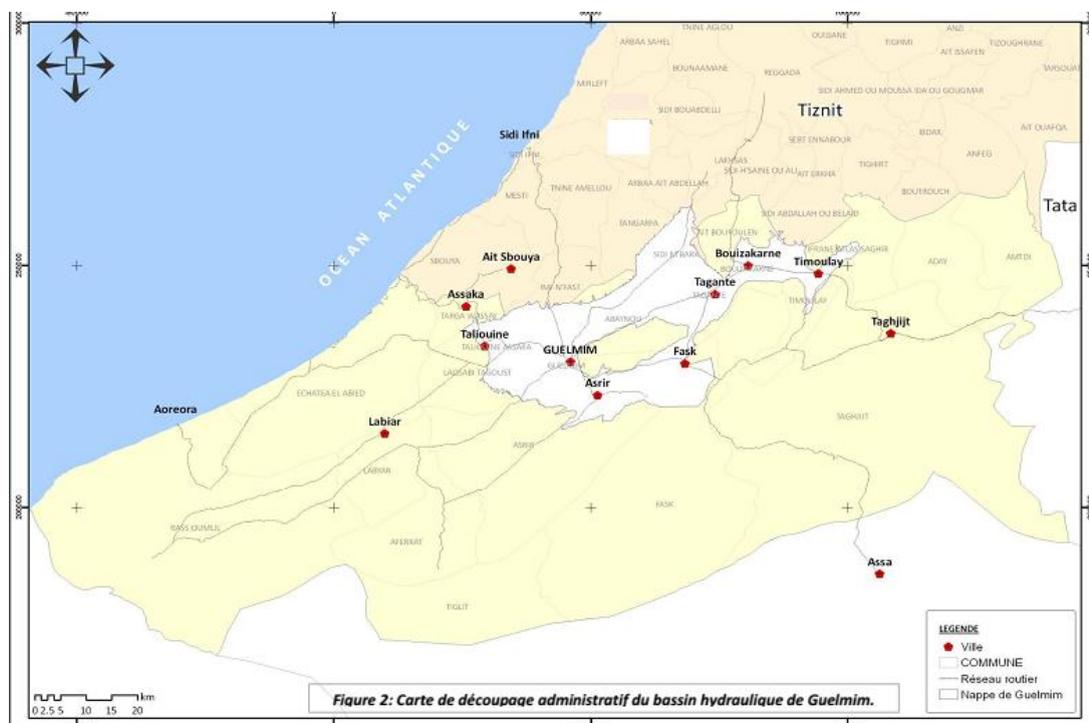


Figure VI.2 : Carte de découpage administratif du bassin hydraulique de Guelmim

IV.1.2 Contexte Géomorphologique

La plaine de Guelmim fait partie de l'Anti-Atlas occidental et précisément du grand bassin hydraulique du Bas Draâ. Elle se présente comme une cuvette limitée au nord-est par les plateaux d'Akhsass (Anti Atlas), au nord-ouest par les premières chaînes du môle d'Ifni, au sud par le Jbel Taïssa, se continuant vers l'ouest et le sud-ouest par les zones synclinales ouvertes vers TanTan et le Bani. L'ensemble s'étend sur une superficie d'environ 10240 Km²

La plaine de Guelmim est occupée au centre par le Jbel Tayert qui sépare les bassins de l'oued d'Oum El Achaàr au nord et celui des oueds Seyyad et Ouerguennoun au sud. Cette plaine comprend plusieurs dépressions

IV.1.3 Contexte géologique

Dans la zone d'étude, les formations lithologiques sont orientées suivant une direction NE-SW et présentent une structure synclinale dont le centre est constitué par le Jbel Tayert (Erreur ! Source du renvoi introuvable.). Les formations primaires les plus récentes datées de l'Acadien occupent le centre de la plaine (Jbel Tayert) et les plus anciennes d'âge Précambrien affleurent au niveau des bordures (boutonniers d'Ifni, Kerdous, Jbel Taïssa).

Le coeur du synclinal est représenté par les affleurements de l'Acadien supérieur formé généralement de schistes et dont la partie terminale est constituée de barres quartzitiques. Les schistes de l'Acadien supérieur surmontent les calcaires du Géorgien, qui reposent à leur tour sur les terrains anciens du Précambrien. Les schistes qui constituent ainsi, le substratum des dépôts plioquaternaires, affleurent au niveau des bordures de la plaine de Guelmim où apparaissent aussi les terrains les plus anciens (*figure 3 et 4*).

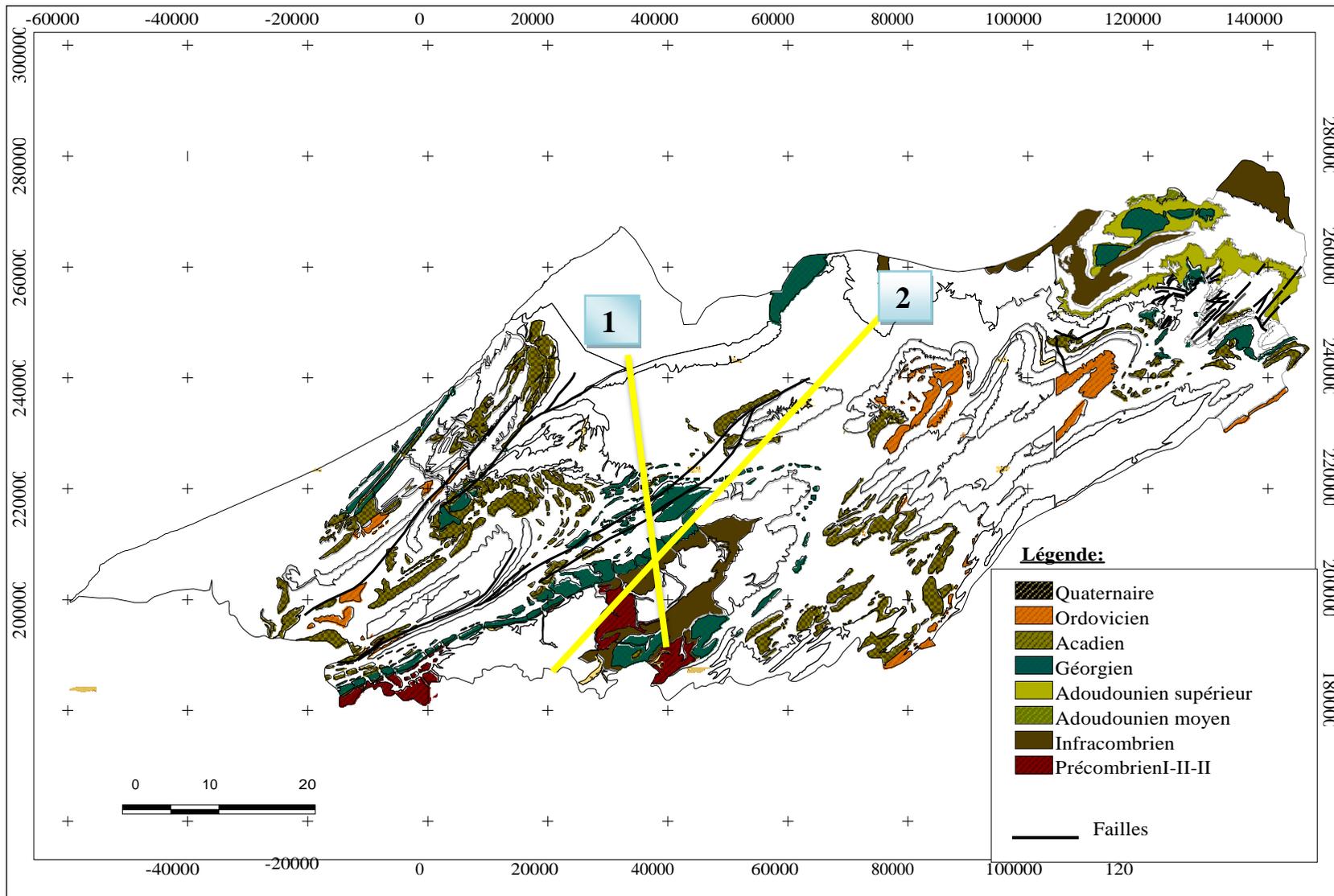


Figure VI. 3 : Carte géologique du bassin de Guelmim (Source : cartes géologiques de Foug El Hassane-Assa et Goulmine-Draà inférieur à 1/200 000, CHOUBERT et Al ; 1938 à 1952)

