



**HAL**  
open science

# Modélisation hydraulique et vulnérabilité territoriale aux inondations en milieu montagneux semi-aride : cas des bassins versants de l'Ourika et la Rheraya (Maroc)

Oumaima Bennani

► **To cite this version:**

Oumaima Bennani. Modélisation hydraulique et vulnérabilité territoriale aux inondations en milieu montagneux semi-aride : cas des bassins versants de l'Ourika et la Rheraya (Maroc). Géographie. Université Paul Valéry - Montpellier III; Université Cadi Ayyad (Marrakech, Maroc). Faculté des sciences Semlalia, 2020. Français. NNT : 2020MON30017 . tel-03145923

**HAL Id: tel-03145923**

**<https://theses.hal.science/tel-03145923>**

Submitted on 18 Feb 2021

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

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

# THÈSE

Pour obtenir le grade de  
Docteur

Délivré par  
**Université Paul Valéry – Montpellier 3**

Préparée au sein de l'école doctorale **Territoires,  
Temps, Sociétés et Développement - ED60**  
Et de l'unité de recherche **Gouvernance, Risque,  
Environnement, Développement – UMR GRED**

Spécialité : **Géographie et Aménagement de  
l'Espace.**

Thèse soumise pour l'obtention du grade de docteur de  
l'Université Paul Valéry – Montpellier 3 et de l'université Cadi  
Ayyad Marrakech.

Présentée par **BENNANI Oumaima**

**Modélisation hydraulique et vulnérabilité  
territoriale aux inondations en milieu montagneux  
semi-aride. Cas des bassins versants de l'Ourika  
et la Rheraya (Maroc)**

Soutenue le 11 septembre 2020 devant le jury composé de

**Pr. Aicha Ben MOHAMMADI**, HDR, Université Ibn Prédidente  
Tofail, Kenitra.

**Pr. Tony REY**, HDR, Université Paul Valéry – Montpellier Rapporteur  
3.

**Pr. Khalid MEHDI**, HDR, Université Chouaïb Doukkali, El Rapporteur  
Jadida.

**Pr. Lahcen BENAABIDATE**, HDR, Université Sidi Rapporteur  
Mohamed Ben Abdellah, Fès.

**Pr. Frédéric LEONE**, HDR, Université Paul Valéry – Co-Directeur  
Montpellier 3

**Pr. Mohamed El Mehdi SAIDI**, HDR, Université Cadi Co-Directeur  
Ayyad Marrakech

**Mr. Yves TRAMBLAY**, HDR, Hydrosciences Montpellier. Co-Encadrant

# THÈSE

Pour obtenir le grade de  
Docteur

Délivré par  
**Université Paul Valéry – Montpellier 3**

Préparée au sein de l'école doctorale **Territoires,  
Temps, Sociétés et Développement - ED60**  
Et de l'unité de recherche **Gouvernance, Risque,  
Environnement, Développement – UMR GRED**

Spécialité : **Géographie et Aménagement de  
l'Espace.**

Thèse soumise pour l'obtention du grade de docteur de  
l'Université Paul Valéry – Montpellier 3 et de l'université Cadi  
Ayyad Marrakech.

Présentée par **BENNANI Oumaima**

**Modélisation hydraulique et vulnérabilité  
territoriale aux inondations en milieu montagneux  
semi-aride. Cas des bassins versants de l'Ourika  
et la Rheraya (Maroc)**

Soutenue le 11 septembre 2020 devant le jury composé de

**Pr. Aicha Ben MOHAMMADI**, HDR, Université Ibn Tofail, Kenitra. Présidente

**Pr. Tony REY**, HDR, Université Paul Valéry – Montpellier 3. Rapporteur

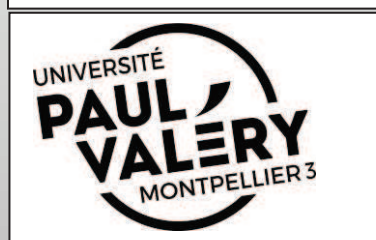
**Pr. Khalid MEHDI**, HDR, Université Chouaïb Doukkali, El Jadida. Rapporteur

**Pr. Lahcen BENAABIDATE**, HDR, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès. Rapporteur

**Pr. Frédéric LEONE**, HDR, Université Paul Valéry – Montpellier 3. Co-Directeur

**Pr. Mohamed El Mehdi SAIDI**, HDR, Université Cadi Ayyad Marrakech. Co-Directeur

**Mr. Yves TRAMBLAY**, HDR, Hydrosciences Montpellier. Co-Encadrant



# THÈSE

Présentée à la Faculté pour obtenir le grade  
de :

Docteur

UFR/CED : Sciences, Techniques et  
Ingénierie.

Spécialité : Hydrologie

**Modélisation hydraulique et vulnérabilité territoriale aux  
inondations en milieu montagneux semi-aride.  
Cas des bassins versants de l'Ourika et la Rheraya (Maroc)**

Par

***Oumaima BENNANI***

(DERNIER DIPLOME : Master. SPECIALITE : Hydrologie de surface et  
qualité des eaux)

***Soutenue le 11 Septembre 2020 devant la commission d'examen :***

|              |                                   |   |
|--------------|-----------------------------------|---|
| Président    | <b>Pr. Aicha Ben MOHAMMADI</b>    | HDR à Université Ibn Tofail, Kenitra                |
| Rapporteur   | <b>Pr. Tony REY</b>               | HDR à Université Paul Valéry –<br>Montpellier 3     |
| Rapporteur   | <b>Pr. Khalid MEHDI</b>           | HDR à Université Chouaïb Doukkali, El<br>Jadida     |
| Rapporteur   | <b>Pr. Lahcen BENAABIDATE</b>     | HDR à Université Sidi Mohamed Ben<br>Abdellah, Fès. |
| Co-Directeur | <b>Pr. Mohamed El Mehdi SAIDI</b> | HDR à Université Cadi Ayyad Marrakech               |
| Co-Directeur | <b>Pr. Frédéric LEONE</b>         | HDR à Université Paul Valéry –<br>Montpellier 3     |
| Co-Encadrant | <b>Mr. Yves TRAMBLAY</b>          | HDR, Hydrosociences Montpellier.                    |

# Fiche présentative de la thèse

|  |
|--|
| <b>Nom et Prénom de l'auteur</b>   |
| BENNANI Oumaima  |
| <b>Intitulé du travail</b>   |
| Modélisation hydraulique et vulnérabilité territoriale aux inondations en milieu montagneux semi-aride. Cas des bassins versants de l'Ourika et la Rheraya (Maroc)   |
| <b>Encadrants</b>  |
| <ul style="list-style-type: none"><li>➤ Pr. SAIDI Mohamed El Mehdi : Professeur d'enseignement supérieur. Laboratoire Géosciences et Environnement, Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech, Maroc.</li><li>➤ Pr. LEONE Frédéric : Professeur d'enseignement supérieur. UMR-Gouvernance, Risque, Environnement, Développement, Université Paul Valéry, Montpellier, France.</li></ul>  |
| <b>Co-encadrant :</b>  |
| Dr. TRAMBLAY Yves : Chargé de Recherches à l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement), Laboratoire HydroSciences, Montpellier, France.  |
| <b>Lieux de réalisation des travaux :</b>  |
| <ul style="list-style-type: none"><li>➤ Laboratoire de Géosciences et Environnement, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cadi Ayyad, Marrakech.</li><li>➤ Laboratoire Mixte International « Télédétection et Ressources en Eau en Milieux semi Arides » (LMI-TREMA). Coopération entre l'Université Cadi Ayyad et l'Institut de Recherche pour le Développement IRD.</li><li>➤ UMR-GRED : Laboratoire de Gouvernance, Risque, Environnement, Développement, Université Paul Valéry, Montpellier. France.</li><li>➤ HydroSciences Montpellier (HSM-Montpellier), France.</li></ul>   |
| <b>Stages de recherche scientifique réalisée dans le cadre de cette thèse :</b>  |
| <ul style="list-style-type: none"><li>➤ <b>2 Octobre – 29 Décembre 2017</b> : Stage de recherche scientifique au laboratoire de l'UMR GRED, Montpellier, France.</li><li>➤ <b>10 Janvier – 14 avril 2017</b> : Stage de recherche scientifique au laboratoire d'Hydrogéologie - Université Aristotle, Thessaloniki, Grèce. Programme Erasmus.</li><li>➤ <b>29 Octobre – 29 novembre 2016</b> : Stage de recherche scientifique au laboratoire HydroSciences, Montpellier, France.</li><li>➤ <b>2 Novembre – 10 Décembre 2015</b> : Stage de recherche scientifique au laboratoire de l'UMR GRED, Montpellier, France.</li></ul>  |
| <b>Articles publiés dans des revues internationales indexées et à comité de lecture :</b>  |
| <ul style="list-style-type: none"><li>➤ <b>O. Bennani</b>, E. Druon, F. Leone, Y. Trambly, M. E. Saidi, (2019) A spatial and integrated flood risk diagnosis: Relevance for disaster prevention at Ourika valley (High Atlas-Morocco), <i>Disaster Prevention and Management: An International Journal</i>, Vol. 28 No. 5, pp. 548-564. <a href="https://doi.org/10.1108/DPM-12-2018-0379">https://doi.org/10.1108/DPM-12-2018-0379</a>.</li><li>➤ <b>O. Bennani</b>, Y. Trambly, M. E. Saidi, S. Gascoin and F. Leone (2019) Flood Hazard Mapping Using Two Digital Elevation Models: Application in a Semi-Arid Environment of Morocco. <i>European Scientific Journal</i> 15(33):338-359. DOI: 10.19044/esj.2019.v15n33p338</li></ul> |

- **O. Bennani**, Y. Ait Brahim, M. E. Saidi, F. Fniguire. (2016) Variability of surface water resources and extreme flows under climate change conditions in arid and Mediterranean area: case of Tensift watershed, Morocco. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*. Vol. 9, No. 4, p. 165-174.

#### Communications présentées dans des congrès nationaux et internationaux :

- **O. BENNANI**, M.E. SAIDI, Y. TRAMBLAY, F. LEONE, E. DRUON, (2019). Diagnostic territorial et intégré du risque inondation. Étude de cas sur la vallée de l'Ourika (Maroc). Journée de sensibilisation et d'étude sur les risques d'inondation. 23 avril 2019 à l'Université Cadi Ayyad de Marrakech.
- **O. BENNANI**, Y. TRAMBLAY, M.E. SAIDI, S. GASCOIN, F. LEONE. Flood hazard mapping using highresolution Pleiades digital elevation model in the Ourika catchment (Morocco). 16th Plinius Conference on Mediterranean Risks. Montpellier, France, 9–12 October 2018.
- **O. BENNANI**, M.E. SAIDI, Y. TRAMBLAY, F. LEONE, « l'inondabilité en milieu rural. Cas de la vallée de RHERAYA (Haut Atlas, Maroc) ». Séminaire international « Ressources en eau, sociétés et territoires méditerranéens. L'interdisciplinarité pour répondre aux défis du changement climatique ». Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech, 25-26 octobre 2016.
- **O. BENNANI**, M.E. SAIDI, Y. TRAMBLAY, F. LEONE, « Apport de modélisation hydraulique à la des zones inondables. Cas du bassin versant de la RHERAYA (HAUT ATLAS, MAROC) ». 5ème Colloque international du réseau "Eaux & Climats " – Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, FST, Fès, Maroc, 12-13 octobre 2016.
- **O. BENNANI**, M.E. SAIDI, Y. TRAMBLAY, F. LEONE, « Water potential and its associated problems in a semi-arid mountain environment; case of watershed in high atlas (Morocco) ». iCAGE 2016: International Conference on Applied Geology & Environment. May 19-21, 2016 ; Mahdia-TUNISIA.
- **O. BENNANI**, M. E. SAIDI, « Typologie des crues et vulnérabilité territoriale aux inondations en milieu semi-aride. Cas du bassin de l'Ourika ». 1er édition de la Journée Scientifique des Doctorants de la FST. Marrakech, 22 avril 2016.
- **O. BENNANI**, M. E. SAIDI, « Ressources en eau et comportements hydrologiques en milieu montagnard semi-aride. Cas de deux bassins versants du Haut Atlas de Marrakech (Maroc) ». IIème Colloque de l'Association Francophone de Géographie Physique. Dynamique hydrologique et géomorphologique des cours d'eau. 11 au 13 juin 2015 Aix-En-Provence (France).
- M. E. SAIDI, **O. BENNANI**, A. KHAFALOU, F. FNIGUIRE, A. HIQUI, Z. BELKHARCHACH, « Les événements hydrologiques exceptionnels de novembre 2014 au Maroc. L'exemple des crues du bassin versant de Tensift ». Colloque national sur les « Crues, gestion durable des terres et aménagement du territoire. Les leçons des catastrophes de l'automne 2014 dans le centre et le sud marocains. », Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Rabat, 29 et 30 mai 2015.

*Mère Thérèse* avait dit « la vie est un défi à relever, un bonheur à mériter, une aventure à tenter ». C'est dans cette optique que j'ai entamé mon doctorat, une aventure qui m'a appris bien des choses...

# Remerciements

En premier lieu, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements à mes directeurs de thèse en cotutelle : Pr Mohamed El Mehdi Saidi, Professeur à l'Université Cadi Ayad et Pr. Frédéric Leone, Professeur à l'Université Paul Valéry- Montpellier III. J'aimerais leur témoigner ma reconnaissance pour m'avoir proposé ce sujet de thèse et m'avoir encadrée tout au long de ces années. Je les remercie pour leurs précieux conseils et pour les efforts qu'ils ont déployés afin de me garantir des conditions favorables pour mener à bien ce travail, ainsi que pour le temps qu'ils m'ont consacré malgré leurs engagements.

Je les remercie aussi pour m'avoir accueillie au laboratoire de Géosciences et Environnement de l'Université Cadi Ayyad et à l'UMR GRED de l'Université Paul Valéry, et d'avoir mis à ma disposition ce dont j'ai besoin pour avancer dans ma recherche dans un cadre de travail confortable.

Je tiens aussi à exprimer à mon co-directeur de thèse, Mr. Yves Trambly, chargé de recherches à l'IRD, mes profonds remerciements pour avoir accepté de diriger ma présente recherche en m'apportant son expertise avec la plus grande disponibilité pendant toute la durée de cette thèse. Je le remercie également pour son accueil au sein du laboratoire HydroSciences de Montpellier où une grande partie du travail a été effectuée.

Je remercie également M. Simon Gascoin du laboratoire CESBIO de Toulouse, pour nous avoir procuré des données utilisées dans l'élaboration de ce travail.

Mes remerciements vont également vers toutes les personnes qui m'ont accueillie, soutenue et aidée lors de mes séjours en France, notamment Mme M. Gherardi, Mr. F. Vinet et Mr. T. Rey. Je n'oublierai pas non plus Ernest Druon, ex-étudiant à l'Université Paul Valéry ainsi que les étudiants du master GCRN de cette université.

Je suis aussi infiniment reconnaissante envers les rapporteurs de ma thèse ainsi qu'aux examinateurs, pour avoir accepté de juger ce travail et faire partie du jury de thèse. Je les remercie pour le temps qu'ils ont consacré à la relecture et à l'évaluation.

Par ailleurs, cette thèse de doctorat n'aurait pas été bien accomplie sans le soutien financier de plusieurs organismes. À cet égard, je tiens à exprimer mes remerciements les plus sincères à l'Institut de Recherche pour le Développement, à travers HydroSciences Montpellier, et au Laboratoire Mixte International LMI TRÉMA.

Finalement mes remerciements seraient incomplets si je ne faisais pas part de ma profonde reconnaissance à ma mère Badiia, à ma sœur Ghita et à mes frères Othmane et Ismaïl qui m'ont soutenue, encouragée tout au long de cette aventure surtout lors des moments difficiles.

Un grand merci à tous les autres membres de ma famille tantes, oncles, cousins et cousines qui ont cru en moi.



À ma deuxième famille, la FST-Marrakech aussi bien le corps professoral qu'administratif, merci de m'avoir permis de m'épanouir, de me développer et d'acquérir non seulement le savoir, mais aussi le savoir être.

Je n'omettrai pas aussi de remercier mes amis qui ont toujours été présents chaque fois que j'ai eu besoin d'eux surtout dans les moments de doute.

Je suis consciente du rôle que bon nombre de personnes ont joué dans l'accomplissement de ce travail de thèse. Merci à tous et pour tout.

# SOMMAIRE

|  |           |
|--|-----------|
| <b>FICHE PRESENTATIVE DE LA THESE.....</b>   | <b>3</b>  |
| <b>REMERCIEMENTS.....</b>  | <b>6</b>  |
| <b>SOMMAIRE .....</b>  | <b>8</b>  |
| <b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>  | <b>12</b> |
| <b>LISTE DES FIGURES : .....</b>   | <b>14</b> |
| <b>ACRONYMES : .....</b>   | <b>18</b> |
| <b>RESUME : .....</b>  | <b>19</b> |
| <b>ABSTRACT :.....</b>   | <b>20</b> |
| <b>ملخص.....</b>   | <b>21</b> |
| <b>INTRODUCTION GENERALE : .....</b>   | <b>22</b> |
| <b>CHAPITRE I : CARACTERISTIQUES PHYSIO-GEOGRAPHIQUES ET<br/>GEOLOGIQUES DES BASSINS VERSANTS.....</b> | <b>28</b> |
| I.    SITUATION GEOGRAPHIQUE DE L' AIRE D' ETUDE ET DELIMITATION DES BASSINS<br>VERSANTS .....         | 28        |
| II.   CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT DE L'OURIKA.....  | 30        |
| II.1. <i>Les caractéristiques physiographiques :</i> .....   | 30        |
| II.2. <i>Caractéristiques géologiques :</i> .....  | 33        |
| II.3. <i>Occupation du sol :</i> .....   | 34        |
| II.4. <i>Climatologie générale :</i> .....   | 36        |
| III.  CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT DE LA RHERAYA .....   | 36        |
| III.1. <i>Caractéristiques physiographiques :</i> .....  | 36        |
| III.2. <i>Caractéristiques géologiques :</i> .....   | 39        |
| III.3. <i>Occupation du sol :</i> .....  | 40        |
| III.4. <i>Climatologie générale :</i> .....  | 41        |
| IV.  CONCLUSION SUR LA PHYSIO-GEOGRAPHIE ET LA GEOLOGIE DE LA REGION D' ETUDE : ..                     | 42        |
| <b>CHAPITRE II : HYDRO-PLUVIOMETRIE ET ANALYSE DES REGIMES .....</b>                                   | <b>43</b> |

|   |   |    |
|---|---|----|
| I.  | ACQUISITION ET ANALYSE DES DONNEES .....  | 43 |
| II.   | VARIATION TEMPORELLE DES PRECIPITATIONS DANS LES BASSINS VERSANTS DE<br>L'OURIKA ET DE LA RHERAYA : ..... | 44 |
| II.1.   | <i>Variation annuelle</i> : .....   | 44 |
| II.2.   | <i>Variation mensuelle</i> : .....  | 45 |
| II.3.   | <i>Variation saisonnière</i> : .....  | 46 |
| III.  | ANALYSE DES DONNEES DE DEBIT DES BASSINS DE L'OURIKA ET DE LA RHERAYA .....                               | 47 |
| III.1.  | <i>Variation des débits max annuels</i> .....   | 47 |
| III.2.  | <i>Variation des débits moyens mensuels</i> : .....   | 48 |
| III.3.  | <i>Variation des débits saisonnière</i> : .....   | 48 |
| IV.   | RELATION PLUIE-DEBIT : .....  | 49 |
| IV.1.   | <i>Le bassin versant d'Ourika</i> : .....   | 49 |
| IV.2.   | <i>Le bassin versant de la Rheraya</i> : .....  | 49 |
| V.  | CONCLUSION SUR L'HYDRO-PLUVIOMETRIE : .....   | 50 |
| <b>CHAPITRE III : LES CRUES DES OUEDS DE L'OURIKA ET DE LA RHERAYA . 51</b> |   |    |
| I.  | PRESENTATION D'UN HYDROGRAMME DE CRUE : .....   | 51 |
| II.   | HISTORIQUE DES CRUES DES BASSINS VERSANTS DE L'OURIKA ET DE LA RHERAYA .....                              | 52 |
| II.1.   | <i>Le bassin versant de l'Ourika</i> .....  | 52 |
| II.2.   | <i>Le bassin versant de la Rheraya</i> .....  | 56 |
|   | .....   | 60 |
| III.  | VITESSE DE PROPAGATION DES CRUES .....  | 60 |
| III.1.  | <i>Le bassin versant de l'Ourika</i> .....  | 61 |
| III.2.  | <i>Le bassin versant de la Rheraya</i> .....  | 63 |
| IV.   | CONCLUSION SUR L'ETUDE DYNAMIQUE DES CRUES : .....  | 63 |
| <b>CHAPITRE IV : ANALYSE FREQUENTIELLE DES DEBITS DE CRUES..... 65</b>      |   |    |
| I.  | LES TESTS STATISTIQUES : .....  | 66 |
| I.1.  | <i>Test d'homogénéité</i> : .....   | 66 |
| I.2.  | <i>Test d'indépendance</i> : .....  | 66 |
| I.3.  | <i>Test de stationnarité</i> : .....  | 67 |
| I.4.  | <i>Résultats des tests statistiques sur les données utilisées</i> : .....                                 | 67 |
| II.   | OUTILS D'ANALYSES ET PARAMETRES D'EVALUATION : .....  | 68 |
| III.  | AJUSTEMENT DES LOIS DE PROBABILITE ET DETERMINATION DES PERIODES DE RETOUR<br>DES DEBITS EXTREMES : ..... | 69 |

|  |           |
|--|-----------|
| IV. RESULTATS DE L'ANALYSE FREQUENTIELLE ET ESTIMATION DES QUANTILES : .....   | 70        |
| IV.1. Le bassin versant de l'Ourika à la station d'Aghbalou : .....  | 70        |
| IV.2. Le bassin versant de la Rheraya à la station de Tahanaout : .....  | 72        |
| V. CONCLUSION SUR L'ANALYSE FREQUENTIELLE : .....  | 73        |
| <b>CHAPITRE V : MODELISATION HYDRAULIQUE .....</b>   | <b>74</b> |
| I. GENERALITES SUR LA MODELISATION HYDRAULIQUE : .....   | 74        |
| II. OUTIL DE MODELISATION ET DONNEES UTILISEES .....   | 74        |
| II.1. L'outil de modélisation hydraulique utilisé : .....  | 75        |
| II.2. Les données utilisées pour la modélisation hydraulique : .....   | 77        |
| III. RESULTATS DE LA MODELISATION HYDRAULIQUE .....  | 79        |
| III.1. Bassin versant de l'ourika .....  | 79        |
| III.2. Bassin versant de la Rheraya : .....  | 87        |
| IV. CONCLUSION SUR LA MODELISATION HYDRAULIQUE : .....   | 90        |
| <b>CHAPITRE VI : APPLICATION DE L'APPROCHE GEO-MORPHO-CLIMATIQUE<br/>A LA CARTOGRAPHIE DU RISQUE D'INONDATION.....</b>                     | <b>92</b> |
| I. PRESENTATION DE L'APPROCHE GEO-MORPHO-CLIMATIQUE : .....  | 92        |
| II. L'INDICE DE RISQUE D'INONDATION FHI : .....  | 93        |
| II.1. Poids relatifs des critères.....   | 94        |
| II.2. Processus hiérarchique analytique AHP .....  | 95        |
| III. RESULTATS DE L'APPROCHE GEO-MORPHO-CLIMATIQUE APPLIQUEE SUR LE BASSIN<br>VERSANT DE LA RHERAYA. ....                                  | 98        |
| III.1. Lame d'eau écoulée : .....  | 100       |
| III.2. Distance du réseau de drainage : .....  | 102       |
| III.3. Élévations et pentes : .....  | 103       |
| III.4. Occupation du sol : .....   | 105       |
| III.5. Intensité des précipitations : .....  | 106       |
| III.6. Géologie : .....  | 108       |
| IV. INTERPOLATION ET CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES : .....   | 110       |
| V. CONCLUSION SUR L'APPROCHE GEO-MORPHO-CLIMATIQUE: .....  | 113       |
| <b>CHAPITRE VII : HYDRO-GEOMORPHOLOGIE ET DIAGNOSTIC TERRITORIAL<br/>ET INTEGRE DU RISQUE D'INONDATION DANS LA VALLEE DE L'OURIKA. 114</b> |           |
| I. L'APPROCHE HYDRO-GEOMORPHOLOGIQUE .....   | 115       |

|   |            |
|---|------------|
| I.1. <i>La spatialisation de l'aléa</i> .....   | 117        |
| II.    DIAGNOSTIC TERRITORIAL ET INTEGRE DU RISQUE D'INONDATION .....                           | 121        |
| II.1. <i>Système de Prévision et d'Alerte aux Crues</i> .....                                   | 121        |
| II.2. <i>Composantes du système de prévision et d'alerte aux crues « SPAC ».</i> .....          | 122        |
| II.3. <i>Fonctionnement et exploitation du SPAC :</i> .....                                     | 123        |
| II.4. <i>Caractérisation des enjeux</i> .....   | 125        |
| II.5. <i>Zones de refuges et plans d'évacuation</i> .....                                       | 139        |
| III.    CONCLUSION SUR L'APPROCHE HYDRO-GEOMORPHOLOGIQUE ET LE DIAGNOSTIC<br>TERRITORIAL: ..... | 147        |
| <b>CONCLUSION GENERALE :</b> .....  | <b>149</b> |
| <b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :</b> .....  | <b>152</b> |

## Liste des tableaux

|   |            |
|---|------------|
| <i>Tableau 1: Caractéristiques du sous-bassin versant d'Ourika .....</i>  | <i>32</i>  |
| <i>Tableau 2: Caractéristiques du sous-bassin versant de la Rheraya.....</i>  | <i>38</i>  |
| <i>Tableau 3: Caractéristiques de la crue du 17 août 1995.....</i>  | <i>54</i>  |
| <i>Tableau 4: Caractéristiques de la crue du 28 octobre 1999.....</i>   | <i>55</i>  |
| <i>Tableau 5: Caractéristiques de la crue du 22 novembre 2014.....</i>  | <i>56</i>  |
| <i>Tableau 6: Caractéristiques de la crue du 17 août 1995 à la station de Tahanaout.....</i>  | <i>57</i>  |
| <i>Tableau 7: Caractéristiques de la crue du 28 octobre 1999 à la station de Tahanaout. ....</i>  | <i>58</i>  |
| <i>Tableau 8: Caractéristiques de la crue du 22 novembre 2014 à la station de Tahanaout.....</i>  | <i>59</i>  |
| <i>Tableau 9: Résultats des tests statistiques des pluies/débits journaliers annuels utilisées pour le bassin versant de l'Ourika.....</i>    | <i>68</i>  |
| <i>Tableau 10: Résultats des tests statistiques des pluies/débits journaliers annuels utilisées pour le bassin versant de la Rheraya.....</i> | <i>68</i>  |
| <i>Tableau 11: Fonctions de distribution de probabilité utilisées. ....</i>   | <i>69</i>  |
| <i>Tableau 12: Critères AIC et BIC pour les différentes distributions dans le bassin versant de l'Ourika. ....</i>                            | <i>71</i>  |
| <i>Tableau 13: Estimations des débits de pointe pour différentes périodes de retour dans l'Ourika.....</i>                                    | <i>72</i>  |
| <i>Tableau 14: Critères AIC et BIC pour les différentes distributions dans le bassin versant de la Rheraya. ....</i>                          | <i>73</i>  |
| <i>Tableau 15: Estimations des débits de pointe pour différentes périodes de retour dans la Rheraya. ....</i>                                 | <i>73</i>  |
| <i>Tableau 16: Résultats de la quantification des éléments de l'inondation relative à différents débits de pointe - section "A"......</i>     | <i>83</i>  |
| <i>Tableau 17: Résultats de la quantification des éléments de l'inondation relative à différents débits de pointe - section "B"......</i>     | <i>83</i>  |
| <i>Tableau 18: Résultats de la quantification des éléments de l'inondation relative à différents débits de pointe - section "C"......</i>     | <i>84</i>  |
| <i>Tableau 19: Résultats de la quantification des éléments de l'inondation relative à différents débits de pointe - section "D"......</i>     | <i>84</i>  |
| <i>Tableau 26: Les seuils de précipitations définis pour l'alerte et la préalerte par l'ABHT....</i>  | <i>124</i> |
| <i>Tableau 27: Critères de vulnérabilités des bâtiments face aux crues torrentielles de l'Ourika .....</i>                                    | <i>129</i> |

*Tableau 28: Critères d'exposition des bâtiments face aux crues torrentielles de l'Ourika ... 129*  
*Tableau 29: Typologie des accès ..... 141*

## Liste des figures :

|   |           |
|---|-----------|
| <i>Figure 1: Situation géographique du bassin versant de Tensift avec délimitation des sous-bassins versants d'Ourika et Rheraya. (O. Bennani).....</i> | <i>29</i> |
| <i>Figure 2: Variation des altitudes dans le sous bassin versant de l'Ourika (O. Bennani) .....</i>   | <i>31</i> |
| <i>Figure 3: Carte des pentes dans le sous bassin versant de l'Ourika (O. Bennani) .....</i>  | <i>31</i> |
| <i>Figure 4: Réseau hydrographique du sous bassin de l'Ourika (O. Bennani).....</i>   | <i>33</i> |
| <i>Figure 5: Géologie du sous bassin versant de l'Ourika (O. Bennani) .....</i>   | <i>34</i> |
| <i>Figure 6: Répartition des terrains dans le sous bassin versant de l'Ourika .....</i>   | <i>35</i> |
| <i>Figure 7: Occupation du sol du sous bassin versant de l'Ourika (O. Bennani).....</i>   | <i>35</i> |
| <i>Figure 8 : Variation des altitudes dans le sous bassin versant de la Rheraya (O.Bennani) ...</i>   | <i>37</i> |
| <i>Figure 9 : Carte des pentes dans le sous bassin versant de la Rheraya (O. Bennani) .....</i>   | <i>38</i> |
| <i>Figure 10: Réseau hydrographique du sous bassin versant de la Rheraya (O. Bennani).....</i>  | <i>39</i> |
| <i>Figure 11: Géologie du sous bassin versant de la Rheraya (O. Bennani).....</i>   | <i>40</i> |
| <i>Figure 12: Répartition des terrains dans le sous bassin versant de la Rheraya .....</i>  | <i>41</i> |
| <i>Figure 13: Occupation du sol du sous bassin versant de la Rheraya (O. Bennani) .....</i>   | <i>41</i> |
| <i>Figure 14: Station hydrologique de Tahanaout (Rheraya) (photo T.Ruf). .....</i>  | <i>44</i> |
| <i>Figure 15: Pluviométrie annuelle dans les stations d'Aghbalou (Ourika) et de Tahanaout (Rheraya) entre 1970/71 et 2016/17 .....</i>                  | <i>45</i> |
| <i>Figure 16: Pluviométrie moyenne mensuelle dans les stations d'Aghbalou (Ourika) et de Tahanaout (Rheraya) entre 1970/71 et 2016/17.....</i>          | <i>46</i> |
| <i>Figure 17: Pluviométrie moyenne saisonnière aux stations d'Aghbalou(Ourika) et de Tahanaout (Rheraya) entre 1970/71 et 2016/17.....</i>              | <i>46</i> |
| <i>Figure 18: Variation des débits moyens annuels aux stations d'Aghbalou (Ourika)et de Tahanaout (Rheraya)entre 1970/71 et 2016/17 .....</i>           | <i>47</i> |
| <i>Figure 19: Variation mensuelle des débits aux stations d'Aghbalou (Ourika) et de Tahanaout (Rheraya) entre 1970/71 et 2016/17. ....</i>              | <i>48</i> |
| <i>Figure 20: Variation saisonnière des débits aux stations d'Aghbalou (Ourika) et de Tahanaout (Rheraya) entre 1970/71 et 2016/17.....</i>             | <i>48</i> |
| <i>Figure 21: Relation pluie - débits moyens mensuels à la station d'Aghbalou (Ourika) .....</i>  | <i>49</i> |
| <i>Figure 22: Relation pluie - débit moyen mensuel à la station de Tahanaout (Rheraya).....</i>   | <i>50</i> |
| <i>Figure 23: Représentation des composantes d'un hydrogramme de crue. (André Musy) .....</i>   | <i>52</i> |
| <i>Figure 24: Hydrogramme de la crue du 17/08/1995 à la station d'Aghbalou (OURIKA) .....</i>   | <i>53</i> |
| <i>Figure 25: Hydrogramme de la crue du 28/10/1999 a la station d'Aghbalou (OURIKA).....</i>  | <i>54</i> |



|  |            |
|--|------------|
| <i>Figure 26: Hydrogramme de la crue du 22/11/2014 à la station d'Aghbalou (Ourika).....</i>   | <i>55</i>  |
| <i>Figure 27: Dégâts matériels causés par la crue du 22 novembre 2014 de l'oued Ourika au douar Akhlij-Tnine Ourika (photo ABHT). .....</i>      | <i>56</i>  |
| <i>Figure 28: Hydrogramme de la crue du 17/08/1995 a la station de Tahanaout (Rheraya)....</i>   | <i>57</i>  |
| <i>Figure 29: Hydrogramme de la crue du 28/10/1999 à la station de Tahanaout (Rheraya)....</i>   | <i>58</i>  |
| <i>Figure 30: Hydrogramme de la crue du 22/11/2014 à la station de Tahanaout (Rheraya)....</i>   | <i>59</i>  |
| <i>Figure 31: paysage de la vallée en amont d'Asni après le passage d'une crue (photo T.Ruf)</i>   | <i>60</i>  |
| <i>Figure 32: Localisation des stations hydrométriques au niveau des deux bassins versants (O. Bennani). .....</i>                               | <i>61</i>  |
| <i>Figure 33: Propagation de la crue du 22/07/2014 entre les stations d'Aghbalou et de Tazitount.....</i>  | <i>61</i>  |
| <i>Figure 34: Propagation de la crue du 05/05/2016 entre les stations de Tazitount et d'Aghbalou.....</i>  | <i>62</i>  |
| <i>Figure 35: Propagation de la crue du 04/05/2016 au niveau des stations de Tahanaout et Tintine.....</i>                                       | <i>63</i>  |
| <i>Figure 36: Ajustement graphique de lois à l'échantillon des débits maxima instantanés annuels de l'Ourika de 1970-1971 à 2014-2015 .....</i>  | <i>71</i>  |
| <i>Figure 37: Ajustement graphique de lois à l'échantillon des débits maxima instantanés annuels de la Rheraya de 1970-1971 à 2014-2015.....</i> | <i>72</i>  |
| <i>Figure 38: Modèle numérique d'élévation pour le bassin versant de l'Ourika avec une résolution Pleiades 4 m. ....</i>                         | <i>79</i>  |
| <i>Figure 39: Localisation des sections étudiées. (O. Bennani) .....</i>   | <i>80</i>  |
| <i>Figure 40: Illustration des coupes transversales pour les différentes sections. (O. Bennani) .....</i>  | <i>81</i>  |
| <i>Figure 41: Section « C » et hauteur maximale probable des eaux de la crue de l'Ourika du 17 août 1995.....</i>                                | <i>85</i>  |
| <i>Figure 42: Cartographie des plaines inondables à l'aide des Pléiades de 4 m. (O. Bennani)</i>   | <i>86</i>  |
| <i>Figure 43: Localisation des sections étudiées au niveau du tronçon de la Rheraya .....</i>  | <i>87</i>  |
| <i>Figure 44: Coupes transversales des sections et des niveaux d'eau calculés pour différentes périodes de retour. (O. Bennani).....</i>         | <i>88</i>  |
| <i>Figure 45: Cartographie de l'extension de la plaine inondable. (O. Bennani) .....</i>   | <i>90</i>  |
| <i>Figure 46: Organigramme de la méthode multicritères. (O. Bennani) .....</i>   | <i>94</i>  |
| <i>Figure 47: Carte thématique du paramètre accumulation des débits. (O. Bennani).....</i>   | <i>101</i> |
| <i>Figure 48 : Carte thématique du paramètre distance du réseau de drainage. (O. Bennani)</i>  | <i>102</i> |

|   |     |
|---|-----|
| <i>Figure 49: Carte thématique du paramètre Élévation du bassin de la Rheraya. (O. Bennani)</i>                 | 103 |
| <i>Figure 50: Carte thématique du paramètre des pentes du bassin versant de la Rheraya. (O. Bennani)</i>        | 104 |
| <i>Figure 51: Carte thématique du paramètre Occupation du sol du bassin versant de la Rheraya. (O. Bennani)</i> | 105 |
| <i>Figure 52: Carte thématique du paramètre d'intensité des précipitations. (O. Bennani)</i>                    | 107 |
| <i>Figure 53: Carte thématique du paramètre Géologie de l'approche FIGUSED.</i>                                 | 109 |
| <i>Figure 54: Carte du risque d'inondation du bassin versant de la Rheraya. (O. Bennani)</i>                    | 111 |
| <i>Figure 55: Répartition des zones inondables.</i>   | 112 |
| <i>Figure 56: Les composantes du risque. (F. Léone)</i>   | 115 |
| <i>Figure 57: Vue aérienne de la région d'Aghbalou (vallée de l'Ourika).</i>                                    | 115 |
| <i>Figure 58: Vue aérienne de la région d'Oulmes (vallée de l'Ourika).</i>                                      | 116 |
| <i>Figure 59: Vue aérienne de la région de Setti Fadma (vallée de l'Ourika).</i>                                | 116 |
| <i>Figure 60: Relation topographique entre les différents lits (Ballais J. L.)</i>                              | 117 |
| <i>Figure 61: Hydro-géomorphologie de la vallée de l'Ourika à Aghbalou</i>                                      | 118 |
| <i>Figure 62: le cours d'eau principale de l'Ourika à Aghbalou. (E. Druon)</i>                                  | 118 |
| <i>Figure 63: Hydro-géomorphologie de la vallée de l'Ourika a Oulmes</i>  | 119 |
| <i>Figure 64: Vue du cours d'eau principal au niveau d'Oulmes.</i>  | 120 |
| <i>Figure 65: Hydro-géomorphologie de la vallée de l'Ourika à Setti Fadma</i>                                   | 120 |
| <i>Figure 66: Empiètement des terrasses de restaurants sur le cours d'eau à Setti Fadma.</i>                    | 121 |
| <i>Figure 67: Composantes et fonctionnement général du SPAC. (ABHT)</i>   | 122 |
| <i>Figure 68: Emplacement des zones du projet à Ourika. (ABHT)</i>  | 123 |
| <i>Figure 69: Occupation du sol de la vallée de l'Ourika à Aghbalou</i>   | 126 |
| <i>Figure 70: Occupation du sol dans la vallée de l'Ourika à Oulmes</i>   | 127 |
| <i>Figure 71: Occupation du sol de la vallée de l'Ourika à Setti Fadma</i>                                      | 128 |
| <i>Figure 72: Indice de risque des bâtiments à Aghbalou</i>   | 130 |
| <i>Figure 73: Indice de risque des bâtiments à Oulmes</i>   | 131 |
| <i>Figure 74: Indice de risque des bâtiments à Setti Fadma.</i>   | 132 |
| <i>Figure 75: Occupation des terrasses des restaurants à Aghbalou le 19 mars 2016</i>                           | 133 |
| <i>Figure 76: Occupation des terrasses des restaurants à Oulmes le 26 mars 2016.</i>                            | 133 |
| <i>Figure 77: Occupation des terrasses des restaurants à Setti Fadma le 24 avril 2016.</i>                      | 134 |
| <i>Figure 78: Circulation des véhicules dans la vallée de l'Ourika le dimanche 27 mars 2016</i>                 | 135 |
| <i>Figure 79: Circulation des voitures dans l'Ourika le dimanche 1 mai 2016.</i>                                | 136 |

|  |            |
|--|------------|
| <i>Figure 80: Fréquentation des espaces extérieurs et des bâtiments à Aghbalou.....</i>    | <i>137</i> |
| <i>Figure 81: Fréquentation des espaces extérieurs et des bâtiments à Oulmes.....</i>      | <i>138</i> |
| <i>Figure 82: Fréquentation des espaces extérieurs et des bâtiments à Setti Fadma.....</i> | <i>139</i> |
| <i>Figure 83: Plan d'évacuation à Aghbalou.....</i>  | <i>142</i> |
| <i>Figure 84: Plan d'évacuation à Oulmes.....</i>  | <i>143</i> |
| <i>Figure 85: Plan d'évacuation à Setti Fadma.....</i>                                     | <i>144</i> |
| <i>Figure 86: les sites d'expérimentation des plans d'évacuation.....</i>                  | <i>144</i> |
| <i>Figure 87: Validation du plan d'évacuation dans la région d'Aghbalou.....</i>           | <i>145</i> |
| <i>Figure 88: Validation du plan d'évacuation dans la région d'Oulmes.....</i>             | <i>146</i> |
| <i>Figure 89: Validation du plan d'évacuation dans la région de Setti Fadma.....</i>       | <i>147</i> |