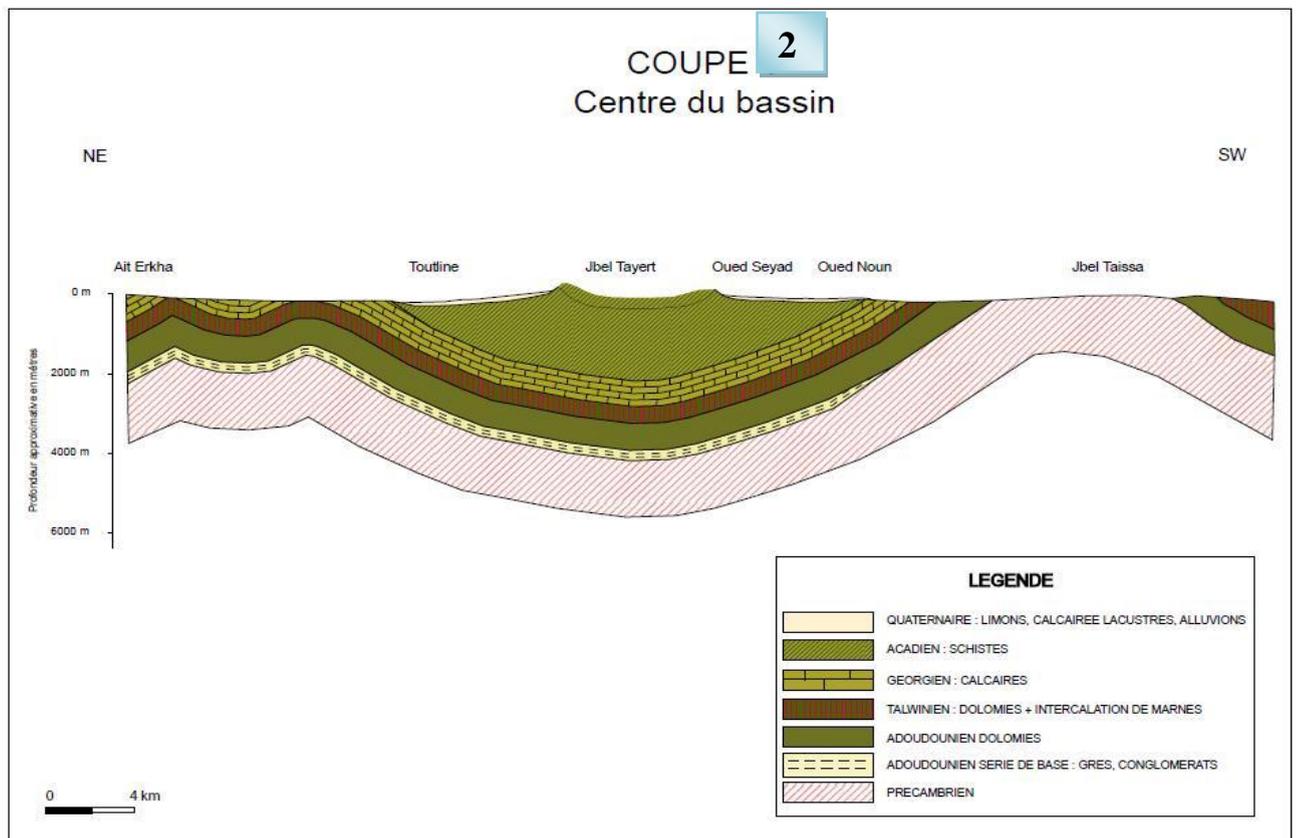
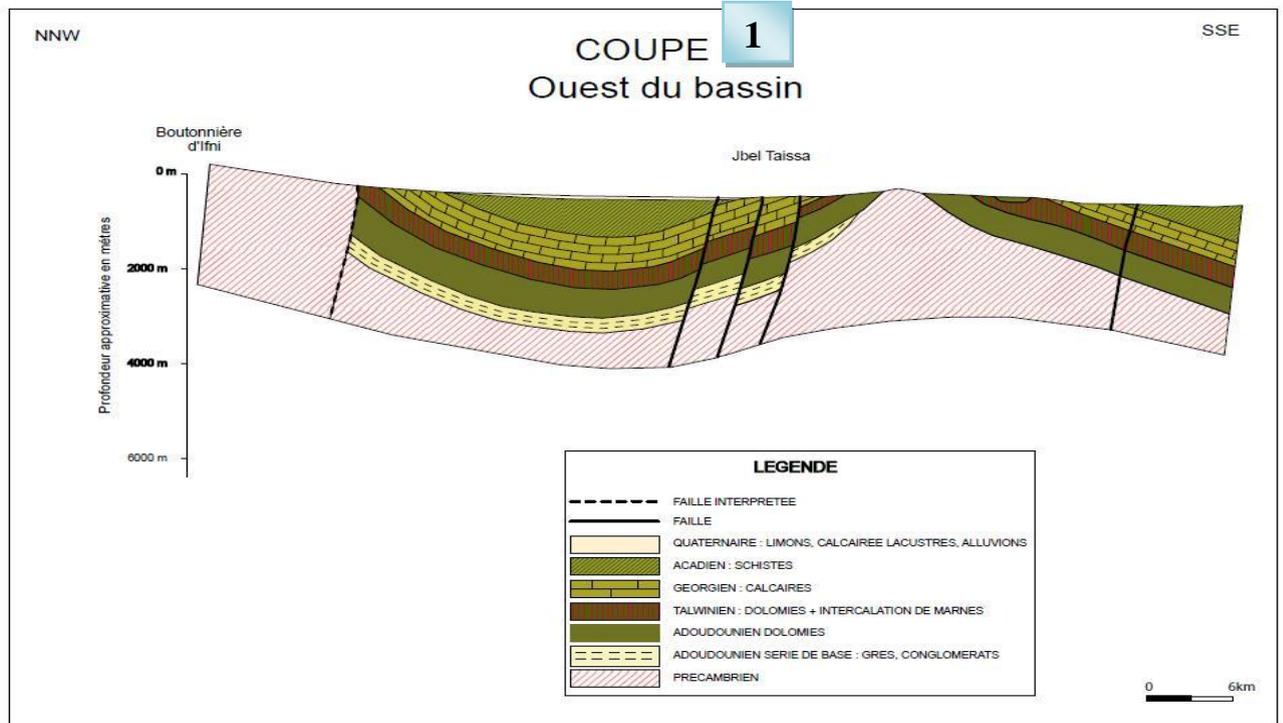
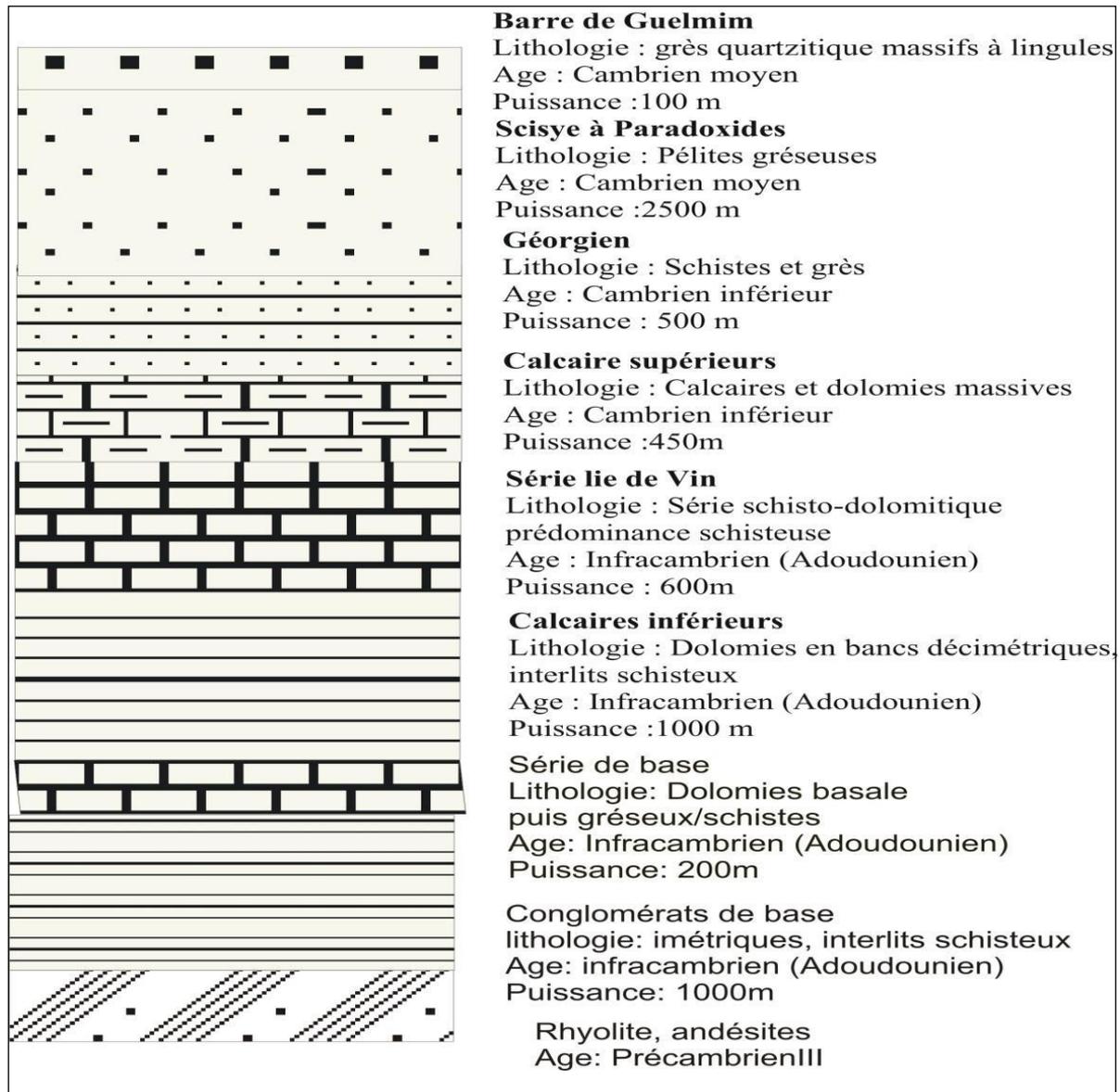


Figure VI. 4 : Coupes géologiques au centre du la zone d'étude (SRAT, 2006)

IV.1.4 Lithostragrapie régionale

Dans ce qui suit, sont décrites les différentes formations géologiques du bassin, d'après les études antérieures réalisées dans la région (Dijon et al; 1977 ; Aqel;

1997; Etude GéoAtlas; 1997...). Un log lithostratigraphique synthétique a été réalisé et montre les formations qui affleurent dans la zone de l'Anti-Atlas occidental. La succession des terrains de bas en haut est la suivante (figure 5):



Figure_VI.5 : Log lithostratigraphique synthétique de la plaine de Guelmim (B.Hassenforder ; 1987)

Chapitre V. HYDROLOGIQUE DU BASSIN GUELMIM

V.1 Climat :

La zone d'étude est caractérisée par une aridité sévère, en raison de la présence de la chaîne du Haut Atlas faisant obstacle aux perturbations pluvieuses en provenance du Nord. Malgré la latitude, la proximité de l'océan atlantique atténue l'effet de la continentalité saharienne pour la partie proche de l'océan. Les vents sont très fréquents provoquant des accumulations sableuses de différentes formes.

V.1.1 Précipitation :

La pluviométrie est très faible, étant donné la brièveté et l'irrégularité de la saison des pluies ; celle-ci va de la mi-octobre à fin février. Elle est caractérisée par une précipitation sous forme de fortes averses, concentrées durant quelques jours par mois, avec une moyenne interannuelle de 108 mm. La saison sèche comporte fréquemment une série de 4 à 5 mois consécutifs sans précipitations, parfois 6 mois, exceptionnellement 7 à 8 mois. La répartition spatiale des précipitations est marquée, par une diminution dans le sens Est -Ouest (Assaka : 124 mm, Guelmim : 108 mm, Taghijjt : 100 mm). Le graphique de la figure, ci-après, montre la variation saisonnière de la pluviométrie moyenne mensuelle au niveau de deux stations pluviométriques dans le bassin de Guelmim (*figure 1*).

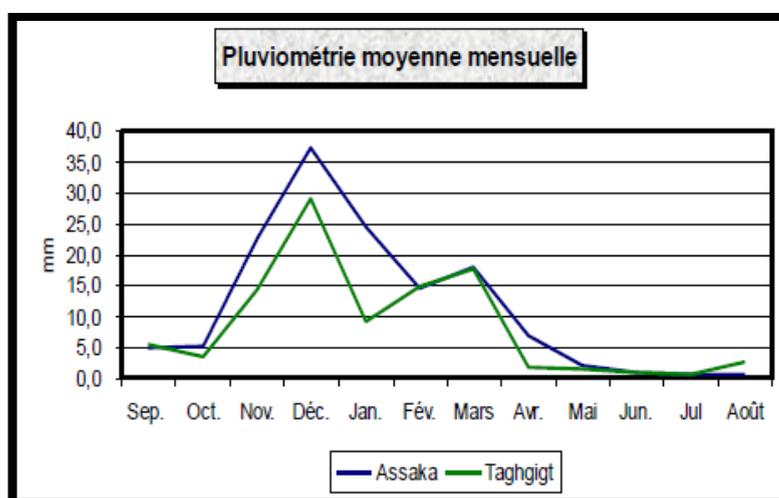


Fig V. 1: pluviométrie moyenne mensuelle au niveau de station d'Assaka et Taghijjt (Etude de PDAIRE de Guelmim, 2006)

Il découle de la figure ci-dessus que :

- Les précipitations connaissent une grande variabilité selon les saisons ;
- La période de pluie s'étend de novembre à mars. Durant cette période, les précipitations connaissent une répartition irrégulière avec prédominance du mois de décembre ;
- A partir du mois de mai, les pluies deviennent de plus en plus rares
- Durant les mois du juillet et août, les précipitations sont quasi inexistantes.

Par ailleurs, l'analyse de la série pluviométrique du bassin de Guelmim (Fig. ci-après), montre que le moyen inter - annuelle se situe autour de 108 mm. Celle-ci se caractérise par d'importants écarts inter - annuels, puisque les extrêmes maxima et minima enregistrés de 1937/1938 à 2004/2005, sont respectivement de 277 et 15 mm, soit un coefficient de variation d'environ 18. L'évaporation est très importante dans le bassin de Guelmim et est estimée à 3017 mm/an (figure 2).

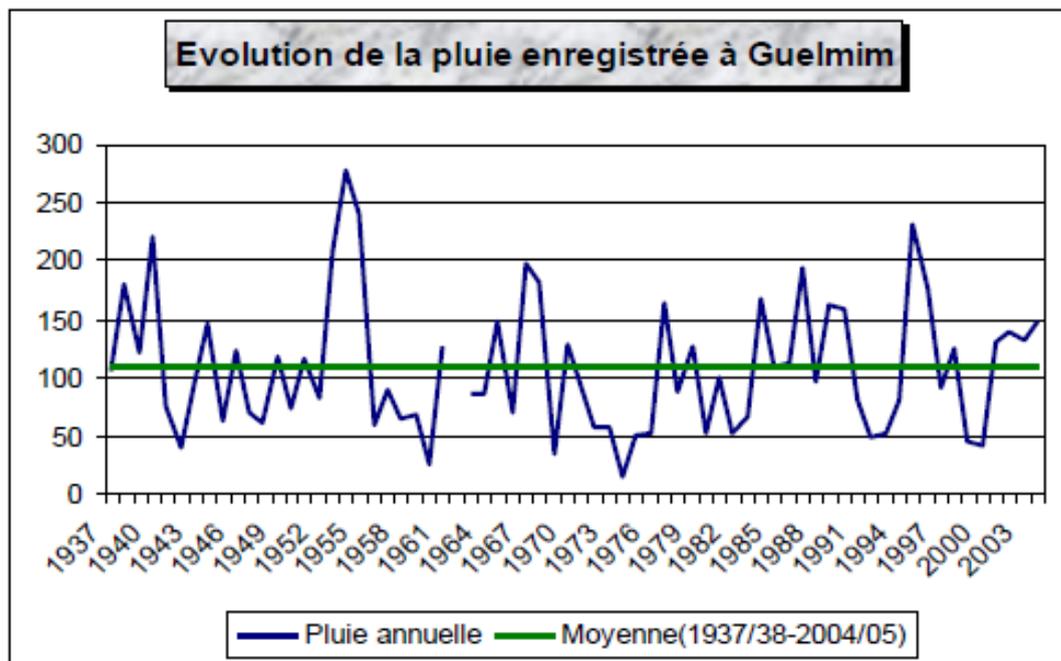


Fig V.2: Evolution de la pluie enregistrée au niveau de la station de Guelmim (Etude du PDAIRE de Guelmim, 2006)

V.1.2 Température :

La température moyenne et l'écart thermique augmentent notablement du Nord-Ouest vers le Sud-ouest, compte tenu de la diminution de l'influence océanique. La température moyenne annuelle est de l'ordre de 21°C à Guelmim. La moyenne mensuelle de maxima atteint 35 à 36°C en Juillet-Août, avec des pointes dépassant 38°C. Les minima descendent à 10° en Janvier-Février, parfois jusqu'à 7°C. La saison chaude pendant la quelle les maxima dépassent 28° dure cinq mois (Juin-Octobre).

L'amplitude thermique est en moyenne de 12°C. Sur les reliefs, les températures peuvent descendre en dessous de 0°C en hiver, et dépassent les 40°C en été. Les données des températures à Guelmim sont présentées dans le tableau suivant (tableau 1):

Tab V. 1: Pluviométrie moyenne annuelle (PDAIRE de Guelmim, 2006)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T° moy Max	21.3	22.3	25.4	26.6	28.1	30.2	25.0	36.3	32.1	32.0	28.0	22.8
T° moy Min	10.6	9.9	11.2	12.5	13.8	15.6	17.8	17.8	15.9	14.7	12.8	11.1
T° moy	16.0	16.1	18.3	19.5	21.0	22.9	26.4	27.0	24.0	23.3	20.4	17.0

V.1.3 Le vent :

Les vents dominants sont le **Gharbi** (NW/SE) et le **Chergui** (E/O). Les vitesses du vent et le taux d'humidité relative mesurés à la station de Tagant INRA/SM 1976/1986 varient respectivement entre 1,84 à 4,66 m/s et entre 69 à 76%. La région connaît régulièrement de violentes tempêtes de sable.