## Acronymes :

|         |   |
|---------|---|
| ABHT    | AGENCE DU BASSIN HYDRAULIQUE DE TENSIFT             |
| MNT     | MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN                         |
| HEC RAS | HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER-RIVER ANALYSIS SYSTEM |
| UTM     | UNIFIED THREAT MANAGEMENT                           |
| WGS     | WORLD GEODETIC SYSTEM                               |
| SWIR    | SHORT-WAVE INFRARED                                 |
| VNIR    | VISIBLE AND NEAR-INFRARED                           |
| TIR     | THERMIC INFRARED                                    |
| SIG     | SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE                  |
| SPAC    | SYSTEME DE PREVISION ET D'ALERTE AUX CRUES          |
| JICA    | L'AGENCE JAPONAISE DE COOPERATION INTERNATIONALE    |
| GRED    | GOUVERNANCE, RISQUE, ENVIRONNEMENT, DEVELOPPEMENT   |
| GCRN    | GESTION DES CATASTROPHES ET DES RISQUES NATURELS    |
| FHI     | FLOOD HAZARD INDEX                                  |
| MFI     | INDICE DE FOURNIER MODIFIER                         |
| AHP     | ANALYTIC HIERARCHY PROCESS                          |

## Résumé :

Comme pour diverses régions du Maroc, les bassins versants du sud-ouest du pays sont sensibles aux événements hydroclimatiques extrêmes, notamment les crues liées à des épisodes de précipitations intenses. De tels épisodes sont fréquents et peuvent être dévastateurs, comme les cas des crues de l'Ourika en août 1995 et du bassin de Tensift en novembre 2014. La modélisation de ces événements extrêmes est ainsi un enjeu scientifique essentiel pour améliorer les systèmes de prévision et protéger les populations et les infrastructures. À cet effet, ce travail vise à coupler une modélisation physique de l'aléa inondation pour certains sites à forts enjeux des bassins versants de l'Ourika et de la Rheraya avec une approche paramétrique de cartographie des zones inondables ainsi qu'un diagnostic territorial de vulnérabilité humaine et des infrastructures exposées. Ceci afin de cerner les degrés du risque et assurer une bonne gestion des inondations. L'étude physiographique et hydro-pluviométrique a permis de comprendre la dynamique des crues et le rôle du milieu physique et du climat dans leur déclenchement. Par ailleurs, une analyse fréquentielle de ces crues a permis d'estimer leurs probabilités d'occurrence et leurs périodes de retours. Les résultats sont ensuite utilisés dans un modèle de simulation hydraulique afin de déduire les hauteurs d'eau correspondantes à différentes pointes de débits. Ceci a permis de déterminer les zones inondables et l'étendue des crues de différentes périodes de retour sur certains tronçons présentant une forte vulnérabilité. Cette modélisation hydraulique est effectuée en comparant deux Modèles numériques de Terrain, un MNT Aster avec une résolution spatiale de 30m et un MNT dérivé de l'imagerie stéréoscopique de Pléiades avec une résolution de 4m. Une seconde approche, inédite au Maroc, a été utilisée pour spatialiser le risque d'inondation à l'échelle du bassin versant de la Rheraya. Il s'agit d'une approche géo-morpho-climatique qui nous a permis d'avoir une cartographie des zones inondables sur l'ensemble du bassin. Ce résultat valide en partie celui de la modélisation hydraulique précédemment effectuée. Finalement un diagnostic territorial a permis d'analyser les enjeux exposés au niveau de la vallée de l'Ourika et d'identifier les zones vulnérables aux risques d'inondation. Ce diagnostic a abouti à la proposition de plans d'évacuations, permettant un accès facile aux zones de refuges potentiels en cas d'inondation. Le caractère reproductible, peu coûteux et pertinent de cette approche faciliterait sa transposition sur d'autres bassins et la prise des meilleures décisions de prévention.

**Mots clés :** Haut Atlas marocain, crues, inondations, modélisation hydraulique, vulnérabilité, cartographie des zones inondables.

## Abstract :

As for various regions of Morocco, watersheds in the south-western of the country are sensitive to extreme hydro-climatic events, including floods linked to intense rainfall events. Such episodes are frequent and can be devastating, such as the cases of the Ourika flood in August 1995 and in the Tensift watershed in November 2014 and more recently on the High and the Anti-Atlas during the summer of 2019. Thus, modeling these extreme events is a scientific issue to improve flood forecasting systems and to protect people and infrastructure. To this end, this work aims to couple a physical modeling of flood hazard for some sites with high stakes, such as the Ourika and Rheraya watersheds, with a parametric approach to mapping flood zones. It aims also to a territorial diagnosis of human vulnerability and exposed infrastructure, in order to ensure a good flood risk management. Physiographic and hydro-pluviométrique study of the watersheds made it possible to understand their flood dynamics. A frequency analysis of these floods was conducted in order to estimate their probabilities and return periods. In addition, on certain sections presenting a high vulnerability; and using a hydraulic simulation model, a modeling was carried out to analyze the relationship between water level and riverbed flows and to determine the flood zones and the corresponding flood extent at different return periods. This is done by comparing two Digital Elevation Models; an Aster DEM with a spatial resolution of 30 m and a DEM derived from Pleiades stereoscopic imagery with a resolution of 4 m. A second approach, unprecedented in Morocco, has been used to spatialize the risk of flooding at the scale of the watershed. It is a geo-morpho-climatic approach low cost and adapted to the specificities of the watershed studied. This approach allowed us to have a mapping of the flood zones over the whole of the Rheraya watershed. This result validates, in part, that of the hydraulic modeling previously carried out. Finally, a territorial diagnosis made it possible to analyze the issues exposed at the level of the Ourika valley and to identify the areas vulnerable to flood hazards. This diagnosis led to propose evacuation plans, allowing easy access to potential refuge areas in the flood event. The reproducible, inexpensive and relevant nature of this approach would facilitate decision-making and preventative measures.

**Keywords:** High Atlas of Morocco, floods, inundation, hydraulic modeling, vulnerability, mapping of flood zones.

## ملخص

كما هو الحال بالنسبة لمختلف مناطق المغرب ، فإن الأحواض النهرية في الجنوب الغربي تشهد ظروفًا مناخية وهيدرولوجية قصوى، كالفيضانات المرتبطة بتساقطات كثيفة. هذه الحالات أصبحت تتردد أكثر فأكثر ويمكن أن تكون مدمرة ، كما كان الحال في فيضان أوريكمة في غشت 1995 و فيضانات حوض تانسيفت في نونبر 2014 ومؤخرا فيضانات الأطلسين الكبير والصغير خلال صيف 2019. لهذا، تمثل نمذجة هذه الأحداث المتطرفة مسألة علمية مهمة لتحسين أنظمة التنبؤ بالفيضانات لهدف حماية الأشخاص والبنيات التحتية. وتحقيقًا لهذه الغاية ، يهدف هذا العمل إلى الجمع بين النمذجة الفيزيائية لخطر الفيضانات في بعض المواقع المهددة، مثل حوضي أوريكمة وغيغاية، وبين اتباع نهج جغرافي لرسم خرائط المناطق المهددة بالفيضانات ، هذا بالإضافة إلى التشخيص الترابي لهشاشة بعض المواقع واحتمال تعرضها للخطر. كل هذا لضمان تدبير جيد لمخاطر الفيضان. وقد مكّنت دراسة فيزيوغرافية وتساقطات وصبيب الأحواض النهرية من فهم دينامية فيضاناتها وتمت دراسة ترددات هذه الفيضانات من أجل تقدير احتمالات حدوثها وفترات عودتها. بالإضافة إلى ذلك، وباستخدام نموذج محاكاة هيدروليكي، تم إجراء نمذجة لتحليل العلاقة بين منسوب المياه وصبيب الوادي وتحديد مناطق الفيضان وشساعة المناطق التي قد تغمر بالمياه حسب مختلف فترات العودة. وقد أنجزت هذه المحاكاة باستعمال ومقارنة نموذجين رقميين للأرض: نموذج ذو دقة مكانية تبلغ 30 مترًا ونموذج أدق مستمد من الصور المجسمة للأرض بدقة 4 أمتار. من جهة ثانية، إستعملنا طريقة تعتبر سابقة في المغرب، لكرطوغرافية خطر الفيضان على مستوى حوض نهري، وهو نهج جغرافي-مناخي بتكلفة منخفضة ومتكيف مع خصوصيات المنطقة. وقد سمح لنا هذا النهج بإجراء خرائط لمناطق الفيض على كامل الحوض النهري لغيغاية. تحديد هذه المناطق بهذه الطريقة زكى جزئيا نتائج النموذج الهيدروليكي الذي تم تنفيذه مسبقًا. من جهة أخرى، أتاح التشخيص الترابي للرهانات المعرضة للخطر على مستوى وادي أوريكمة إلى اقتراح خطط الإخلاء، مما يتيح سهولة الوصول إلى مناطق الإحتماء المحتملة في حالة الفيضانات. أخيرًا، طبيعة هذا النهج غير المكلفة وإمكانية استنساخه، من شأنهما أن يسهلا اتخاذ القرارات والتدابير الوقائية بصفة عامة في الأحواض النهرية المهددة.

## Introduction générale :

Dans le monde contemporain, les inondations représentent un risque naturel majeur. C'est l'un des risques naturels qui fait le plus de victimes, en occasionnant environ 20000 victimes par an (Simona et Cedric, 2007). En effet, d'après le Département des Affaires humanitaires des Nations Unies, entre 1970 et 1981, ces catastrophes ont représenté plus du tiers de l'ensemble des cataclysmes recensés (Ballais, 2011) ; et entre 2005 et 2014, plus de 85 millions de personnes ont été directement touchées par les inondations chaque année et environ 6000 personnes ont été tuées en moyenne chaque année à la suite d'inondations (UNISDR, 2015). La région méditerranéenne, par exemple, a vécu plusieurs inondations qui constituent une menace de plus en plus importante, avec des précipitations qui dépassent les 200 mm en 24 heures, et parfois même en un laps de temps qui ne dépasse pas les 6 heures (Ducrocq, 2006). Les inondations deviennent donc de plus en plus redoutées, et elles surviennent souvent à cause d'une vulnérabilité importante. L'augmentation observée de la vulnérabilité à ces inondations au cours des dernières décennies au sud de la France par exemple, est principalement due à des facteurs humains tels que l'urbanisation accrue et la croissance démographique (Tramblay *et al.*, 2019). Au registre des épisodes marquants, le Maroc a connu des événements hydrologiques douloureux, comme ceux de l'été 2019 ou de l'automne 2014, sans oublier l'événement tristement célèbre d'août 1995 de l'oued Ourika (des centaines de morts). Au voisinage, l'Algérie a également connu en novembre 2001 des précipitations de 261 mm en 24 heures à Alger et des inondations qui ont causé d'importantes pertes humaines, d'environ 800 morts (Argence *et al.*, 2008). D'autre part, il y a les inondations des côtes méditerranéennes françaises : les Bouches-du-Rhône en 1993, l'Aude en 1999, le Gard en 2002 ou le Var en 2010 (Vinet *et al.*, 2011) ; ou encore les côtes italiennes en février 2015 (Bevacqua *et al.*, 2017), puis en septembre 2015 avec des précipitations cumulées atteignant 300 mm en 12h dans la vallée de Nure (Scorpio *et al.*, 2018). Les bassins versants espagnols ont également connu une augmentation des inondations et des événements pluviométriques intenses, à partir de 1996, notamment à l'Ouest et au sud-ouest du pays en automne et en hiver (Benito et Machado, 2012), mais aussi en d'autres régions, comme à Barcelone en 2002. (Damienne Provitolo, 2007) ou à la côte sud-est (Pérez Morales *et al.*, 2015).

Le Maroc, de par sa situation géographique, est également confronté à des épisodes de précipitations importantes, provoquant des crues dévastatrices. En effet, au cours des



dernières décennies, plusieurs inondations ont été enregistrées sur tout le pays, mettant en péril les infrastructures existantes, les terres agricoles et les vies des gens. Le pays a connu plus de 35 inondations majeures entre 1951 et 2015 (Zurich Insurance Company, 2015). Du fait de la croissance démographique et de l’empiétement sur les plaines inondables, les inondations deviennent un danger naturel récurrent. Accompagnées de glissements de terrain, les eaux de crues pourraient être dévastatrices. Une multitude d’inondations majeures ont marqué le pays en raison de l’étendue de leurs dégâts que ça soit sur le plan matériel ou humain (Karmaoui *et al.* 2016, Reynard *et al.* 2013, Saidi *et al.*, 2010). Parmi les épisodes les plus désastreux, outre celui précité de l’Ourika en 1995(Saidi *et al.*, 2003), on peut citer les inondations d’El Hajeb, Taza et Khenifra en 1997, Mohammedia, Berchid et Beni Mellal en 2002 (El Khalki et Benyoucef, 2005), Tanger et Oued Guir en 2008 (Ait Hssaine, 2014), la région du Gharb et Beni Mellal en 2009 (Werren *et al.*, 2012), Casablanca et Fès en 2010 (Lasri *et al.*2011) et plus récemment dans le sud-ouest du Maroc en novembre 2014 (Theilen-Willige *et al.*, 2015). Ces études montrent que la vulnérabilité du pays ne cesse d’augmenter (Merheb *et al.*, 2016). Dans ce sens, Saidi *et al.* (2003) ont démontré le rôle du milieu physique dans l’amplification des inondations en milieu montagneux en prenant comme exemple, la crue du 17 août 1995 dans la vallée de l’Ourika (Haut Atlas du Maroc). Zkhir *et al.* (2016), ont fourni une analyse régionale de la fréquence des inondations dans les bassins montagneux du Haut Atlas. Trambly *et al.* (2012) ont développé un modèle pour les inondations en amont du barrage de Makhazine dans le nord du Maroc. Zoglat *et al.* (2014) ont proposé une modélisation des pics de crues dans le bassin de Loukkos, dans le nord du Maroc. Werren *et al.* (2015) ont proposé une cartographie des zones d'inondation dans le Moyen Atlas en tirant parti de la cartographie hydro-géomorphologique et des estimations post-inondation au lieu des données hydrométriques mesurées. Karrouchi *et al.* (2016) ont travaillé sur la cartographie des zones à risque d'inondation dans la région de Tanger-Tétouan au nord du Maroc avec une approche hydraulique. Et à l'aide d'un MNT de 30 mètres de résolution, El Alaoui El Fels *et al.* (2014), ont réalisé une simulation et une cartographie du risque d'inondation dans la vallée de l'Ourika.

Tout au long des années précédentes, un grand effort a donc été déployé pour comprendre, prévoir et gérer les inondations. Dans cette optique, la présente thèse contribue à cette problématique du risque d’inondations et à ces impacts sur les différents systèmes socio-économiques, écologiques et environnementaux. L’objectif de ce travail est ainsi de coupler la modélisation physique de l’aléa inondation pour certains sites à forts enjeux, tels que les

bassins versants de l'Ourika et de la Rheraya avec un diagnostic territorial de la vulnérabilité humaine et des infrastructures exposées. Ceci afin de cerner et localiser les zones à haut risque d'inondation en proposant une approche adaptée au contexte local et aux données existantes. Cela permettrait d'étendre cette approche à différents bassins marocains et proposer aux décideurs et gestionnaires une meilleure vision et des possibilités de gestion des risques d'inondation.

À cet effet, trois grands axes seront développés :

➤ **La modélisation hydraulique :**

Le premier axe de ce travail porte sur l'application d'une modélisation hydraulique, qui permet d'analyser la relation hauteur d'eau-débit dans le lit des rivières et identifier les zones inondables sur certains tronçons présentant une forte vulnérabilité. En effet, la modélisation des événements extrêmes s'avère un enjeu scientifique essentiel pour améliorer les systèmes de prévision des crues et assurer la protection de la population et des infrastructures (Di Baldassarre *et al.*, 2010b, Patel *et al.*, 2017). Afin de réduire les pertes en vies humaines et les dégâts causés aux infrastructures dans les plaines inondables, il est nécessaire de prévoir les niveaux d'eau des rivières, y compris l'étendue des inondations pour la cartographie des risques (Timbadiya *et al.*, 2014, Patel *et al.*, 2017). À cet effet, plusieurs approches ont été développées pour modéliser les risques d'inondation (Di Baldassarre *et al.*, 2010b, Teng *et al.*, 2017). L'évaluation du risque d'inondation et l'élaboration des scénarios pertinents pour la planification sont généralement réalisées à l'aide de modèles hydrologiques et hydrauliques. Cependant, dans de nombreuses régions, comme au Maroc, le manque de données est la principale difficulté pour mettre en œuvre ce type d'approches (Werren *et al.*, 2015).