V.2 Les eaux de surface :

La région de Guelmim comprend trois sous bassins versant :

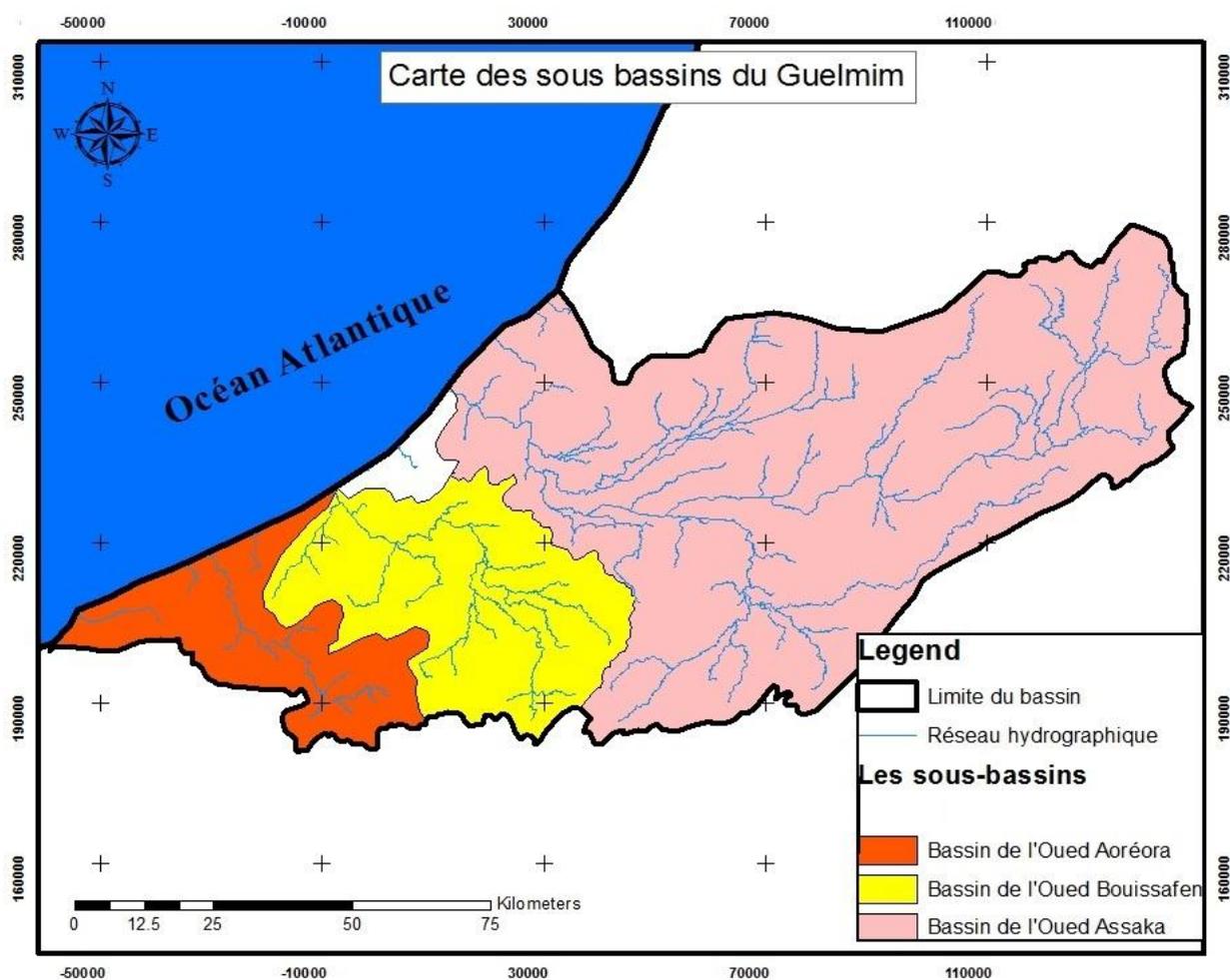


Fig V.3 : carte de sous bassin du Guelmim

Le bassin versant de l’oued Assaka qui s’étend sur une superficie totale de 6500 km², constitué par un réseau d’oueds le long desquels il ya plusieurs périmètres d’épandage des eaux de crue. Le réseau hydrographique est constitué des 5 principaux oueds (tableau 2).

L’oued Seyyad : il prend naissance à 1200 m d’altitude sur les versants de l’Anti-Atlas, il coule dans la direction Est-Ouest sur 152 km et reçoit de nombreux affluents, surtout de sa rive droite dont les plus importants sont : Kelmt, Tanzirt, Taouimarht, Ifrane, Ben Rhezrou et Oum El Achar.

L'oued Assaka : il franchit les reliefs côtiers par une gorge et rassemble les crues résiduelles de ce bassin complexe et d'un bassin complémentaire de 410 km² après leur épandage dans la plaine.

L'oued Oum El Achar : il prend naissance dans le massif des Akhsass, sa longueur est de 94 Km et la superficie de son bassin est de 560 km². Il draine le versant Sud du Massif des Akhsass. Ses principaux affluents sont situés en plaine.

L'oued Bouissafene : il mesure 82 km de long et son bassin versant totalise 1964 km². Ses affluents sont les oueds Tibharine et Ma'der Chhali. Les lits des cours d'eau sont peu marqués, ce qui favorise l'épandage naturel des crues.

L'oued Aouiroera : de 56 Km de longueur, draine le sous bassin occupant l'extrémité Nord Ouest de la zone d'étude et s'étalant sur une superficie de 1036 Km². Ses principaux affluents sont les oueds Boumalih Sehb Rouâja.

Tableau V.2 : Caractéristiques morphologiques des sous bassin hydrographiques

Nom du sous bassin	Oued	Superficie (km ²)	Périmètre (km)	Indice de Gravelius	Longueur équivalente	Largeur équivalente	Longueur cours d'eau
Taghjijt	Oued Seyyad	1400	223	2	98	25	174
Ifrane	Oued Seyyad	959	227	2	105	17	45
Bouizakarne	Oued bouizagane	201	68	1	27	12	21

Oum El Achàr	Oued Oum El Achàr	560	163	2	74	14	94
Assaka	Seyyad	3800	585	3	281	26	87
Aoureora	Oued Aoureora	1036	235	2	109	17	56
Bouissafene	Bouissafene	1964	268	2	119	29	82
cotier sud	-	116	72	2	33	6	-
cotier nord	-	205	109	2	51	7	-

V.3 Pluies et crues mesurées

Les pluies tombées au niveau du bassin de Guelmim et Bas Draa figurent sur le tableau suivant (tableau 3) :

Tab V.3 : Les pluies tombées au niveau du bassin de Guelmim et Bas Draa

Station Hydrologique	<i><u>Du 20/11/2014 au 25/11/2014 à 07 H00</u></i>	<i><u>Du 27/11/2014 au 01/12/2014 à 07H00</u></i>	Total
Guelmim	128.5 mm	90.5 mm	219 mm
Taghjijt sur Oued Sayad	118,5 mm	90,1 mm	208,6 mm
Assaka sur oued Assaka	129,6 mm	130,1 mm	259,7 mm
Foum Zguid sur oued Zguid	55 mm	25 mm	80 mm

Kasbat Zolit sur Oued Tata	146 mm	22 mm	168 mm
Tamanart sur Oued Tamanart	57,6 mm	21 mm	78,6 mm

Lors des précipitations du 28 au 30 Novembre des pluies torrentielles avec une intensité très élevée qui a dépassé 200 mm pendant 12 heures ont été enregistrées dans le plateau de lakhssas et la boutonnière de Sidi Ifni, ce qui a généré des crues exceptionnelles dans les cours d'eau notamment l'oued Oum laachar qui est alimenté par une dizaine de cours d'eau provenant de l'Anti atlas.

La crue de l'oued Oum laachar est estimée sans précédente (au moins dans les 40 années dernières).

Les débits maximums mesurés dans les stations hydrologiques (tableau 4) sont comme suit :

Tab V.4 : Les apports calculés au niveau de la station hydrologique d'Assaka, (l'exutoire du bassin) est de 200 Mm³

Cours d'eau	Niveau maximal atteint		
	Côte lue à l'échelle	Débit correspondant	Date
Oued Seyad à Taghijjt	680	480 m ³ /s	28/11/2014 à 18H30
Oued Assaka à Targawassay	940	974 m ³ /s	23/11/2014 à 20H00
Oued Tata au MU de Tata	710	795 m ³ /s	22/11/2014 à 07H00
Oued Foum Zguid au MU	600	290 m ³ /s	22/11/2014 à 00H00

Foum Zguid			
Oued Draa au pont Draa	Hors échelle (+90cm p. chaussé pont))	1400 m ³ /s	29/11/2014 à 11H00
Oued Benkhilil à Tantan	-	112m ³ /s	29/11/2014 à 07H15

V.4 dégâts enregistré

Pendant la période du 20 au 24 novembre on a enregistré des dégâts humains qui ont atteint 28 morts emportés par les crues des oueds Timsourt et Talmaadert affluents de l'oued Oum Laachar.

Lors des pluies du 28 novembre la crue d'Oum laachar a emporté le remblai d'accès du pont en cours de construction par l'ONDA sur la nouvelle route menant vers l'aéroport et a débordé de l'oued pour inonder la ville notamment le quartier Al qods Kasba, Touaghil et Nouder, ces trois dernier quartiers se situent dans des zones basses.



Photo 1: Remblai d'accès du pont en cours de construction par l'ONDA emporté par la crue

Ces crues de l'oued Oum laachar ont également débordé sur les deux ponts situés dans le périmètre urbain de la ville de Guelmim sur la RN12 reliant Guelmim à Sidi Ifni et sur la RN1 menant vers Tantan et les provinces du Sud. Ces deux routes ont été coupées durant toute la période de ces pluies à savoir le 21/11, 22/11, le 28, le 29 et le 30 novembre.



photo 2: Débordement de la crue sur le Pont sur la N1 Vers Tantan



photo 3: hauteur d'eau dans l'oued Oum laachar



photo 4: Débordement de la crue sur le Pont sur la N12 Vers Sidi Ifni

Des dégâts matériels ont été enregistrés à savoir :

- Des coupures des réseaux d'eau, d'électricité et de télécommunication ce dernier a été coupé durant 2 jours.
- Des maisons envahies par les eaux de crues
- Des maisons tombées en ruine soit complètement ou partiellement ;
- Des sapements au niveau des chaussées...

L'absence d'un réseau d'évacuation des eaux pluviales de la ville a aggravé la situation.



photo 5: Destruction du Pont sur la NI Vers Tantan



photo 6: Centre de la Ville de Guelmim inondé



photo 7: Destruction de la voirie dans les quartiers en points bas de la ville



photo 8 : Destruction d'un tronçon du mur de soutènement sur la rive gauche



photo 9: Destruction de ponts et d'ouvrage d'art sur différents axes routiers

Chapitre VI- Désignation matériel et Choix d'emplacement :

VI.1 Installation des Géocapteurs

Pour mieux suivre les crues dans le bassin de Guelmim, on fait appel à des réseaux de capteurs pour être alertées de la montée des eaux.

VI.1.1 Le capteur Radar OTT_RLS :

Le capteur OTT RLS utilise la technologie des impulsions radar pour mesurer sans contact le niveau d'eau. Sans aménagements onéreux, il est placé directement au-dessus de la surface d'eau à mesurer. Sa faible consommation de courant et les interfaces normalisées le rendent particulièrement flexible. Grâce à sa large plage de mesure s'étendant jusqu'à 35 m, il mesure en toute fiabilité même à une certaine distance (figure 1).



Fig VI.1 : le capteur Radar OTT_RLS

Et Selon les critères suivants, on sélectionne le lieu de montage approprié :

- ✓ comme lieux de montage, on choisira par exemple de ponts, passerelles ou constructions auxiliaires se trouvant directement au-dessus de la section du cours d'eau faisant l'objet de la mesure.

- ✓ La distance minimale entre le bord inférieur du capteur et la surface de l'eau doit être de 0.8 m.
- ✓ Choisir un point de fixation suffisamment haut de façon à ce qu'une mesure soit également possible en cas de crue.
- ✓ La position du point de fixation doit être stable. Eviter les vibrations et les mouvements du point fixation. Les ponts peuvent bouger de plusieurs centimètres en raison des changements de charge et des variations de température. Si le pont dispose de piles, le capteur peut être par exemple fixé avec une entretoise, à la pile de pont dont la position est stable.
- ✓ La surface de l'eau doit être la plus plane dans la zone du lobe de détection du capteur : éviter les endroits avec turbulences, les endroits avec formation de mousse, les zones exposées au ressac et les sections de cours d'eau qui en raison d'obstacles ou de piles de pont entraînent des modifications du niveau de l'eau. Le résultat de la mesure n'est pas exploitable en présence de glace ou de neige à la surface de l'eau.
- ✓ Choisir le lieu d'installation de manière à ce qu'il ne soit pas au sec en cas d'eaux basses.
- ✓ Les sites avec de très rapides changements du niveau d'eau ne sont pas appropriés. OTT RLS calcule la moyenne du résultat de la mesure sur une durée de mesure d'environ 20 secondes.
- ✓ Il ne doit y avoir absolument aucun obstacle dans la zone du lobe du capteur (figure 2,3 et 4).

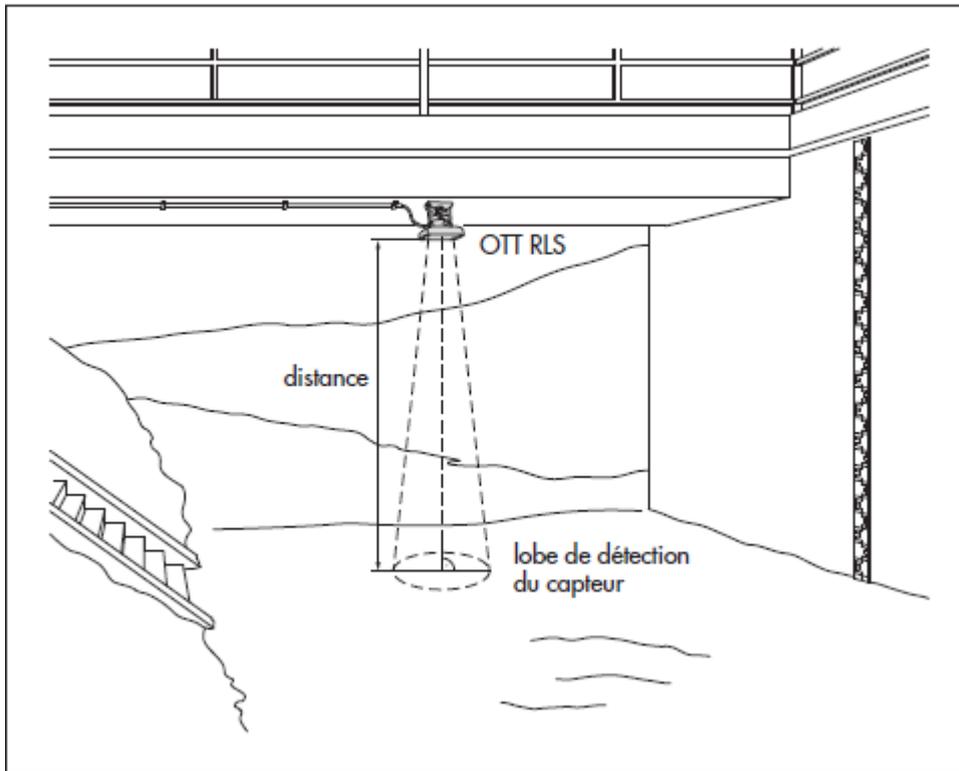


Fig VI.2 : Exemple d'application 1 : Montage d'OTT RLS sur un pont.

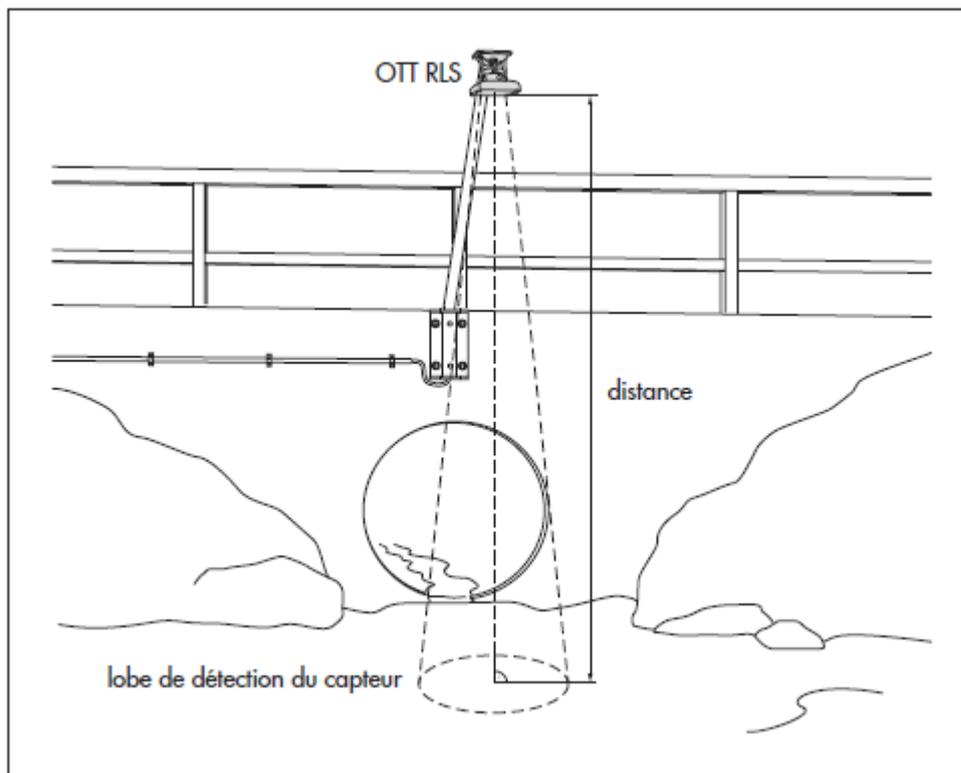


Fig VI.3 : Exemple d'application 2 : Montage d'OTT RLS sur une construction auxiliaire (un entier métallique avec plaque de montage).



Fig VI.4: Montage d'OTT RLS sur une construction auxiliaire et sur un pont

OTT RLS est par conséquent parfait pour :

- ✓ Les eaux présentant un taux important de matières en suspension et de sédiments ; et c'est le cas des cours d'eaux du bassin de Guelmim.
- ✓ Les eaux présentant une végétation importante
- ✓ Les stations de mesure isolées, fonctionnant de manière autonome
- ✓ Les régions menacées de crues (en complément des capteurs déjà en place).