Les modèles hydrauliques tels que HEC-RAS ou LISFLOOD-FPS sont largement utilisés pour la cartographie des risques d'inondation (Horritt et Bates, 2002 ; Knebl *et al.*, 2005 ; Appel *et al.*, 2006 ; Dutta *et al.*, 2006 ; Di Baldassarre *et al.*, 2010b ; Teng *et al.*, 2017), l'évaluation des dommages causés par les inondations (Mertz *et al.*, 2010) et la prévision des inondations en temps réel (Arduino *et al.*, 2005 ; Teng *et al.*, 2017). Ces modèles numériques sont des outils importants pour comprendre et évaluer les inondations, étant donné la forte dynamique non linéaire des écoulements dans les plaines inondables. Une approche commune consiste à appliquer ces modèles numériques à diverses échelles spatiales avec différentes sources de données topographiques numériques afin de comparer les erreurs du modèle (Jung

*et al.*, 2015 ; Dawod *et al.*-Ghami, 2017). En effet, la cartographie des risques d'inondations nécessite des données précises sur la topographie (Noman *et al.*, 2001 ; Tate *et al.*, 2002 ; Papaioannou *et al.*, 2016) et un Modèle Numérique de Terrain (MNT) réaliste qui constitue un apport essentiel aux modèles hydrauliques (Pereira-Cardenal *et al.*, 2011 ; Musa *et al.*, 2015). La précision des calculs hydrauliques dépend de la qualité du MNT utilisé et des légers changements des niveaux d'eau qui peuvent induire des changements majeurs dans la zone inondée. La résolution spatiale du MNT est le paramètre le plus crucial (Papaioannou *et al.*, 2016), et les caractéristiques de surface, dont généralement les crevasses ou la couche des débris, doivent être identifiées à partir de la résolution du MNT (Kääb, 2002).

### **L'approche géo-morpho climatique :**

De nombreux facteurs influencent la genèse des inondations, tels que la topographie, les pentes, l'intensité des précipitations, la végétation, la lithologie du substratum rocheux, la ramification des cours d'eau ou encore les interventions humaines (Voudouris, 2017). Parfois, la cartographie des risques d'inondation est élaborée en traitant des données d'événements historiques en tenant compte de l'effet interactif de la géomorphologie, de l'élévation et de la couverture végétale (Dewan *et al.*, 2007), ou en utilisant une analyse de décision multicritères (Fernández et Lutz, 2010 ; Wang *et al.*, 2011). D'autres méthodes techniques ont également été appliquées, notamment la simulation hydraulique, l'analyse statistique et les méthodes basées sur des indices ou sur le Système d'Information géographique (Domakinis *et al.*, 2014 ; Tsirolis *et al.*, 2016). Les différentes zones d'un bassin hydrographique sont sujettes aux inondations de différentes manières. Afin de mieux concevoir des mesures de protection, les décideurs et les autorités locales s'appuient sur des études et des évaluations des risques d'inondation. Les principales étapes de la gestion de ces risques sont les mesures de planifications et d'atténuation, les mesures d'intervention et les mesures correctives, respectivement avant, pendant et après les inondations (Nasiri *et al.*, 2016). Outre la simulation à l'aide de modèles hydrauliques, de nombreuses autres méthodes sont généralement utilisées, notamment les méthodes paramétriques, l'analyse statistique et les méthodes hybrides dans un contexte de SIG (Domakinis *et al.*, 2014 ; Kazakis *et al.*, 2015 ; Tsirolis *et al.*, 2016). En effet, le SIG a l'avantage, d'intégrer et d'analyser des données provenant de différentes sources. Par exemple, il permet de cartographier le risque d'inondation pour différents scénarios d'utilisation des sols et de croissance urbaine (Correia *et al.* 1999).

L'approche géo-morpho-climatique introduit un indice multicritères (Flood Hazard Index) (FHI) (Kazakis *et al.* 2015) permettant d'évaluer les zones inondables à l'échelle régionale. Une fois cet indice de risque d'inondation défini, une analyse spatiale dans un environnement SIG est appliquée. C'est une méthode développée à l'origine pour résoudre les problèmes de recherche opérationnelle. Selon leurs valeurs de poids, les informations des différents paramètres sont superposées, ce qui permet de cartographier les risques d'inondation. L'exactitude de la méthode a été étayée par une modélisation hydraulique sur le tronçon le plus vulnérable de la vallée de la Rheraya.

Cette approche est appliquée pour la première fois sur un bassin versant marocain. Celui de la Rheraya où des inondations récurrentes sont apparues. La méthode nous a permis d'obtenir un indice de risque d'inondation (FHI) et une carte des inondations correspondante.

➤ **Approche hydro-géomorphologique et diagnostic territorial :**

Si le Maroc connaît de terribles inondations aux effets destructeurs et meurtriers, les études réalisées ne portent souvent que sur la partie physique de ces inondations. Modéliser leur dynamique et prévoir leurs fréquences a souvent été l'ambition des chercheurs qui pourraient négliger la composante géographique des inondations. En conséquence, le diagnostic territorial est rarement abordé et la vulnérabilité des bâtiments et des activités économiques aux inondations, en particulier dans les zones rurales, est mal documentée. La vulnérabilité repose non seulement sur un modèle conceptuel, mais est également évaluée sur la base d'un diagnostic de terrain. L'approche évaluative faisait initialement référence à un niveau de dommage (Leone *et al.*, 1996) est en train de devenir une approche systémique (Beccera, 2012). Pour cela, cet axe a l'ambition d'établir un diagnostic de vulnérabilité dans la vallée touristique de l'Ourika à l'aide d'une approche hydro-géomorphologique et une analyse multicritère du terrain. Ceci a permis de définir l'enveloppe spatiale des enjeux exposés ainsi que le degré de vulnérabilité de la population et du bâti en cas de crue. Une analyse de fréquentation humaine de la vallée a été réalisée. Elle nous a permis de calibrer un modèle d'évacuation vers des zones de refuges potentielles. Ceci en suivant des itinéraires qu'il conviendrait d'optimiser en fonction des volumes de personnes à évacuer et des contraintes du réseau-relief. Ils serviront également de support d'aide à la décision pour aménager ou afficher sur le terrain les zones à risque et les zones de mise en sécurité.

La structure du manuscrit est ainsi organisée en trois grandes parties :

- Une première partie consacrée à la description du cadre général, globalement du bassin de Tensift et particulièrement des bassins versants de l'Ourika et de la Rheraya.
- La deuxième partie porte sur la typologie des crues des bassins versants et la cartographie des zones inondables. Ce travail est réalisé en utilisant la modélisation hydraulique à l'aide de différentes résolutions du MNT : ASTER 30m et Pléiades 4m. Ceci en plus de l'approche géo-morpho-climatique, appliquée sur le bassin versant de la Rheraya et qui valide les résultats de la modélisation hydraulique.
- La troisième et dernière partie concerne le diagnostic territorial de la vallée de l'Ourika et l'application de l'approche hydro-géomorphologique. Ceci permettra la proposition de plans d'évacuations et des zones de refuges en cas de crue.

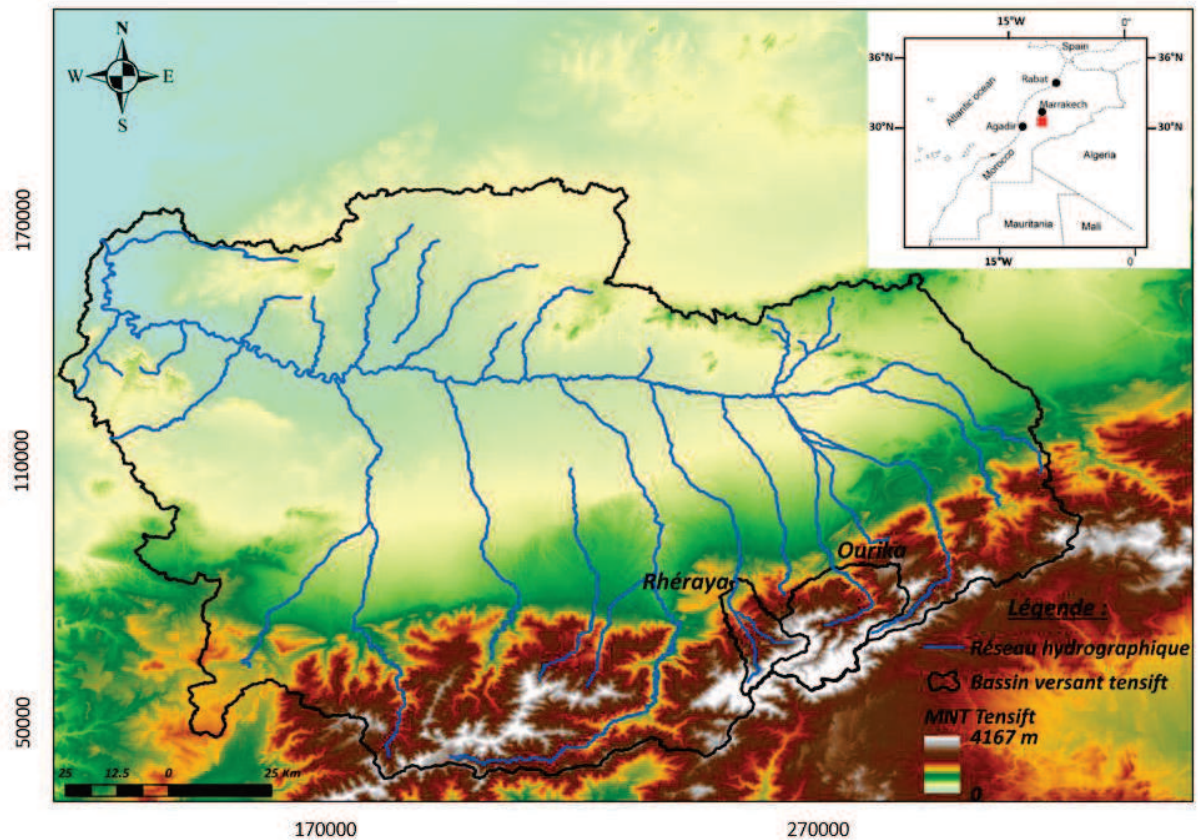
# **Chapitre I : caractéristiques physio-géographiques et géologiques des bassins versants**

Situé à l'extrémité nord-ouest de l'Afrique, le Maroc s'ouvre à la fois sur l'Atlantique et sur la Méditerranée. Il s'étend du détroit de Gibraltar jusqu'aux confins sud du grand Sahara africain. Le pays est caractérisé par un relief de hautes chaînes montagneuses où de nombreux massifs dépassent 3000 mètres par rapport au niveau de la mer. Ces chaînes montagneuses séparent de vastes régions qui correspondent à des zones climatiques très différenciées.

Cette première partie est consacrée à une description générale du bassin versant de Tensift et plus précisément les sous-bassins versants de l'Ourika et de la Rheraya afin de décrire les aspects géographiques, physiographiques et géologiques, qui représentent des informations essentielles à la compréhension des mécanismes hydrologiques. En effet la pente, l'altitude et la forme d'un bassin versant ainsi que sa géologie et sa lithologie renseignent sur le type de réponse hydrologique relatif à ce bassin versant.

## **I. Situation géographique de l'aire d'étude et délimitation des bassins versants**

Situé au centre ouest du Maroc, le bassin versant de Tensift occupe une superficie totale de 20 380 km<sup>2</sup>. Ce large domaine est situé entre les latitudes 30° 50' et 32° 10' Nord et les longitudes 7°25' et 9°25' Ouest (Fig. 1). Administrativement l'oued Tensift côtoie au Nord-Est la province d'El kelâat Sraghna, à l'Est celle de'Azilal, au Sud-Est celle d'Ouarzazate, au Sud celle de Taroudannt, au Sud-Ouest les provinces d'Essaouira et au Nord-Ouest celle de Safi. Il s'écoule d'est en ouest et se déverse dans l'océan Atlantique. Les altitudes très différentes varient de 0 m à l'embouchure en allant jusqu'à 4167 m à Jbel Toubkal.



**Figure 1: Situation géographique du bassin versant de Tensift avec délimitation des sous-bassins versants d’Ourika et Rheraya. (O. Bennani)**

Ce bassin versant au sens large est subdivisé en 3 domaines distincts :

- Le Haut Atlas, zone de montagne formant les plus hauts reliefs du royaume avec comme point culminant, le Jbel Toubkal ;
- La zone de plaine (Haouz, Mejjat et Bousbaa), allongée d’est en ouest et large d’environ 40 km ;
- Le Jbilet, formé de montagnes de faibles altitudes, qui émergent au nord de la plaine de l’Haouz.

La variabilité spatiale des altitudes au sein du bassin a une influence considérable sur les caractéristiques météorologiques (précipitations, températures, etc.) et conditionne donc l’écoulement des eaux de surface qui impactent directement les débits de crues des oueds. Le bassin versant de Tensift est caractérisé par un climat semi-aride, influencé par le courant froid des Canaries dans la zone côtière, un climat semi-aride chaud dans les Jbilet et continental aride dans l’Haouz et le Mejjate. Quant aux reliefs du Haut Atlas, ils se distinguent par un climat plus frais et plus pluvieux. L’aridité marquante du bassin est conditionnée essentiellement par la latitude présaharienne et en une moindre mesure par la

continentalité. Par ailleurs, le contraste saisonnier est très marqué, les pluies qui sont généralement importantes durant la période automnale et hivernale, sont irrégulières, intenses et violentes. La sécheresse prend après une ampleur considérable surtout dans les zones de plaine où les températures sont habituellement élevées en été. Les précipitations sont généralement faibles et caractérisées par une grande variabilité spatio-temporelle. La pluviométrie moyenne annuelle est de l'ordre de 250 mm à Marrakech et peut atteindre entre 500 et 600 mm sur les reliefs du Haut Atlas.

L'alimentation du bassin de Tensift est assurée en grande partie par la partie montagneuse des oueds qui drainent le versant nord de l'Atlas grâce à leurs hautes altitudes, leurs pentes et la nature des sols. Du fait de l'existence du grand contraste entre la montagne et la plaine de l'Haouz, l'hydrologie de la plaine se reporte sur les eaux souterraines, alors que la zone montagneuse constitue la source d'écoulement de surface.

## **II. Caractéristiques du bassin versant de l'Ourika**

### **II.1. Les caractéristiques physiographiques :**

Le bassin versant de l'Ourika est situé au sud-est du grand bassin versant de Tensift, et à 40Km au sud de la ville de Marrakech. Il est localisé entre les latitudes 31° et 31°20' Nord et les longitudes 7°30' et 7°60' Ouest. Il est limité à l'est par le bassin versant de Zât et à l'ouest par celui de la Rheraya. À son exutoire « Aghbalou », le bassin est limité au nord par la plaine de l'Haouz, et au sud par l'axe de la chaîne du Haut Atlas.

D'une superficie de 503 Km<sup>2</sup>, le bassin versant de l'Ourika est connu par ses reliefs élevés. 75% des surfaces du bassin sont localisées entre 1600 et 3200 m (Saidi *et al.* 2010) (Fig. 2). Au niveau du cours d'eau principal, les pentes sont comprises entre 0% et 5%. En outre elles augmentent en allant du Nord au Sud (Fig. 3).



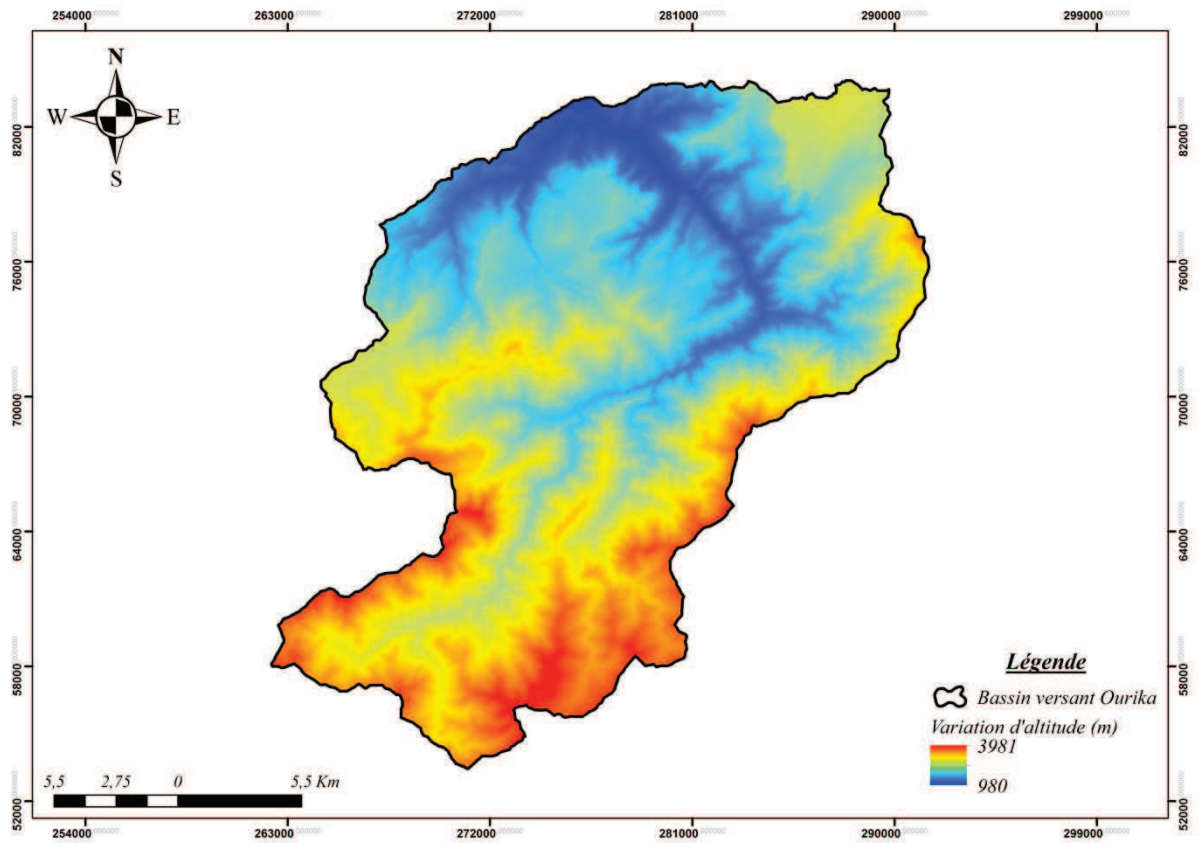


Figure 2: Variation des altitudes dans le sous bassin versant de l'Ourika (O. Bennani)

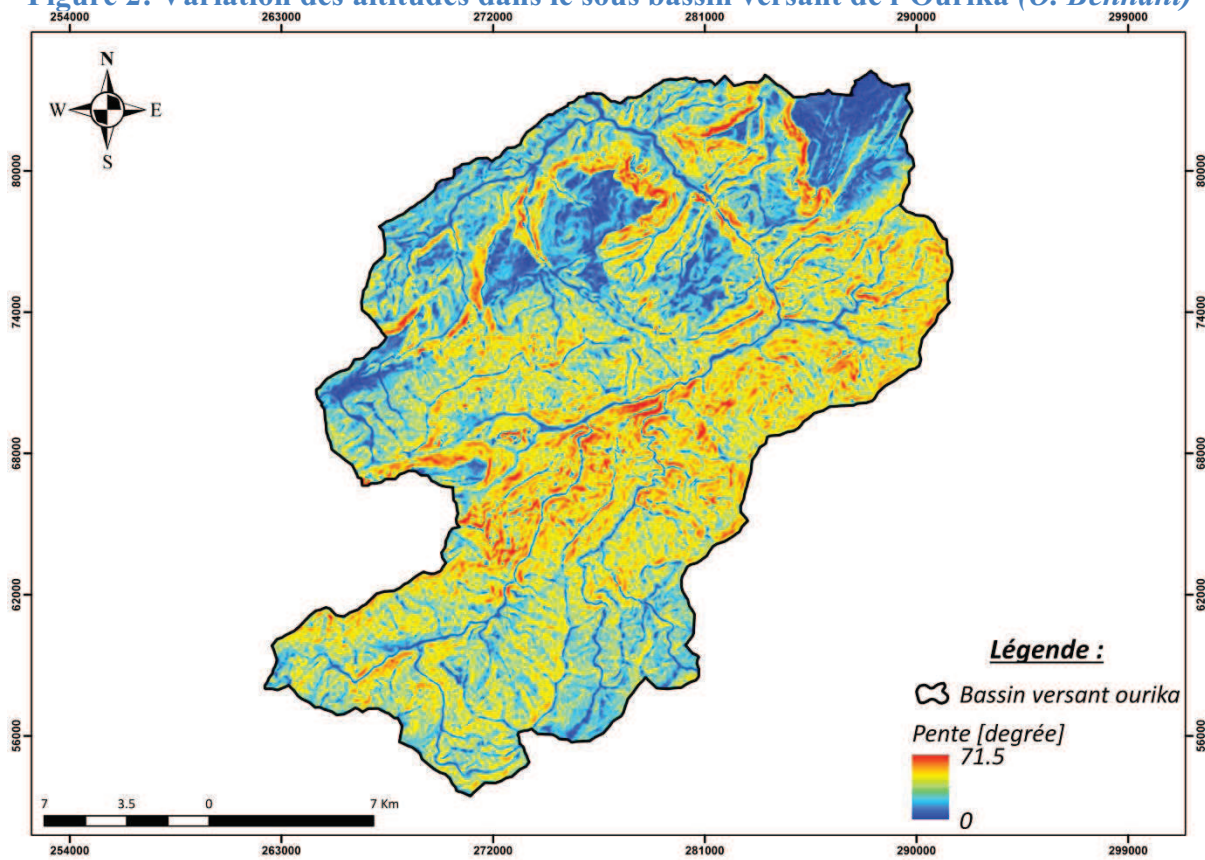


Figure 3: Carte des pentes dans le sous bassin versant de l'Ourika (O. Bennani)

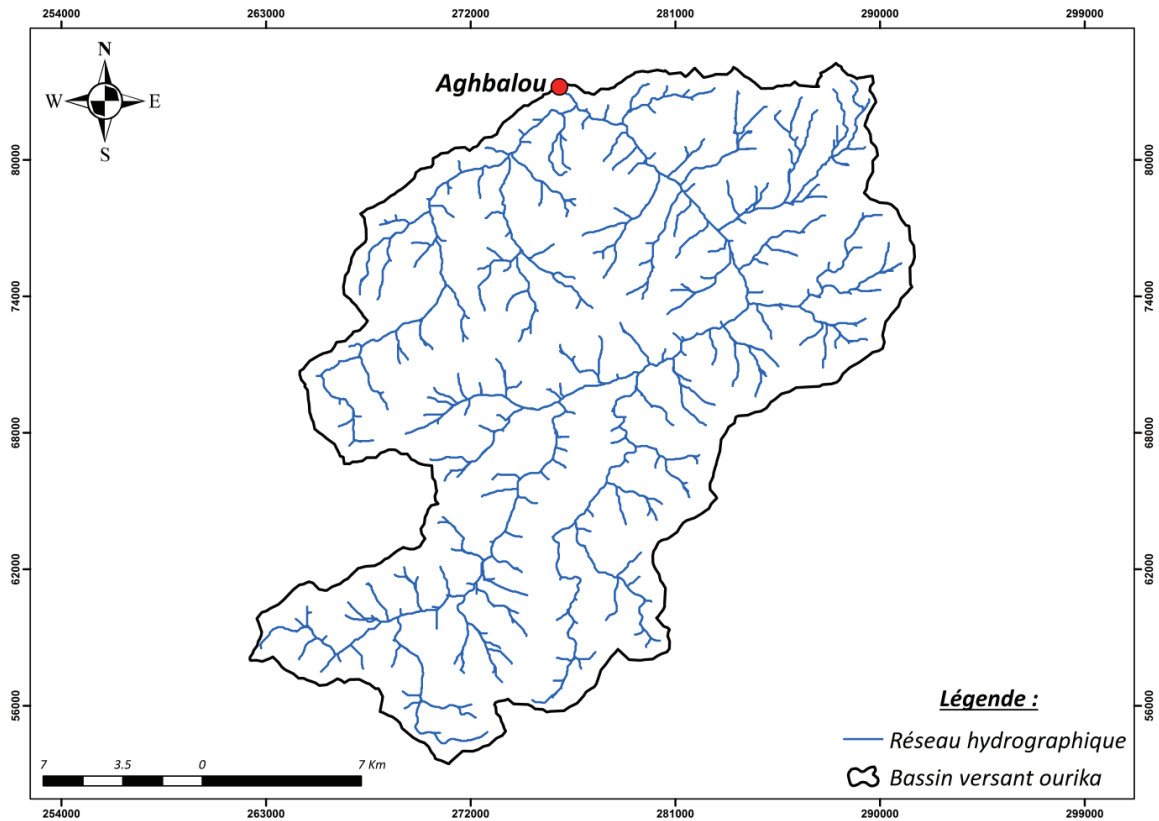
Les caractéristiques du sous-bassin versant d'Ourika sont présentées dans le tableau suivant :

**Tableau 1: Caractéristiques du sous bassin versant d'Ourika**

| Bassin versant | Surface (Km <sup>2</sup> ) | Périmètre (Km) | Altitude Max. (m) | Altitude Min. (m) | Altitude Moyenne (m) | Pente Moyenne | Indice de compacité |
|----------------|----------------------------|----------------|-------------------|-------------------|----------------------|---------------|---------------------|
| Ourika         | 503                        | 104            | 3981              | 980               | 2500                 | 19.9°         | 1.3                 |

L'Oued de l'Ourika fait partie de la zone la plus menacée du bassin du Tensift vu que cette partie du bassin est la plus active. Les pentes y sont fortes en amont et la pluviométrie est relativement importante. Le réseau hydrographique de ce bassin est bien développé dans la partie amont du fait de l'imperméabilité du socle précambrien (Gneiss, granites, granodiorites...), du couvert végétal restreint et du relief très accidenté. Alors que dans la partie aval, le réseau est moins développé par la présence des terrains moins résistants et peu perméables, avec un relief plus ou moins modéré et un couvert végétal plus abondant que celui de l'amont.

Pour le bassin versant de l'Ourika, la densité de drainage est égale à 1,7 km/km<sup>2</sup>, ce qui témoigne d'une hiérarchisation importante du réseau hydrographique qui va permettre une collecte efficace des eaux de ruissellement et qui pourrait accentuer la brutalité des crues (Fig. 4).



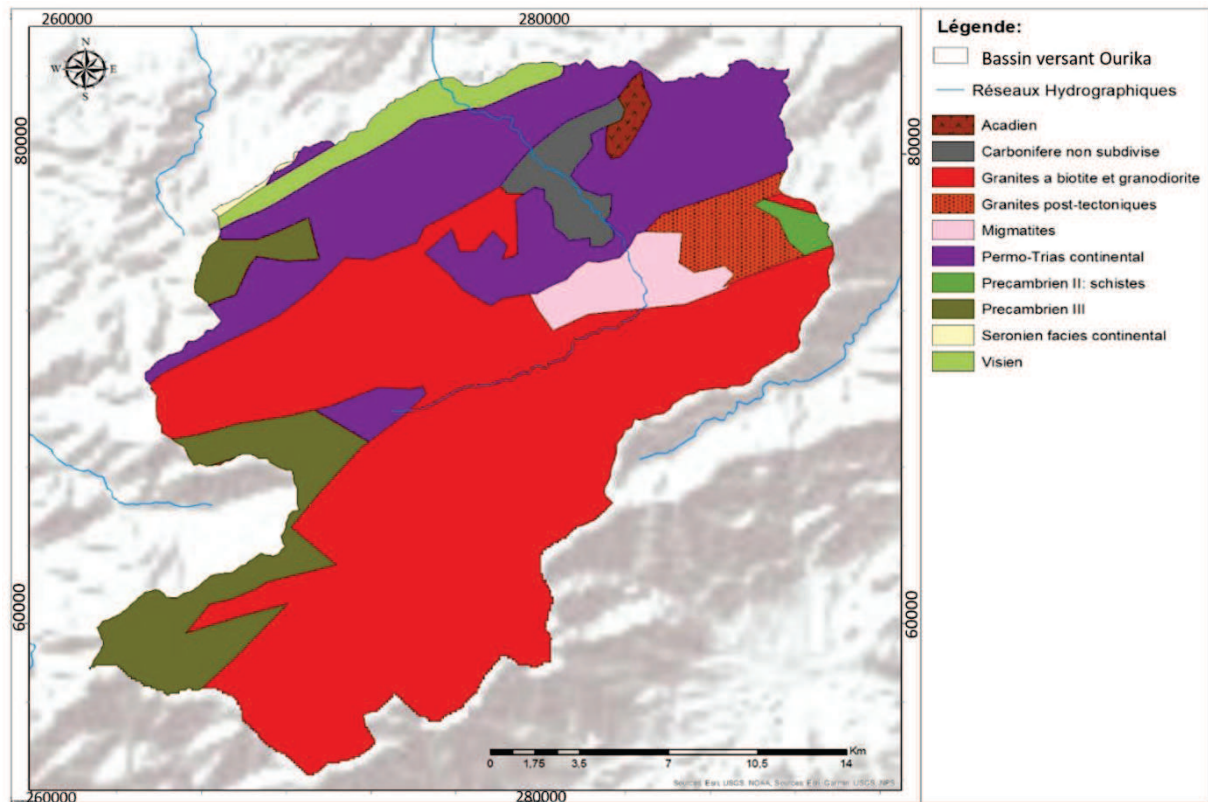
**Figure 4: Réseau hydrographique du sous bassin de l'Ourika (O. Bennani)**

## II.2. Caractéristiques géologiques :

Le bassin versant de l'Ourika est l'un des bassins de la chaîne atlasique (Haut Atlas de Marrakech). Celle-ci s'étendant depuis l'océan atlantique à l'Ouest jusqu'en Tunisie à l'Est. C'est une chaîne intracratonique typique, sensiblement allongée selon une direction ENE-WSW.

Sur le plan géologique, le bassin versant de l'Ourika offre 2 grands types de faciès (Fig. 5) :

- Une partie amont : située à des altitudes supérieures à 2000 m constitués de roches magmatiques et métamorphiques qui constituent le socle de la chaîne atlasique. On y rencontre des roches plutoniques (notamment des granites et granodiorites), des roches volcaniques (andésites, rhyolites ...) et des faciès métamorphiques (gneiss et migmatites).
- Une partie aval : située à des altitudes inférieures à 2000 m, composée des dépôts permotriasiques et quaternaires plus tendres. La lithologie du permotrias est composée d'un faciès Nord Sub-atlasique formé de conglomérats, grés et siltites, et d'un faciès Sud du haut plateau, formé essentiellement de siltites argileuses et localement des grés massifs (Biron, 1982).



**Figure 5: Géologie du sous bassin versant de l'Ourika (O. Bennani)**

La lithologie du bassin versant est dans l'ensemble assez imperméable. Selon les chiffres de l'agence du bassin hydraulique de Tensift (ABHT), 6% des sols sont perméables, 39% semi-perméables et 55% imperméables. Cette lithologie fait croître les risques d'inondations, en favorisant les eaux de ruissellement mobilisées par les cours d'eau principaux et le développement d'importantes crues.

### **II.3. Occupation du sol :**

Le bassin versant de l'Ourika s'inscrit dans un contexte fortement rural. L'occupation des sols reflète l'appropriation de la vallée et son aménagement par l'homme dans une région où l'activité agricole reste faible. Ceci à cause des terrains accidentés avec des reliefs imposants et des formations lithologiques cristallines qui affleurent sur une grande partie du bassin. La végétation est limitée à quelques secteurs sous forme de forêts, essentiellement des chênes verts et des vergers de pommiers et de noyers colonisant les terrasses alluviales le long de la vallée (Fig. 6,7).

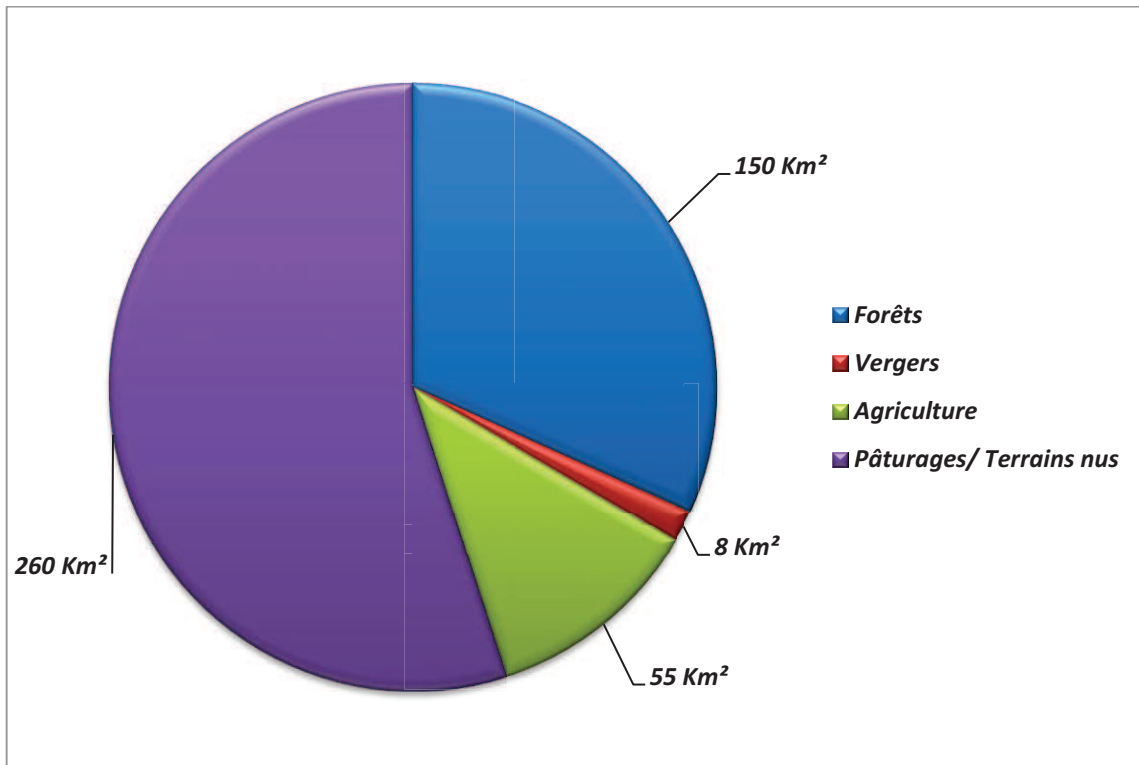


Figure 6: Répartition des terrains dans le sous bassin versant de l'Ourika

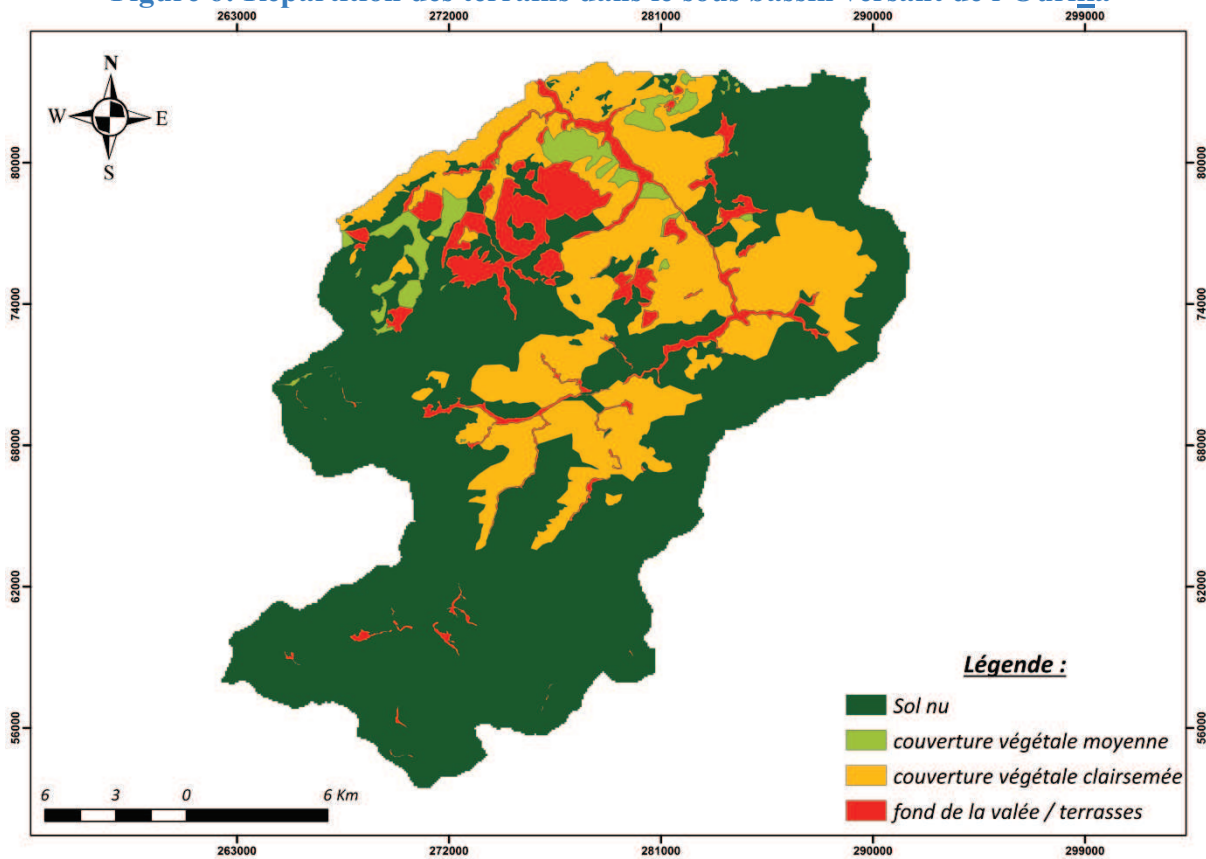


Figure 7: Occupation du sol du sous bassin versant de l'Ourika (O. Bennani)

#### **II.4. Climatologie générale :**

Le bassin versant d'Ourika est caractérisé par un climat très différencié d'une zone à l'autre. Plusieurs indices d'aridité placent la vallée en zone semi-aride à tendance sub humide, où interfèrent les influences océaniques, continentales et montagneuses. Les précipitations au niveau de cette zone sont souvent de type convectif en été et caractérisé par de courtes durées, une forte intensité et une hétérogénéité spatiale. Le climat est par ailleurs influencé par l'existence des vents secs et chauds (Saidi *et al.*, 2006).