VI.1.2 Le Radar RQ-24

Le Radar RQ-24 permet une mesure en continu de la vitesse d'écoulement et du niveau avec un calcul automatique du débit sur les écoulements à surface libre.

Il basée sur les techniques Radar Doppler de surface et temps de vol, la qualité des mesures du RQ-24 et sa flexibilité de déploiement en font un instrument unique dans son secteur (figure 5).



Fig VI.5 : Le Radar RQ-24

VII. 1-2-1 Modes d'opération

a- Mesure de vitesse d'écoulement

La mesure de la vitesse d'écoulement est basée sur la dérive Doppler. La sonde calcule le débit local en comparant une fréquence émise avec une fréquence réfléchiée par la surface de l'eau en mouvement.

b- Mesure de niveau d'eau

Le niveau actuel de l'eau est obtenu par le temps de vol d'impulsions Radar émises à une longueur d'onde spécifique dans la plage basse de la micro seconde perpendiculairement à la surface de l'eau. Le retard entre émission et réception est proportionnel à la distance parcourue.

VI. 1-2-2 Calcul du débit :

La sonde calcule le débit Q . Sur la base de l'équation de continuité, le débit est calculé en multipliant l'aire A de la section transversale mouillée au travers de laquelle circule l'eau, à un niveau donné h , par la vitesse moyenne V_m .

$$Q = V_m \times A(h)$$

Q = débit en m³/s

V_m = vitesse moyenne en m/s

A(h) = aire de la section en m²

Or :

$$V_m = V_l \times k$$

V_m = vitesse moyenne en m/s

V_l = vitesse locale en surface en m/s

k = coefficient sans unité

Et **Le coefficient k** est déterminé par modélisation ou expérimentalement et extensivement par jaugeages à différents régimes hydrauliques. Il est ensuite mémorisé dans la sonde Radar pour entrer dans le calcul du débit **Q** en litres/s ou m³/s (figure 6).

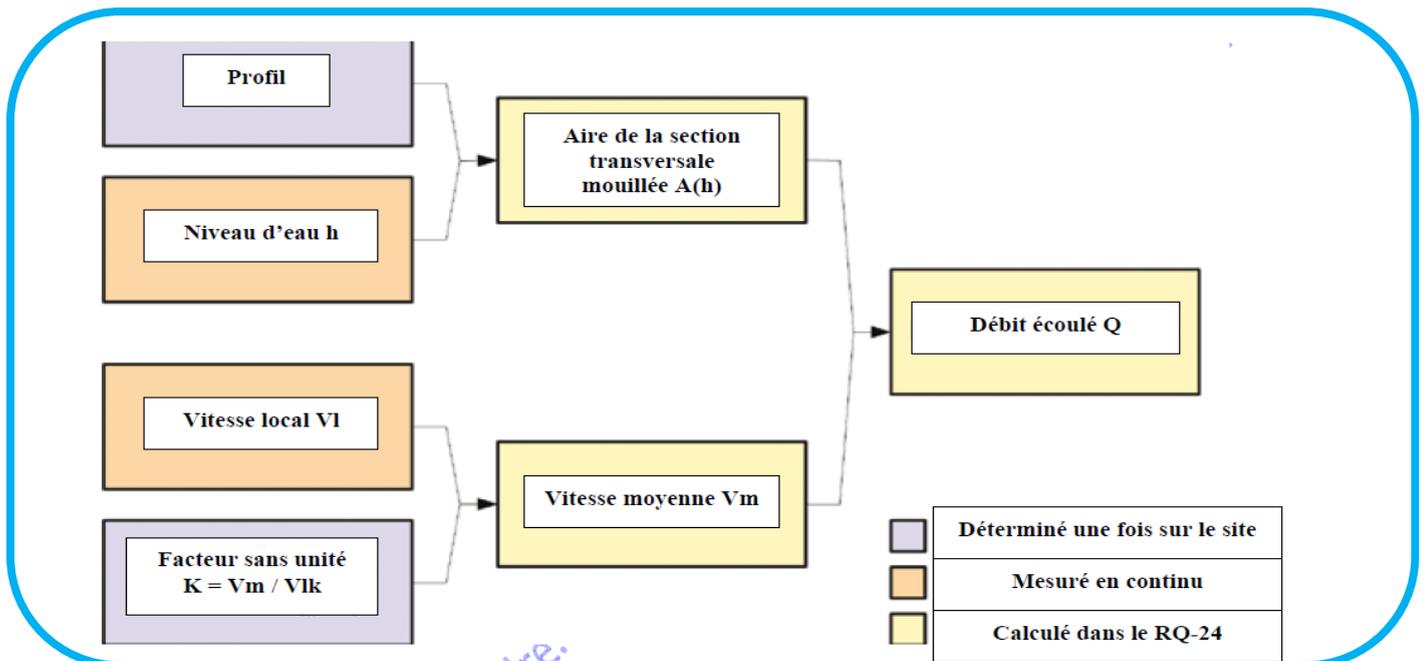


Fig VI.6 : schéma montre le méthode de calcul le débit d'une rivière

La tolérance de mesure du RQ-24 est 3-5% maximum, sa précision de mesure est aussi bonne ou meilleure que d'autres techniques mais avec les avantages suivants :

❖ *Sans contact = sécurité = entretien réduit*

Les mesures des capteurs sont sans contact, l'équipement ne court pas de risque de dommages par le charriage de pierres et rochers ou le transport d'arbres par la rivière. Ceci ajoute un avantage d'entretien très réduit sur le site et une protection contre les mises hors service en temps de crue.

❖ *Reconnaissance immédiate des changements dans le lit*

Les lits changent de forme fréquemment durant les crues. Quand la mesure est pratiquée par le Radar RQ-24, un changement de lit peut être déduit avec le changement dans la loi de corrélation liant le niveau et la vitesse d'écoulement. Une mesure manuelle ponctuelle peut être pratiquée pour identifier ce changement puis le calcul de débit est reprogrammé en conséquence. Ceci signifie que la mesure manuelle n'est requise que dans le cas d'un véritable changement du lit, la qualité globale des mesures s'en trouve considérablement augmentée.

❖ *Des mesures précises même en temps de crue*

Nous savons que Les mesures ponctuelles en temps de crue sont impossibles aux niveaux exceptionnels des crues. Aussi les systèmes se basent sur une extrapolation de la courbe de tarage pour les zones des très hautes aux extrêmement hautes eaux.

Contrairement au le **RQ-24** : il exécute ses mesures à tous les niveaux et toutes vitesses d'écoulement, parce que la section baignée du lit ne doit être déterminée qu'une fois.



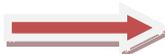
Fig VII.7 : la période des crues

❖ Economie d'énergie – alimentation solaire

L'optimisation d'énergie signifie que le RQ-24 peut être installé même sur les sites où aucune arrivée secteur n'est disponible. Le RQ-24 peut opérer avec une source solaire. Un coûteux passage de câble entre le **RQ-24** et la centrale d'acquisition (par exemple dans une station de jaugeage par niveau) peut être évité grâce à une liaison radio, simple, économique et fiable.

VI.2 Choix d'emplacement :

Le choix d'emplacement d'un système d'alarme est très important pour la prédétection des crues. Ainsi que d'après les résultats obtenus concernant les pluies tombées et les débits enregistré au niveau du bassin de Guelmim et Bas Draa, on note qu'il ya des zones avec des débits énormes. Les cours d'eau suivantes présentent les débits enregistrés :

➤ Oued Draa à pont draa		1400 m³/s
➤ Oued Assaka à Targawassay		974 m³/s
➤ Oued Tata		795 m³/s
➤ Oued Seyyad		480 m³/s

Donc il faut bien équiper ces zones vulnérables par des systèmes d'alarme pour la prévision des crues du bassin versant de Guelmim. La carte ci-dessous présente le Réseau hydrographique et les sous bassins hydrologiques, ainsi l'emplacement des **Géocapteurs** dessinés à la détection de la hauteur des cours d'eau (figure 9):