La région est en effet caractérisée par une variabilité spatiotemporelle des précipitations et une irrégularité relative des écoulements superficiels. Ces précipitations varient en termes de hauteur, d'intensité et de distribution géographique. La pluviosité annuelle est en moyenne de 532 mm par an à la station d'Aghbalou. Cette pluviométrie augmente avec l'altitude, elle peut dépasser 600 mm par an sur les hauts sommets du bassin. Les pluies mensuelles montrent également l'existence de deux saisons nettement différenciées, une saison humide allant d'octobre à avril où intervient la quasi-totalité des épisodes pluvieux, et une saison sèche allant de mai à septembre avec seulement 5 à 15% de la pluviométrie annuelle.

Selon l'Agence du Bassin Hydraulique de Tensift (ABHT), la température moyenne dans la vallée de l'Ourika fluctue à l'échelle annuelle, entre 15,9 °C et 20,3 °C. La moyenne étant de 18°C. À l'échelle mensuelle les mois de juin, juillet et août connaissent les plus hautes températures de l'année avec respectivement des valeurs moyennes de 21°C, 27°C et 26°C. Quant à l'évaporation moyenne annuelle, elle varie de 1800 mm sur le versant atlasique à 2600 mm dans la plaine de l'Haouz. Elle est minimale pendant le mois de janvier et maximale en été.

### **III. Caractéristiques du bassin versant de la Rheraya**

#### **III.1. Caractéristiques physiographiques :**

Le sous bassin versant de la Rheraya est localisé dans le Haut Atlas occidental à une quarantaine de kilomètres au sud de la ville de Marrakech entre les latitudes 31° 5' et 31°, et les parallèles 7° 50' et 8°. Il prend sa source au sommet de Toubkal et est limité au Nord par la plaine de l'Haouz, au Sud par le bassin de Tifnout (Haut Souss), à l'Est par le bassin de l'Ourika, et à l'Ouest par le bassin de N'fis. Le bassin versant de la Rheraya occupe une surface de 225 Km<sup>2</sup> et est caractérisé par une variation altitudinale importante comprise entre 1052 m et 4167 m et ayant comme altitude moyenne 2160 m (Fig. 8). Son exutoire est défini

par la station hydrométrique de Tahanaout. Quant aux pentes, elles varient de  $0^\circ$  sur les terrasses aménagées sur les lits de l'Oued, jusqu'à  $86^\circ$  sur les versants en amont (Fig. 9).

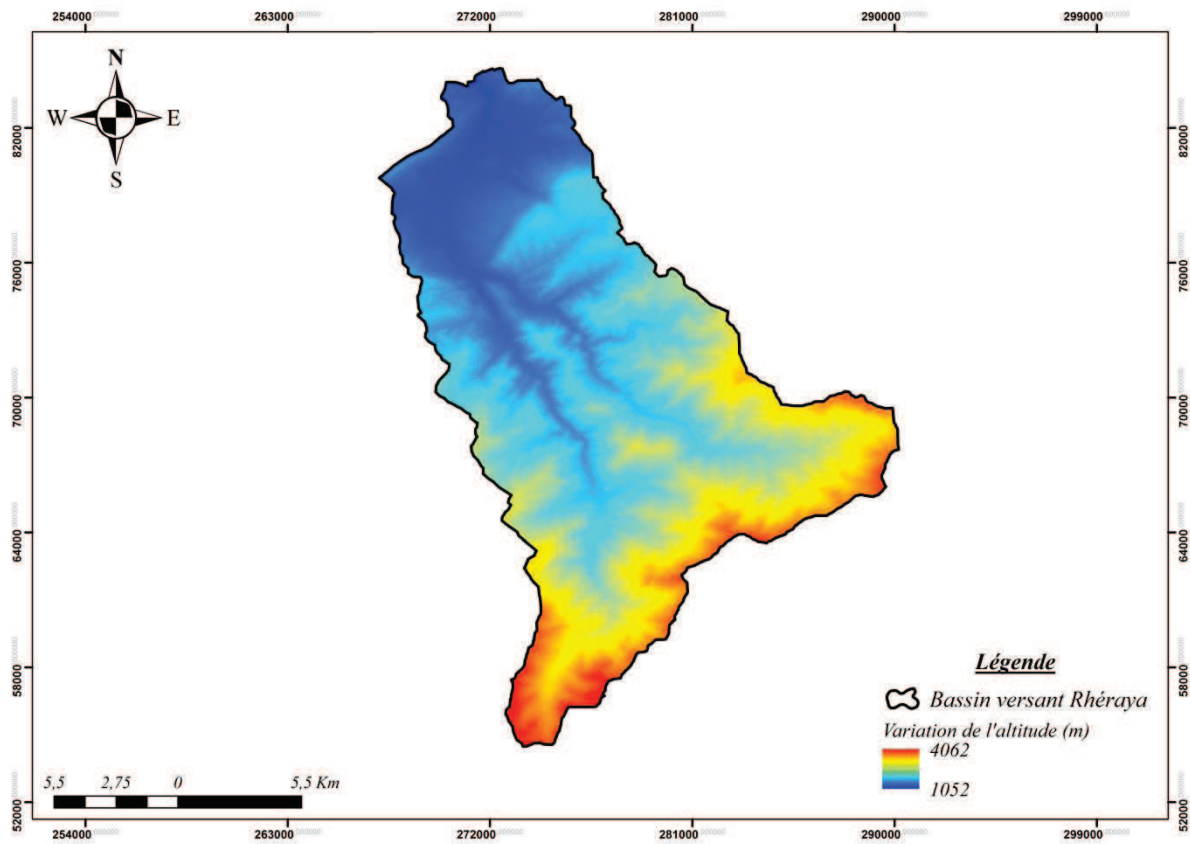
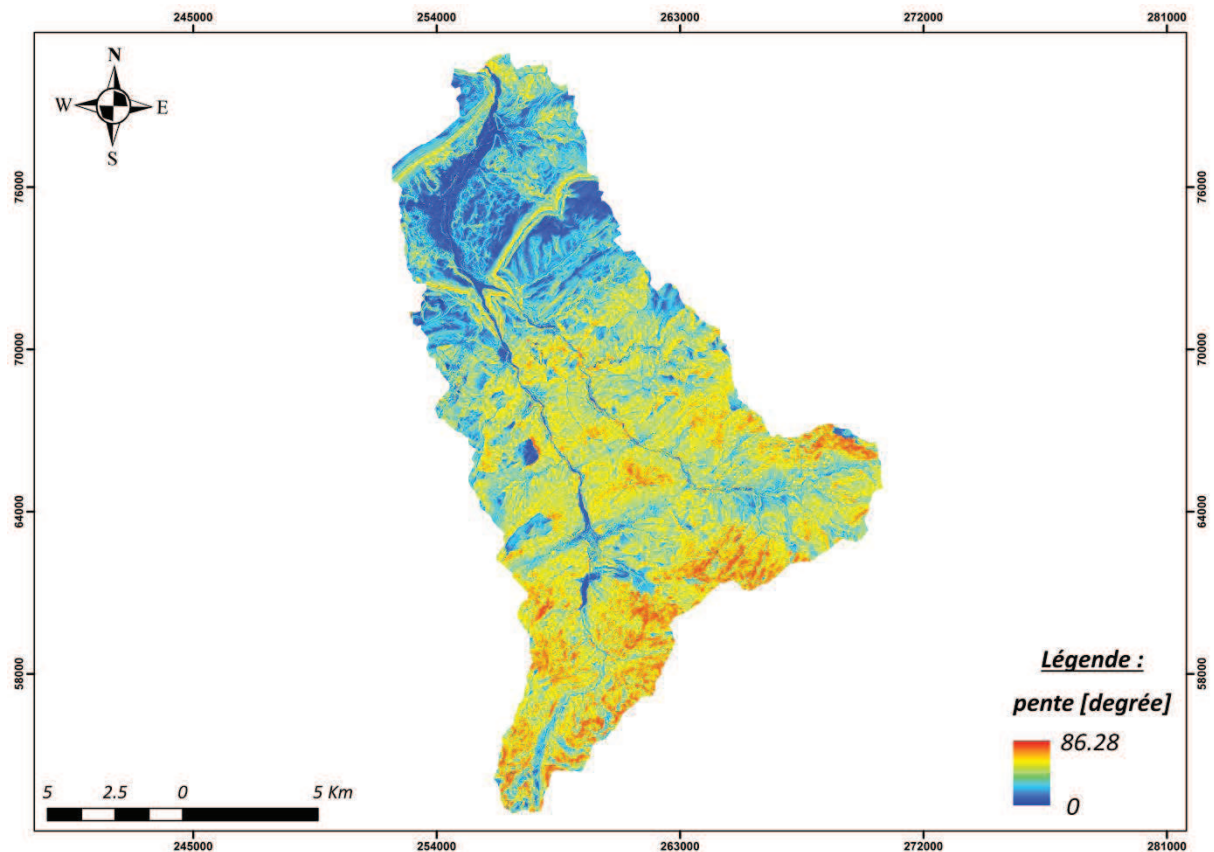


Figure 8 : Variation des altitudes dans le sous bassin versant de la Rheraya (O.Bennani)



**Figure 9 : Carte des pentes dans le sous bassin versant de la Rheraya (O. Bennani)**

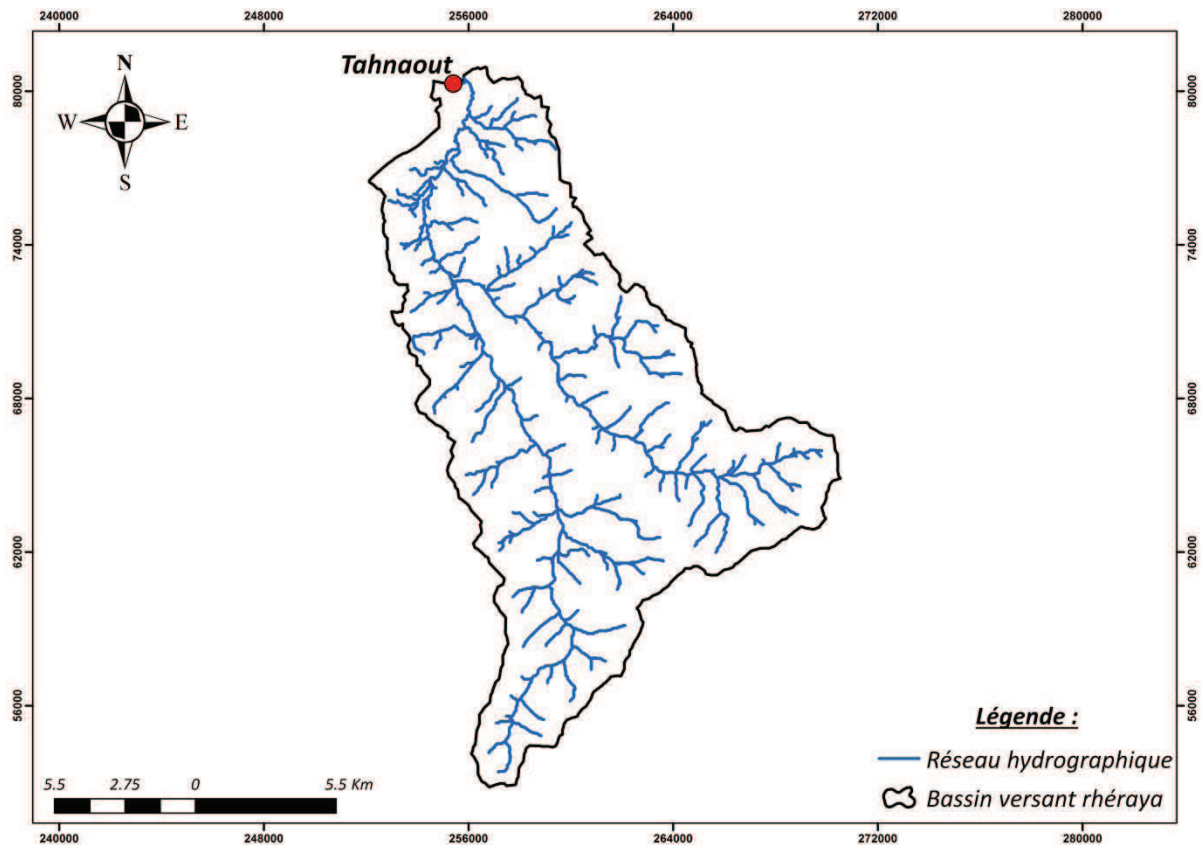
Les caractéristiques du sous bassin versant sont présentées dans le tableau suivant:

**Tableau 2: Caractéristiques du sous-bassin versant de la Rheraya**

| Bassin versant | Surface (Km <sup>2</sup> ) | Périmètre (Km) | Altitude Max. (m) | Altitude Min. (m) | Altitude Moyenne (m) | Pente Moyenne | Indice de compacité |
|----------------|----------------------------|----------------|-------------------|-------------------|----------------------|---------------|---------------------|
| Rheraya        | 225                        | 78             | 4167              | 1052              | 2160                 | 19.1°         | 1.6                 |

Sur le plan hydrographique, le bassin versant de la Rheraya est caractérisé par un réseau bien ramifié surtout en amont du bassin. L'Oued est composé par la confluence d'Assif Imennane et Assif N'ait Mizaine qui prend naissance dans le Haut Atlas à environ 3600 m d'altitude (Fig. 10).



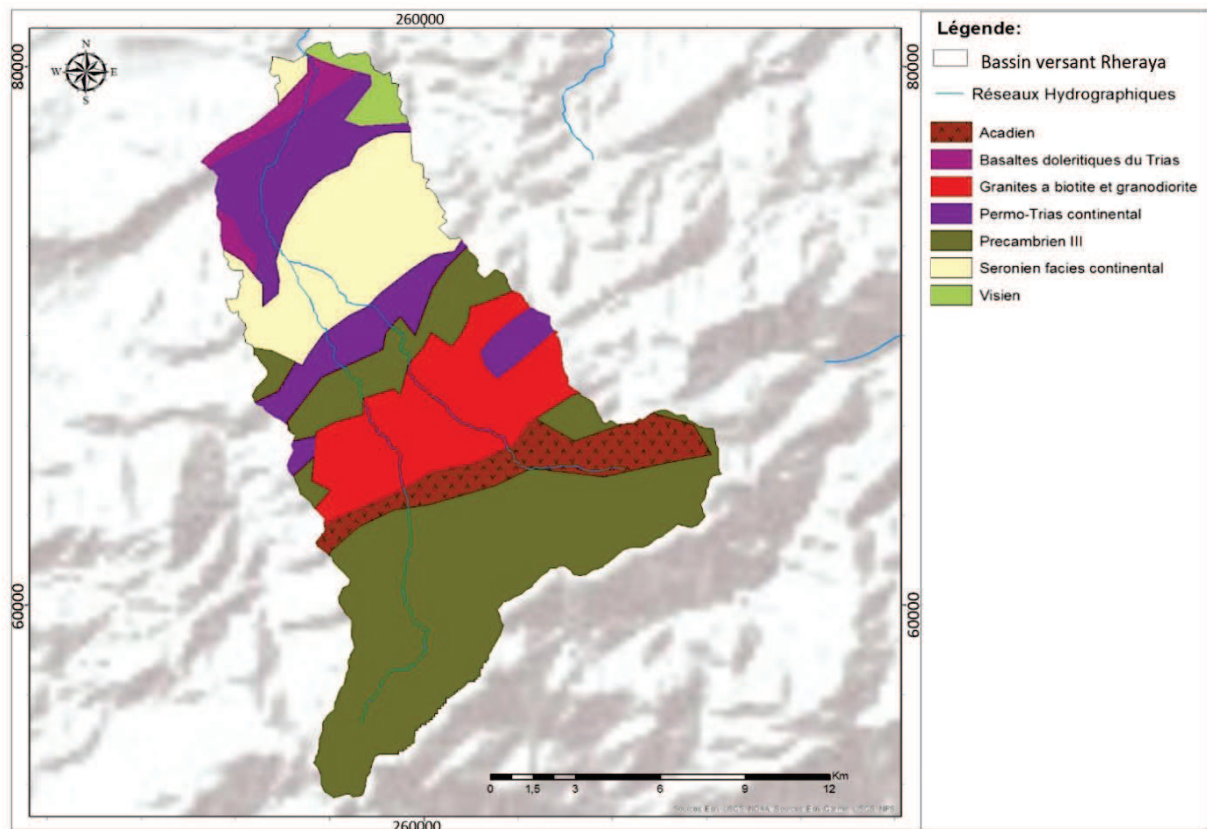


**Figure 10: Réseau hydrographique du sous bassin versant de la Rheraya (O. Bennani)**

### III.2. Caractéristiques géologiques :

La géologie de la zone de la Rheraya est fortement influencée par une série d'accidents activés au cours des différentes phases orogéniques. Leurs effets sur la géomorphologie permettent aux auteurs tels que Dresch et Proust (Dresch, 1941 ; Proust, 1973) de distinguer une série de zones longitudinales du nord au Sud, dont la zone sub-atlasique (cheggour, 2008). Cette zone sub-atlasique couvre le tiers nord du bassin et est composée d'un socle rigide précambrien et paléozoïque grés-schisteux et calcaire. Sur ce socle, une importante couverture mésozoïque au faciès détritique rouge fait de conglomérats, grés et siltstones du Trias est encore présente. Plus au sud, le horst de Rheraya est composé de matériaux rocheux primaires et permotriasiques. Il constitue un bloc élevé par rapport à la zone sub-atlasique et incliné vers l'Ouest. Les matériaux permotriasiques peuvent être observés au niveau des deux branches du Y que forme le bassin : les vallées d'Imlil et d'Imennane sont constituées de dépôts (Basaltes doléritiques) reposant sur une surface ante-permotriasique fossilisée (Conglomérats et Grés). Dans l'ensemble, les faciès rencontrés correspondent à des calcaires et marnes de l'éocène reposant sur une barre de calcaire Turonien. Les roches dominantes sont les schistes compacts durs (Fig. 11).

La lithologie globale laisse supposer que les sols sont peu perméables. L'ABHT chiffre les sols perméables à 26%, 15% de sols semi-perméables et 59% de sols imperméables.



**Figure 11: Géologie du sous bassin versant de la Rheraya (O. Bennani)**

### **III.3. Occupation du sol :**

La végétation naturelle au niveau du bassin versant de la Rheraya est constituée essentiellement de prairies et de forêts naturelles. La végétation des basses altitudes au nord du bassin est caractérisée principalement par des formations arborées (Thuya, chêne vert et genévrier rouge) et laisse place à des chaméphytes épineux en altitude. La distribution spatiale de ces formations est due essentiellement à l'effet de l'exposition ainsi qu'à la nature du sol. L'état clairsemé de ces formations laisse deviner l'impact des actions anthropiques (coupes de bois vif, pâturage, carbonisation et labour).

On retrouve les cultures irriguées le long des deux bras du bassin de Rheraya alors que les cultures à sec sont souvent observées de part et d'autre de l'Oued dans les basses altitudes (Fig. 12,13).