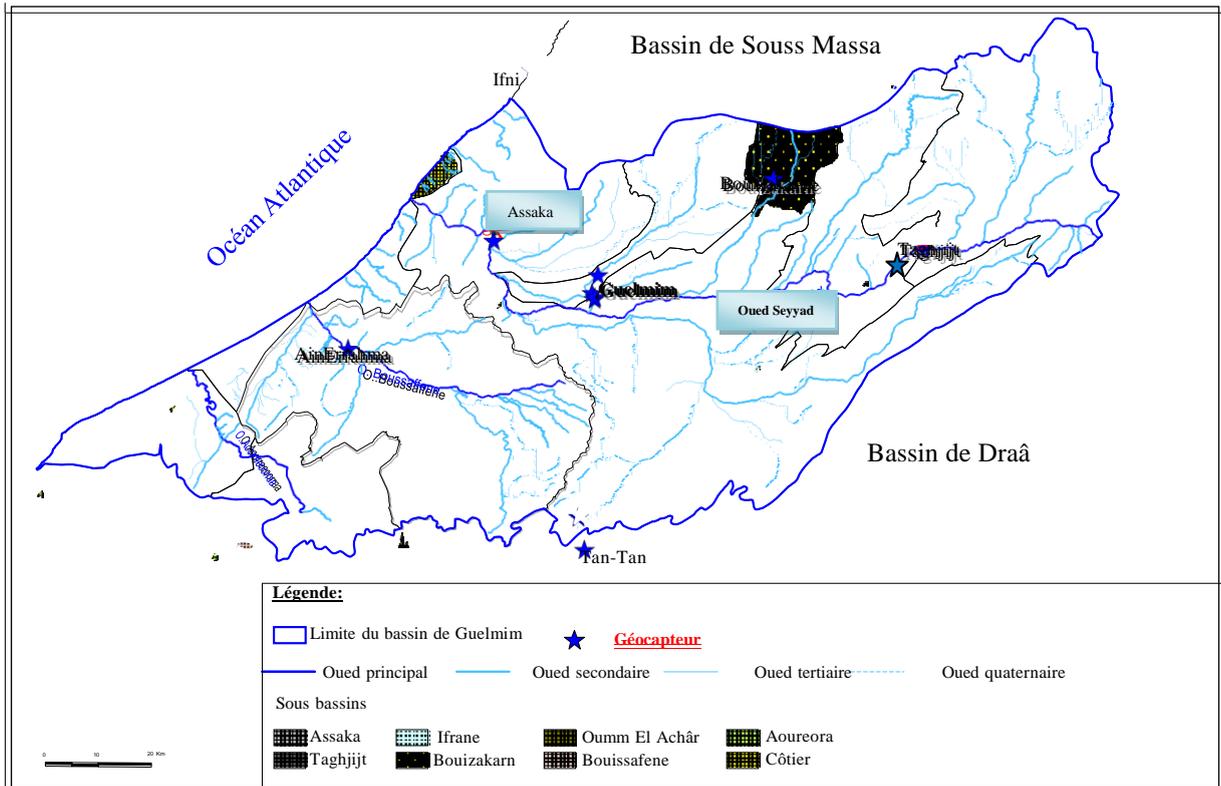
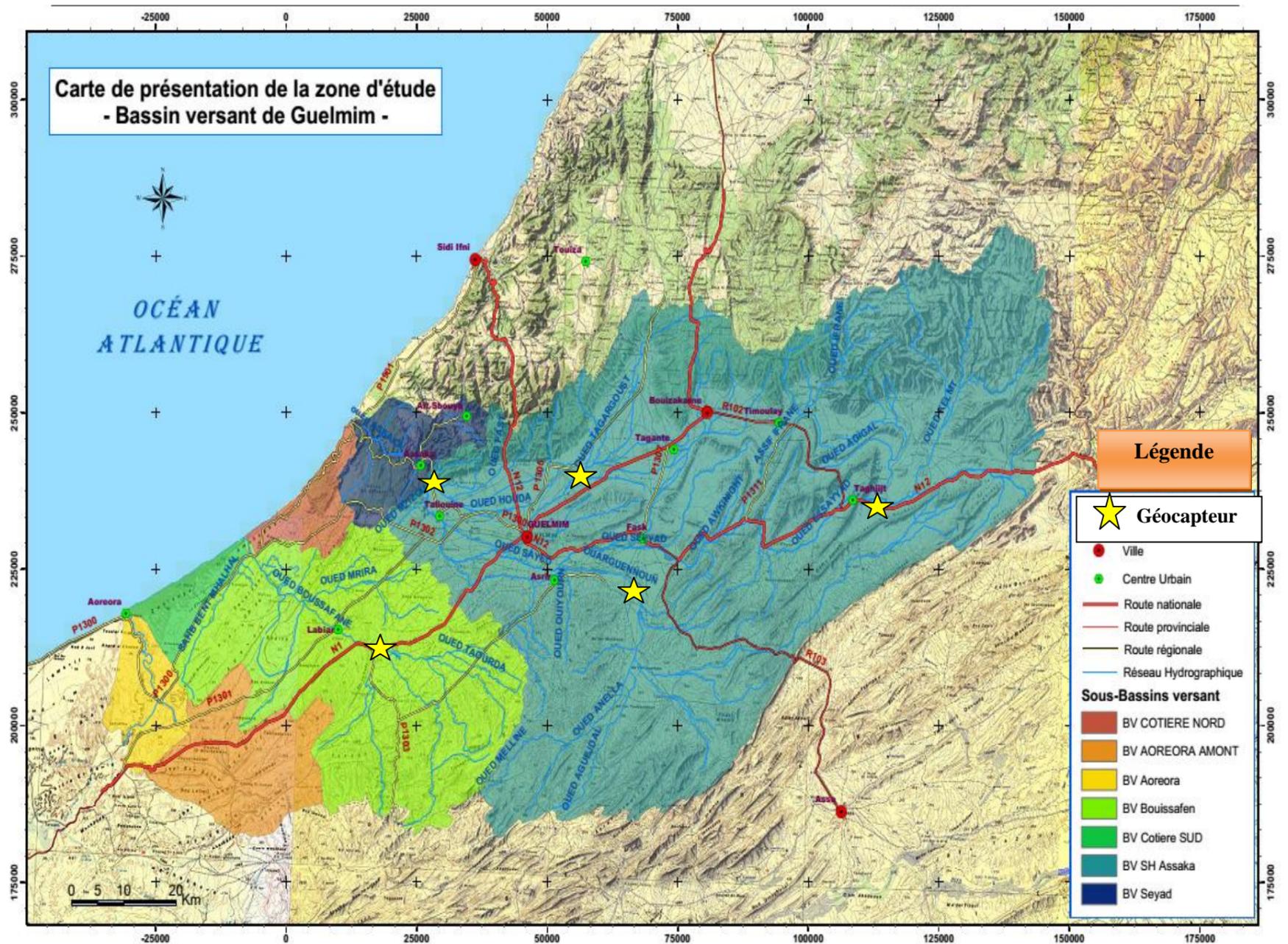


Figure VI.8: Réseau hydrographique, sous bassins hydrologiques

Fig VI.9 : Schéma d'emplacement des Géocapteurs



VI.3 Coût Estimatif du projet

Pour le cout estimatif de notre projet, il faut tenir en compte le nombre des Géocapteurs, la plate forme de control et de surveillance et leur équipement, en outre le réseau d’alerte et d’alarme et Installation et mise en place du système d’alerte (tableau 1).

Tab VI.1 : Montre le cout estimatif du projet

Désignation	Quantité	Prix unitaire	Prix total
Géocapteur y compris tout accessoires	04	70 000,00	280 000,00
Plate forme de control et de surveillance	01	2 000 000,00	2 000 000,00
Equipement de la plate forme	01	200 000,00	200 000,00
Réseau d’alerte et d’alarme	01	200 000,00	200 000,00
Installation et mise en place du système d’alerte	01	1 000 000,00	1 000 000,00
		Total HT	3 680 000,00
		TVA 20%	736 000,00
		Total TTC	4 416 000,00

VII.4 Perspectives

Il est à signaler que les ouvrages réalisés par le ministère chargé de l'eau pour la protection de la ville ont joué leur rôle d'une manière très satisfaisante.

En effet, l'ancienne digue avec le mur réalisé récemment par la municipalité sur la rive gauche de l'oued Oum laachar ont contribué à la protection des quartiers longeant l'oued en amont du pont Sidi Ifni.

Les canaux de déviation des eaux provenant des ravins du Jbel Tayert, le seuil réalisé sur l'oued Amanouchen et le canal de déviation des eaux de ce dernier vers oued Oum laachar ont assuré la protection des quartiers Est de la ville.

A noter également que des travaux de construction d'un mur en maçonnerie sur 4.5 km à la rive droite et une digue de 1.5 km à la rive gauche de l'oued om laachar seront réalisés incessamment. L'entreprise chargée des travaux est déjà installée et les travaux sont lancés.

Ces actions permettront d'assurer partiellement, la protection de la ville ; Toutefois les deux ponts situés sur la RN1 et la RN12 représentent des points noirs. En effet, du fait qu'ils sont sous dimensionnés, gênent l'écoulement, et engendrent par conséquent des débordements de l'oued sur les quartiers avoisinants tels que quartier Errahma. De plus, une protection indirecte en amont du bassin à travers la construction des petits barrages et des seuils s'avère incontournable.

A cet effet et pour remédier cette situation et faire face aux inondations futures et réduire les dégâts qui en résultent il est primordial d'entreprendre les actions suivantes :

- ❖ Continuer et accélérer les travaux de protection de la ville de Guelmim par le prolongement des digues et murs sur les deux rives selon les résultats de l'étude réalisées en 2010 par l'ABHSMD.
- ❖ Accélérer la réalisation des barrages suivants :
 - Timsourt,
 - Sidi Daoud
 - Tissiliouine ;
 - Bouska ;
 - Tlat N'Tramt.

Ces sites de barrages se situent sur les affluents de l'oued Oum laachar, l'oued principal menaçant la ville.

- ❖ Accélérer la réalisation des seuils préconisés par l'étude de recharge artificielle de la nappe de Guelmim. Ces seuils conçus pour favoriser la recharge de la nappe peuvent contribuer à la protection de la ville de Guelmim
- ❖ Rectifier et redimensionner le pont sur la route de l'aéroport
- ❖ Reconstruire les deux ponts (sur RN12 et RN1) ;
- ❖ Etablir un schéma directeur de protection de la province de Guelmim contre les inondations.
- ❖ Réaliser le réseau de collecte des eaux pluviales. (étude faite par l'ONEE)
- ❖ Entretien des ouvrages d'épandage des eaux de crue

- ❖ Renforcer la mise en œuvre des dispositifs de la loi sur l'eau concernant l'empiètement sur le domaine public hydraulique.

CONCLUSION GENERALE

C'est vraiment que les inondations représentent aujourd'hui un danger pour les biens et les personnes dans la plupart des régions du globe. C'est pourquoi il faut faire une prévision pour ces inondations par l'installation des Géocapteurs.

Par ailleurs, la commune de Guelmim présente un témoignage d'inondation. Guelmim après le passage des crues des Oueds: des ponts endommagés, des maisons effondrées et des rues couvertes de boue. Sinistrée, dévastée. La mise en place des systèmes d'alarme est une étape importante, tel que le capteur Radar **OTT RLS** et le capteur **RQ 24** pour la prédétection de ces crues.

Un suivi doit être appliqué pour qui ont intéressé à ce sujet, c'est de construire les barrages suivants :

- **Timsourt ;**
- **Sidi Daoud ;**
- **Tissiliouine ;**
- **Bouska ;**
- **Tlat N'Tramt.**

Ces barrages ont un rôle très important dans la diminution de vitesse des cours d'eau. Par addition, ils vont jouer aussi les rôles des réservoirs pour les zones

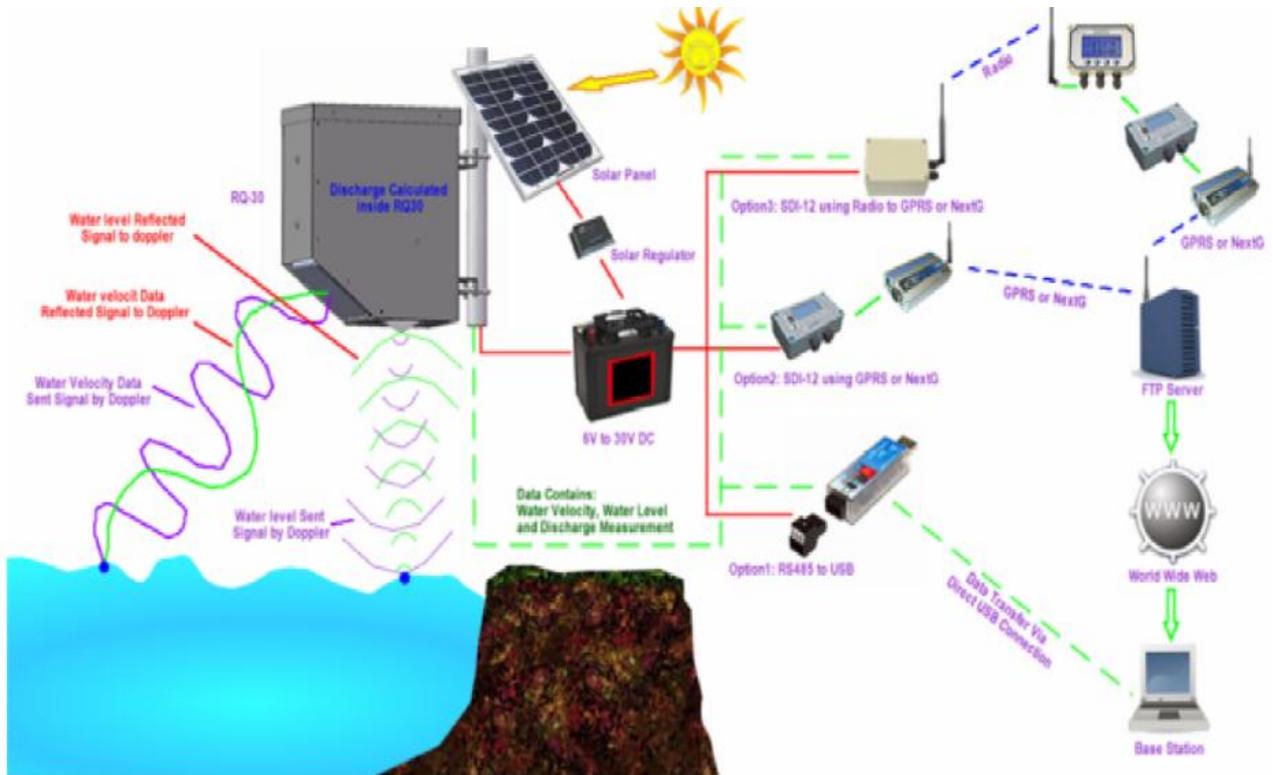
qui ont un déficit en eau, c'est le cas de la commune de Guelmim, qui a un manque des précipitations et à la pression exercée sur la nappe phréatique pour des besoins d'eau potable ou agricoles.

Référence:

- AGOUMI A., DEBBAGH A., (2006) -Ressources en eau et bassins versants du Maroc : 50 ans de développement (1955-2005), 50p
- B. Bakkar. (2008). étude pour la réalisation d'une cartographie et d'un système d'information géographique sur les risques majeurs au Maroc. 56p
- B.Hassenforder. (1987). Log lithostratigraphique synthétique de la plaine de Guelmim.
- Julien Le Tellier. (January 1, 2010). En ligne www.mysciencework.com.
- Manuel d'utilisation Capteur radar OTT RLS. (2009). En ligne <http://refmar.shom.fr>
- Ohnny Douvine, Daniel Delahaye (le 24 juillet 2009). "Caractéristiques des « crues rapides » du nord de la France (Bassin parisien) et risques associés". En ligne <http://geomorphologie.revues.org>
- PDAIRE. (2006). Evolution de la pluie enregistrée au niveau de la station de Guelmim
- PDAIRE. (2006). Pluviométrie moyenne annuelle : PDAIRE de Guelmim.
- Sophie Guilbaud. (2014). " Préviation Quantitative des Précipitations Journalières par une méthode Statistico-Dynamique de Recherche d'Analogues - Application à des Bassins du Pourtour Méditerranéen ". Thèse de doctorat, l'institut national polytechnique de Grenoble. 388p

Les Annexes

Annexe 1 : le fonctionnement de système d'alarme



Annexe 2 : les Bassins versant avec les zones inondables.

Bassin versant	Oueds et zones inondables
Oum Er Rbia	<ul style="list-style-type: none"> - Oued Sabek qui inonde le Douar M'Ghila (Est de Béni-Mellal), - Oued Handak qui inonde les quartiers Sud et Sud-Ouest de Beni Mellal,

	- Oued Dal au Nord de la ville de Beni Mellal
Bou Regreg - Chaouia	- Oued Bouskoura à l'Est de Casablanca, - Oueds N'Fifikh et Mellah à Mohamédia et Ben Yakhlef, - Oueds Jen Ja à Had El Swalem (Sahel)
Côtiers Atlantiques Nord	- Oued Martil à Tétouan (quartier coelma), - Oued Laou, - Chabaâts Boujerrah El Oulia et Boujerrah Essoufla, - Oued Moughougha à l'amont de la zone industrielle de Tanger, - Zone franche à coté de l'aéroport de Tanger, - Oueds Atil ex-Khendak El Assa à Ksar El Kébir.
Moulouya	- Oueds Sidi Yahya et Sidi Maafa à Oujda, - Oued Sefrou centre de Béni Drar, - Oueds El Manzel et Ben Yakhlef à Berkane
Sebou	- Oueds Lahdar, Larbaa et Haddar à Taza,
Souss – Massa	- Oued Takad dans la région de Chtouka et Sid Baha, - Oueds Assersif au centre d'Aourir, - Oued Ifni à l'amont de Sidi Ifni, - Oued Oum Laechar à Guelmim.
Tensift	- Oued Issyl à Marrakech (M'Hamid Tassouhant, Douar G'noun, zone aéroportuaire)
Ziz – Rhéris – Guir	- Oued Lahmar à Er Rachidia



Université Sidi Mohammed Ben Abdellah

Faculté des sciences et techniques

www.fst-usmba.ac.ma



Année Universitaire : 2014-2015



Mémoire de fin d'études Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques.

Nom et prénom : OUJBBOUR Brahim

Année universitaire : 2014/2015

Titre : Annonce de crue et mise en place d'un système d'alarme dans le Bassin de Guelmim.

Résumé

Dans ce stage on s'intéresse à l'annonce de crues et la mise en place d'un système d'alarme dans le bassin de Guelmim. Il s'agit de présenter les préventions des risques et la protection des populations contre les inondations.

Au Maroc, en guise d'exemple, nous avons travaillé sur le bassin versant de Guelmim qui a subi dernièrement des inondations néfastes et c'est le secteur le plus touché au sud du Maroc.

Le but de cette étude est de proposer des solutions concernant l'installation des Géocapteurs tels que le capteur radar OTT RLS et le RQ 24, pour la prédétection des crues dans le bassin versant du Guelmim en se basant sur les débits mesurés dans les cours d'eau.

Mots clés : Maroc, Annonce de crue, prévision de crue, système d'alarme, Géocapteur, Guelmim.