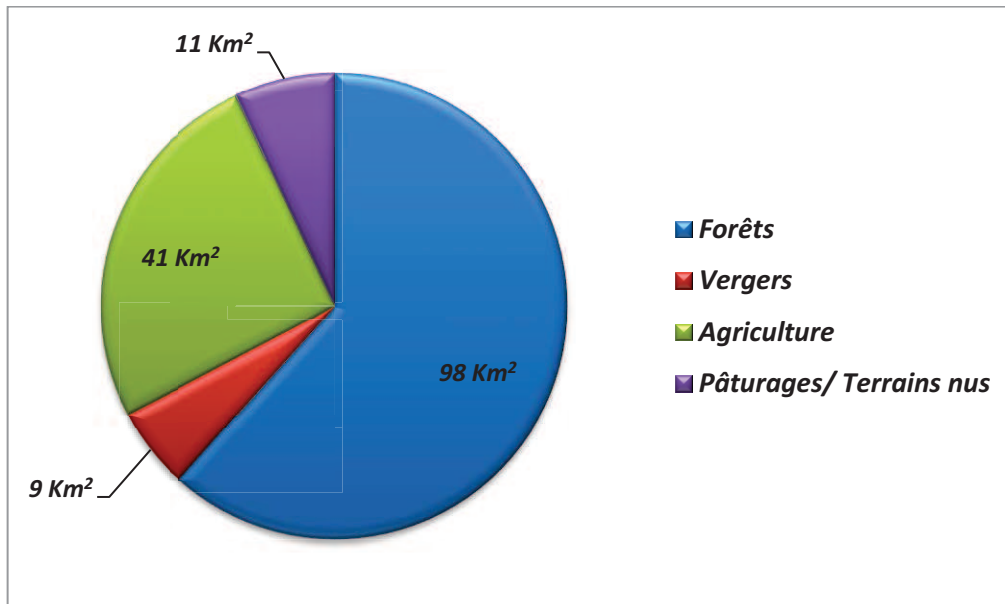


Figure 12: Répartition des terrains dans le sous bassin versant de la Rheraya

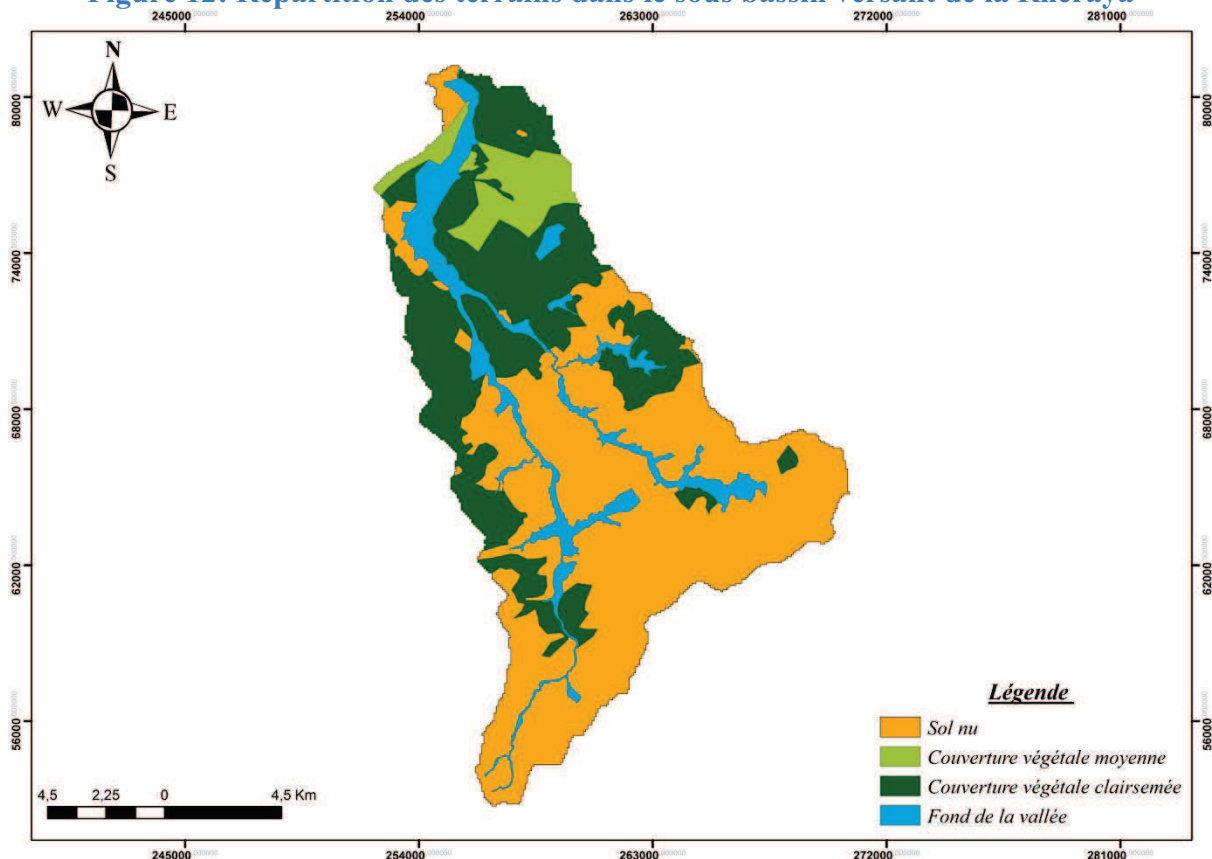


Figure 13: Occupation du sol du sous bassin versant de la Rheraya (O. Bennani)

#### III.4. Climatologie générale :

Globalement le climat est semi-aride et montagneux par endroit. La Rheraya est à la fois pentue et arrosée, aussi elle est caractérisée par un régime nival prononcé. La variation des altitudes dans ce bassin joue un rôle capital dans la répartition des précipitations.

La température moyenne du bassin est prise au niveau du barrage de Lala Takerkoust (18°C), tout comme la hauteur moyenne annuelle évaporée (1834 mm).

#### **IV. Conclusion sur la physio-géographie et la géologie de la région d'étude :**

L'analyse des différents paramètres physiques et géomorphologiques permettra une meilleure compréhension des variations des régimes pluviométriques et hydrologiques des sous-bassins versants étudiés et par conséquent leur contribution dans la genèse des crues. Leur interaction avec le climat détermine en effet la variabilité des phénomènes hydrologiques dans le temps et dans l'espace.

## **Chapitre II : hydro-pluviométrie et analyse des régimes**

Après avoir analysé le contexte géographique et géologique, nous allons procéder à l'analyse des données hydro-pluviométriques et de leur variabilité. Mais force est d'admettre qu'au niveau des régions montagneuses, la difficulté d'accès, les reliefs importants ainsi que les conditions climatiques éprouvantes représentent des contraintes empêchant l'installation et le bon entretien des stations de mesure, chose qui influence la qualité ainsi que la disponibilité des données.

### **I. Acquisition et analyse des données**

Les données nécessaires à la réalisation de l'étude hydro-pluviométrique relative aux sous-bassins versants de l'Ourika et de la Rheraya ont été fournies par l'ABHT. En effet au niveau de l'exutoire des deux bassins, les stations d'Aghbalou et de Tahanaout représentent des stations pourvues de séries temporelles significatives pour une bonne présentation de l'évolution des précipitations sur les bassins.

Ces stations sont équipées d'un pluviomètre, d'un pluviographe, d'une échelle limnimétrique, d'un limnigraphe ; en plus d'un équipement de télémessure (Fig.14). Ils permettent ainsi de relever quotidiennement les pluies que connaissent les bassins, ainsi que les hauteurs d'eau qui sont relevées à intervalle de temps rapproché. Ces hauteurs d'eau sont converties en débit à l'aide de courbes de tarages élaborées lors des jaugeages périodiques. Pour ces stations, nous avons travaillé avec une série de données étalées sur une période de 47 ans : de 1970/71 à 2016/17.



**Figure 14: Station hydrologique de Tahanaout (Rheraya) (photo T.Ruf).**

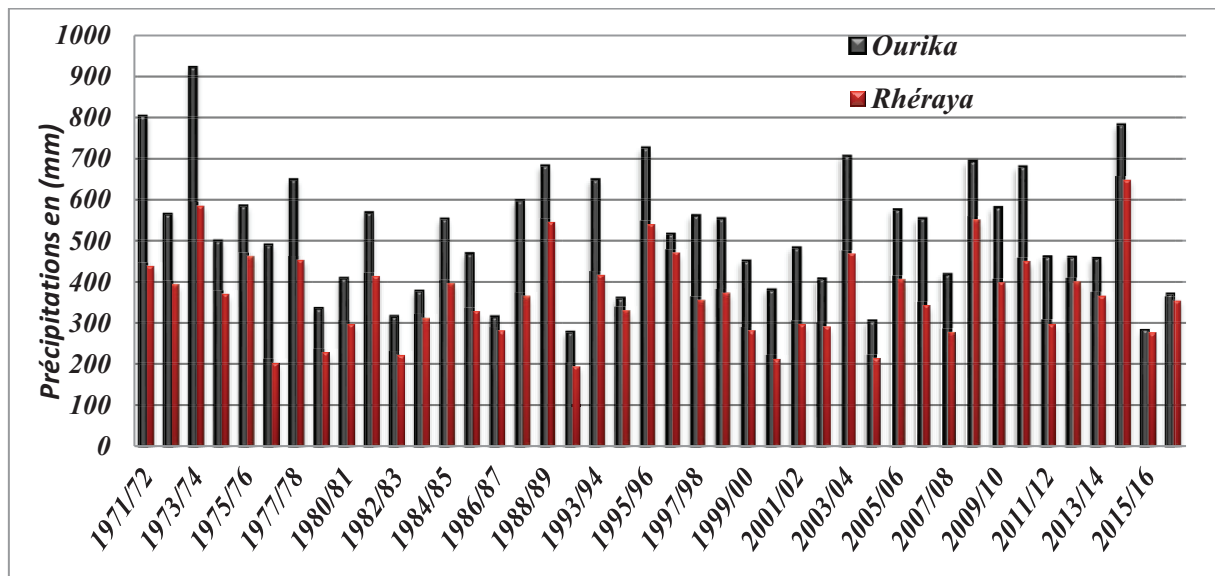
## **II. Variation temporelle des précipitations dans les bassins versants de l'Ourika et de la Rheraya :**

La répartition moyenne des pluies mensuelles mesurées au niveau des stations d'Aghbalou et de Tahanaout montre l'existence de deux périodes caractéristiques :

- ✓ Une saison humide allant du mois d'octobre à avril, où intervient la quasi-totalité des épisodes pluvieux, soit plus de 80% de la pluviométrie annuelle ;
- ✓ Une saison sèche allant de mai à septembre avec moins de 20% de la pluviométrie annuelle.

### **II.1. Variation annuelle :**

À l'échelle annuelle et interannuelle, nous avons analysé comparativement la variabilité des précipitations aux stations d'Aghbalou et de Tahanaout (fig. 15).

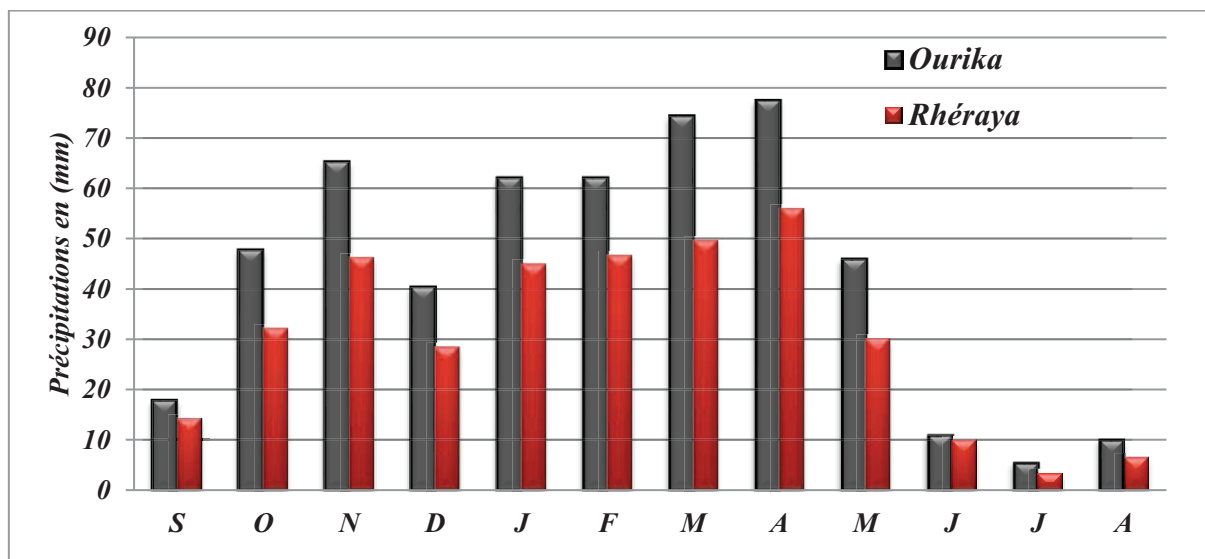


**Figure 15: Pluviométrie annuelle dans les stations d’Aghbalou (Ourika) et de Tahanaout (Rheraya) entre 1970/71 et 2016/17**

L’étude de ces modules pluviométriques annuels montre une variation temporelle des précipitations avec une alternance d’années humides et d’années sèches. On note une irrégularité des pluies, avec à Aghbalou un maximum de 921 mm enregistré en 1973-1974 et un minimum de 277 mm en 1992-1993. Tandis qu’au niveau du bassin versant de la Rheraya, le maximum enregistré à Tahanaout est de 648 mm en 2014/2015 et la valeur minimale est de 192 mm en 1992/1993. Les hauteurs annuelles sont toujours plus importantes à Aghbalou qu’à Tahanaout en raison d’une plus haute altitude à Aghbalou et probablement une meilleure exposition.

## II.2. Variation mensuelle :

L’étude de la variabilité des précipitations moyennes l’échelle mensuelle, nous permettra de cerner la variabilité à l’intérieure de l’année hydrologique et de dégager le type de régime pluviométrique (fig. 16).

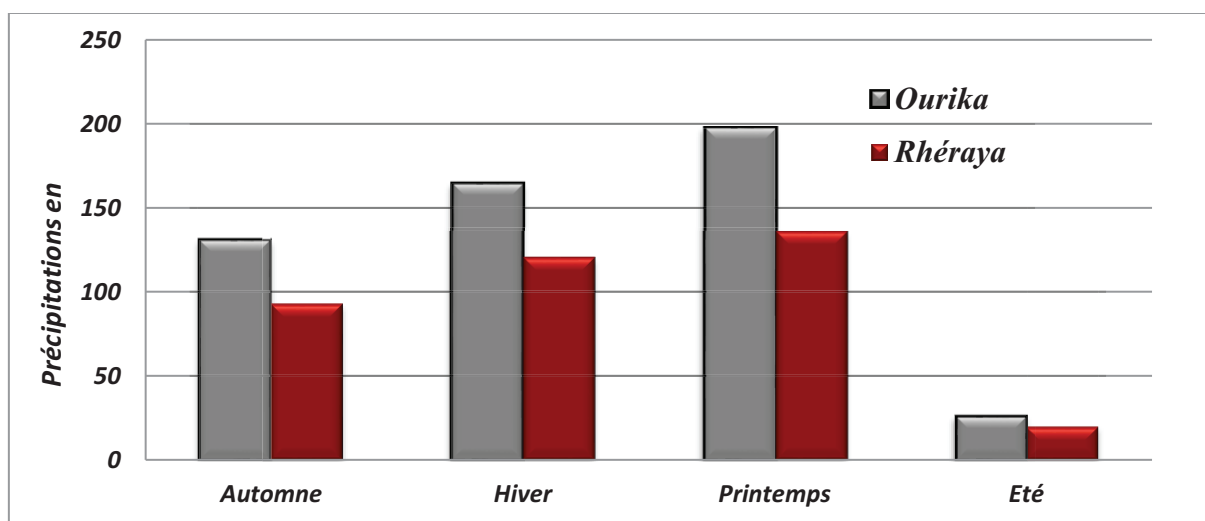


**Figure 16: Pluviométrie moyenne mensuelle dans les stations d'Aghbalou (Ourika) et de Tahanaout (Rheraya) entre 1970/71 et 2016/17.**

L'analyse de ces précipitations moyennes mensuelles montre une variation irrégulière par rapport aux mois de l'année. Les mois de mars et d'avril sont les plus pluvieux, tandis que les mois de juin, juillet et août sont les mois les plus secs. Néanmoins l'activité orageuse d'été n'est pas totalement absente ; elle se manifeste efficacement à l'amont en haute altitude. Hormis un creux au mois de décembre, la pluviométrie est soutenue pendant les mois d'automne, d'hiver et de printemps, illustrant le schéma classique du régime pluviométrique sud méditerranéen, avec deux périodes très contrastées.

### II.3. Variation saisonnière :

À partir de la variabilité précitée des précipitations moyennes mensuelles, et en raisonnant à l'échelle saisonnière, nous avons relevé la variabilité à cette échelle temporelle (fig. 17).



**Figure 17: Pluviométrie moyenne saisonnière aux stations d'Aghbalou(Ourika) et de Tahanaout (Rheraya) entre 1970/71 et 2016/17.**



Nous remarquons une augmentation progressive des pluies de l'automne (septembre, octobre, novembre) au printemps (mars, avril, mai). Celui-ci représente, sur les deux bassins, la saison la plus pluvieuse. En outre une baisse remarquable de la pluviométrie moyenne est enregistrée en été. Cette saison n'en est pas moins l'une des saisons de déclenchement de crues éclair. L'été 2019 en est un exemple éloquent avec plusieurs cours d'eau en furie en différents endroits du Haut et Anti-Atlas.

### III. Analyse des données de débit des bassins de l'Ourika et de la Rheraya

On s'est basé pour cette partie sur l'analyse des séries de données débitométriques enregistrées au niveau des stations d'Aghbalou et de Tahanaout située à l'exutoire des sous-bassins versants de l'Ourika et de la Rheraya. Ces mesures sont fournies par l'ABHT pour une période de 47 ans.

#### III.1. Variation des débits max annuels

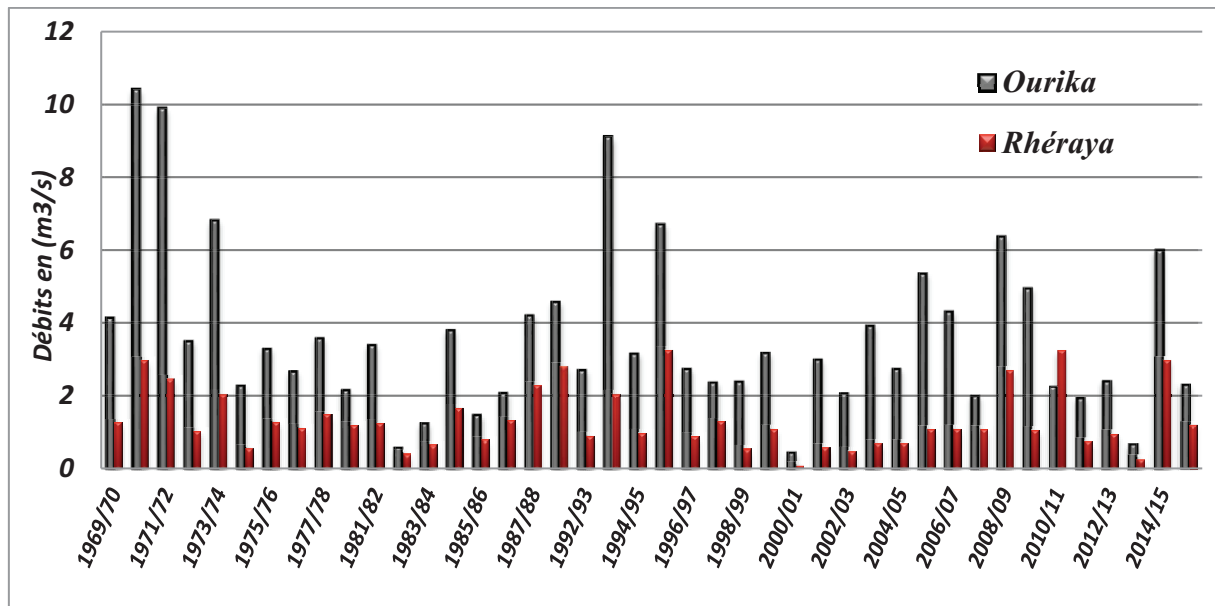


Figure 18: Variation des débits moyens annuels aux stations d'Aghbalou (Ourika) et de Tahanaout (Rheraya) entre 1970/71 et 2016/17

On enregistre à partir de la Figure (18) que l'évolution des débits à la station d'Aghbalou est très irrégulière, avec un débit max de 10,40 m<sup>3</sup>/s enregistré en 1970-1971. Au niveau de la station de Tahanaout, on enregistre également une variabilité importante. Les débits varient de 0,08 m<sup>3</sup>/s à 3,7 m<sup>3</sup>/s et fluctuent autour d'une moyenne de 1,45 m<sup>3</sup>/s.

### III.2. Variation des débits moyens mensuels :

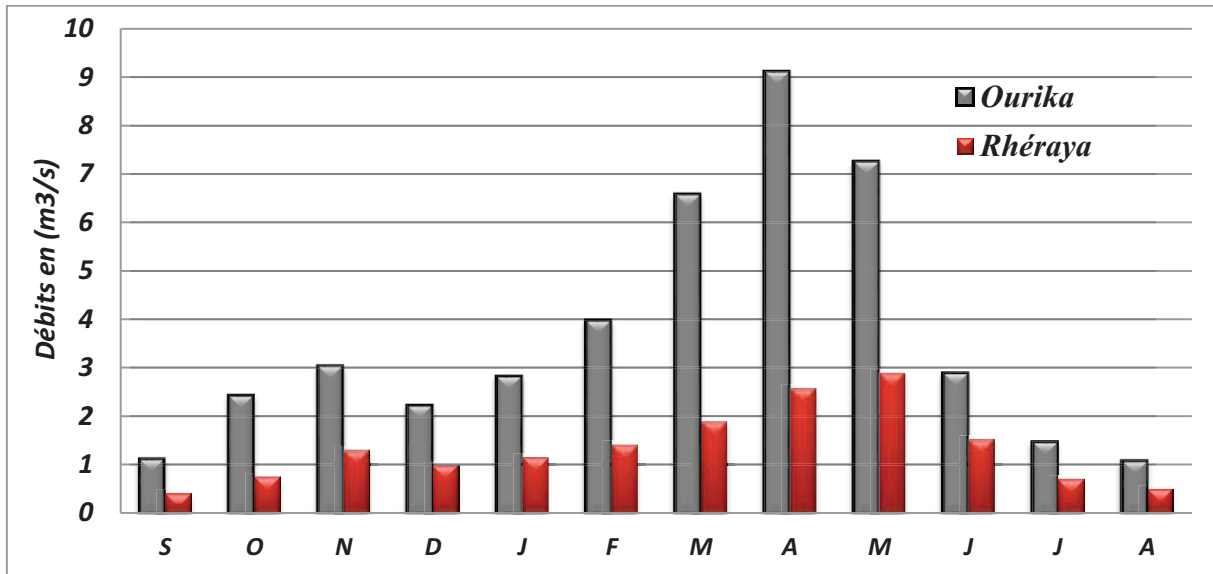


Figure 19: Variation mensuelle des débits aux stations d'Aghbalou (Ourika) et de Tahanaout (Rheraya) entre 1970/71 et 2016/17.

La figure 19 montre que les débits les plus importants dans le bassin de l'Ourika s'observent principalement au printemps. Ce débit important peut être expliqué par les pluies printanières en plus de la fonte des neiges hivernales. C'est par conséquent un régime pluvionival. Au niveau du bassin versant de la Rheraya, le régime hydrologique est également unimodal avec le maximum décalé vers le mois de mai. Le phénomène de contribution de la neige semble plus prononcé ici. Le régime est par ailleurs caractérisé par une saison sèche qui s'étend du mois de juin à septembre et une saison d'importance hydrologique allant d'octobre à mai.

### III.3. Variation des débits saisonnière :

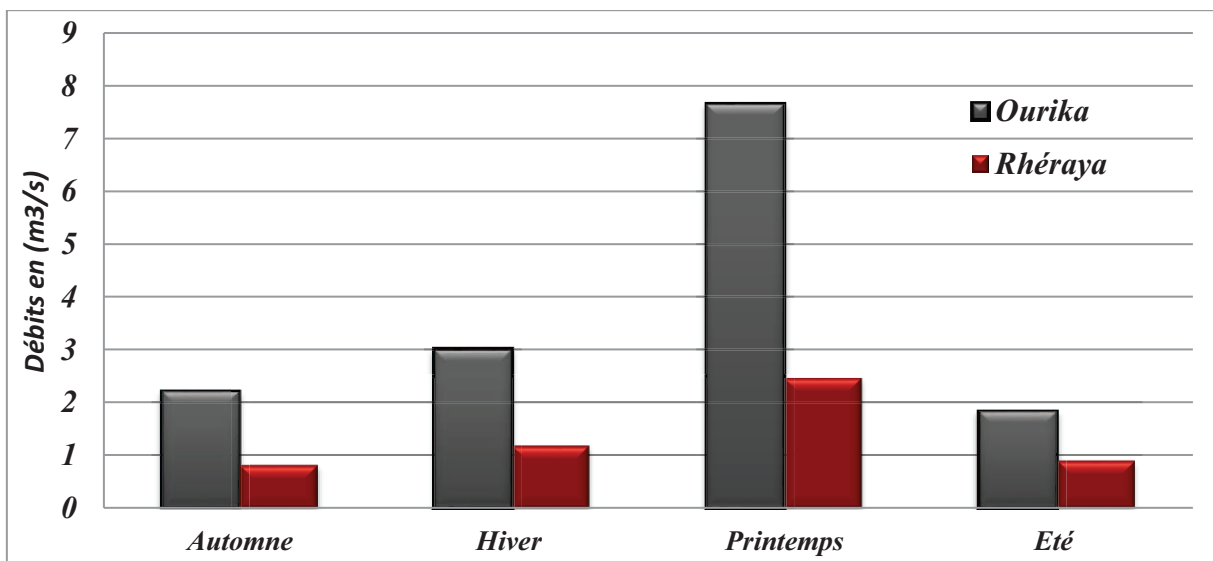


Figure 20: Variation saisonnière des débits aux stations d'Aghbalou (Ourika) et de Tahanaout (Rheraya) entre 1970/71 et 2016/17.

D'après la variation saisonnière des débits aux stations d'Aghbalou et de Tahanaout (Fig. 20), on distingue une légère augmentation de l'écoulement de l'automne à l'hiver suite à l'augmentation des précipitations. Mais par la suite, la croissance des débits est plus marquée au printemps grâce à la contribution de la fonte des stocks de neige.

#### IV. Relation pluie-débit :

##### IV.1. Le bassin versant d'Ourika :

Au niveau du sous bassin versant de l'Ourika, la relation pluie-débit témoigne de l'existence d'une variabilité hydrologique saisonnière très nette, qui ressemble dans ses grands traits à celle des précipitations (Fig.21).

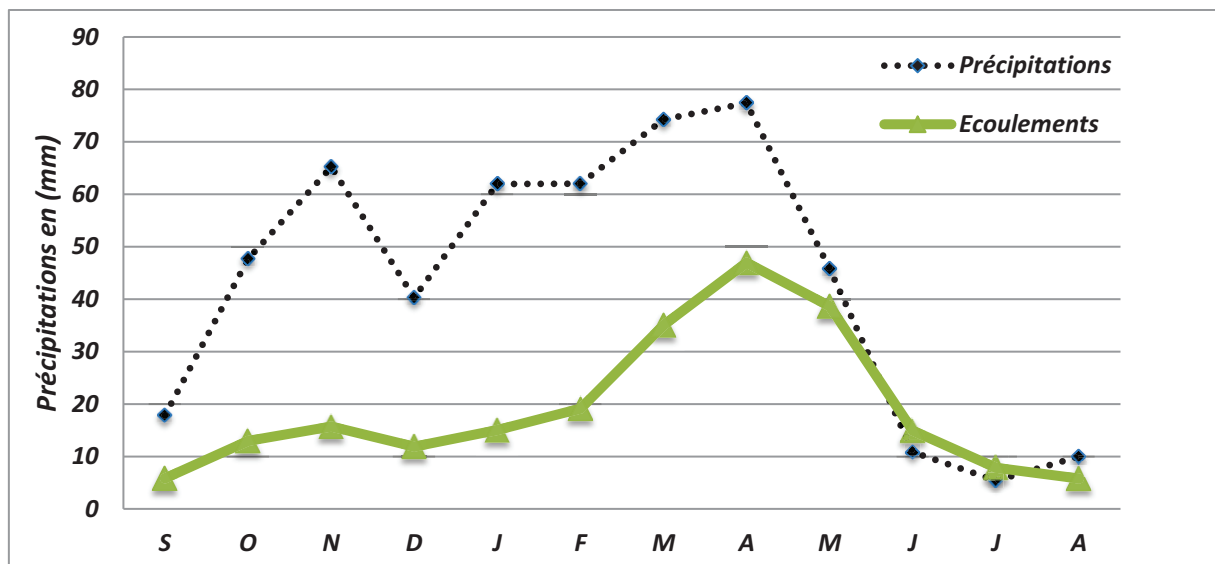
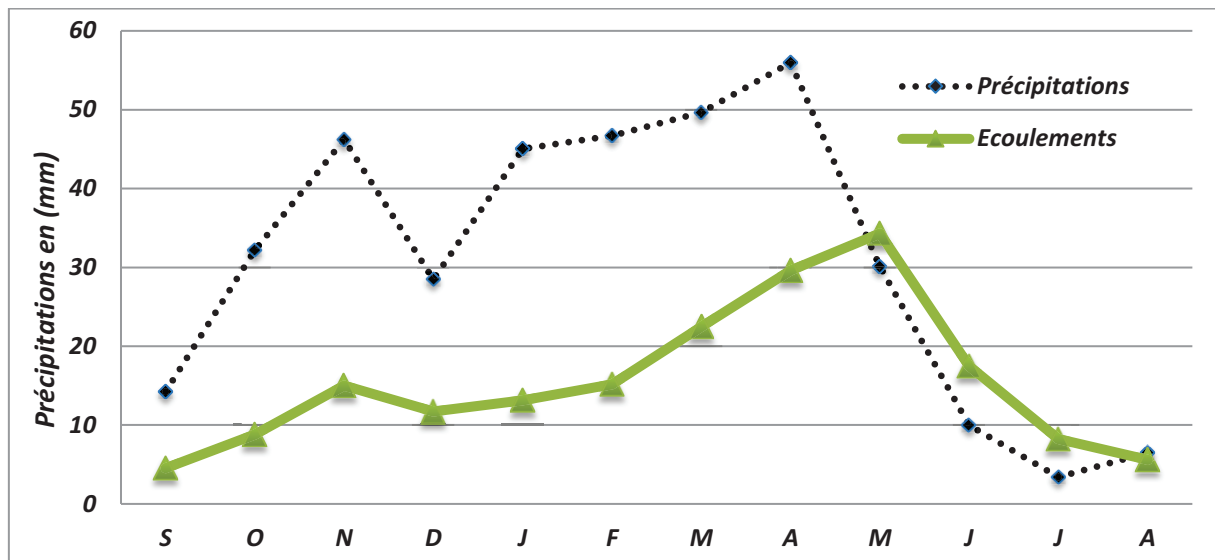


Figure 21: Relation pluie - débits moyens mensuels à la station d'Aghbalou (Ourika)

##### IV.2. Le bassin versant de la Rheraya :

L'analyse des précipitations et des débits à Tahanaout montre la présence d'un léger déphasage entre les courbes de pluie et de débit surtout en hiver et au printemps. La pluie commence à augmenter sensiblement en décembre pour culminer en avril et diminuer très rapidement par la suite, alors que le débit n'augmente qu'en février- mars pour atteindre son maximum au mois de mai où les précipitations sont couplées à la fonte des neiges en plus des débits de base qui seraient restitués par le sous-sol, ce qui témoigne d'une alimentation pluvionivale du cours d'eau (Fig.22).



**Figure 22: Relation pluie - débit moyen mensuel à la station de Tahanaout (Rheraya)**

### **V. Conclusion sur l'hydro-pluviométrie :**

L'étude des variations hydro-pluviométriques réalisée pour les deux sous bassins versants a permis de suivre l'évolution des pluies ainsi que celle des débits sur différents pas de temps. Nous avons ainsi pu définir les régimes hydrologiques relatifs à chaque bassin versant. Ces régimes ne sont donc pas exclusivement liés aux pluies. Les reliefs importants permettent la réception de chutes nivales. Celles-ci régularisent les débits des cours d'eau en augmentant les écoulements printaniers. En effet en fin de printemps (mai, juin, juillet) l'écoulement est soutenu par des débits de base assurés entre autres par la fonte des neiges. Ce phénomène est plus soutenu dans le bassin versant de la Rheraya que dans celui de l'Ourika.

# Chapitre III : les crues des oueds de l'Ourika et de la Rheraya

Le Maroc bien que soumis sur une grande partie de sa superficie à un climat aride à semi-aride est sous l'emprise de fortes crues et de redoutables orages d'été. Il connaît ainsi souvent des épisodes extrêmes brutaux de précipitations engendrant ainsi des crues dévastatrices par endroit et par moment.

Sur le Haut Atlas de Marrakech, les crues sont d'origine pluviale (Saidi *et al.*, 2012). Ces crues résultent généralement de fortes averses bien localisées. De plus, la configuration morphologique des bassins versants amplifie les débits de pointe enregistrés (Saidi *et al.*, 2003).

Afin de bien gérer ce risque, une analyse approfondie des différents éléments de l'hydrogramme de ces crues tels que le volume, le débit max, le temps de montée et le temps de base s'avère essentielle. Dans cette perspective, il est nécessaire d'avoir une vision globale sur l'historique des crues enregistrées au niveau des deux bassins versants de l'Ourika et de la Rheraya. Ceci dans le but de les caractériser, comprendre leurs mécanismes et d'étudier leur propagation au sein de chaque bassin.

## I. Présentation d'un hydrogramme de crue :

Une crue est généralement causée par une augmentation brutale du niveau des eaux d'un cours d'eau. Le déroulement de cette dernière est décrit par un hydrogramme de crue, qui représente l'évolution du débit au cours de l'épisode. Il peut être simple ou complexe. En effet selon sa forme, on distingue les crues rapides avec une forme d'hydrogramme en pointe ou bien des crues lentes avec un hydrogramme au profil aplati.

L'hydrogramme est décomposé en cinq éléments principaux (Fig 23) :

- Le temps de base : représente la durée entre le début de la phase de montée et la fin du ruissellement direct. Il correspond à la durée du ruissellement pur.
- Le temps de montée : fait référence à la durée qui s'écoule entre le début de la phase de montée et la pointe de l'hydrogramme, représenté par le débit maximal.
- Le temps de réponse : il s'agit de la durée qui sépare le moment du maximum de l'évènement pluvieux et la pointe de l'hydrogramme.

- La durée de la pluie efficace : c'est la période de l'averse ayant généré le ruissellement.
- Le temps de concentration : représente la distance comprise entre la fin de la pluie efficace et la fin du ruissellement pur.

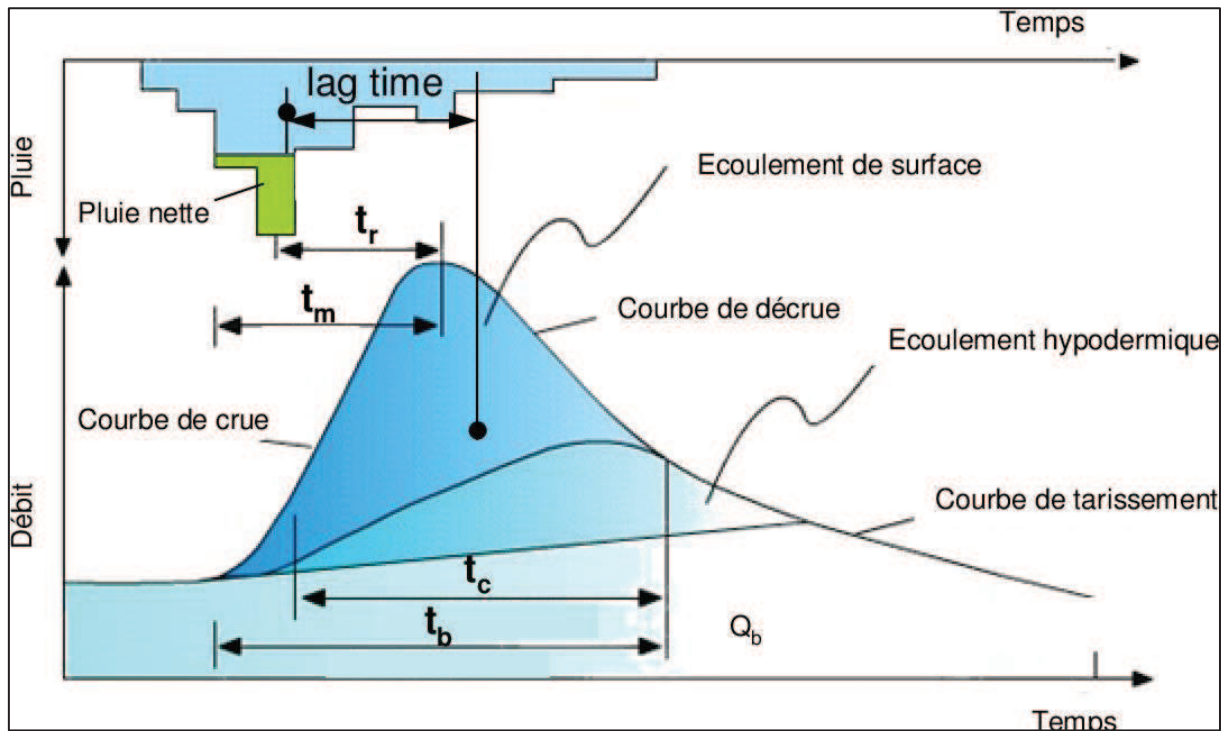


Figure 23: Représentation des composantes d'un hydrogramme de crue. (André Musy)

## II. Historique des crues des bassins versants de l'Ourika et de la Rheraya

### II.1. Le bassin versant de l'Ourika

Le bassin versant de l'Ourika est connu par ses crues qui peuvent se produire en toute saison. Le printemps est toutefois la saison où un plus grand nombre de crues sont observées pendant les quatre dernières décennies (Saidi *et al.*, 2010). Mais les crues peuvent aussi se produire en automne et en été qui connaît souvent des orages intenses.

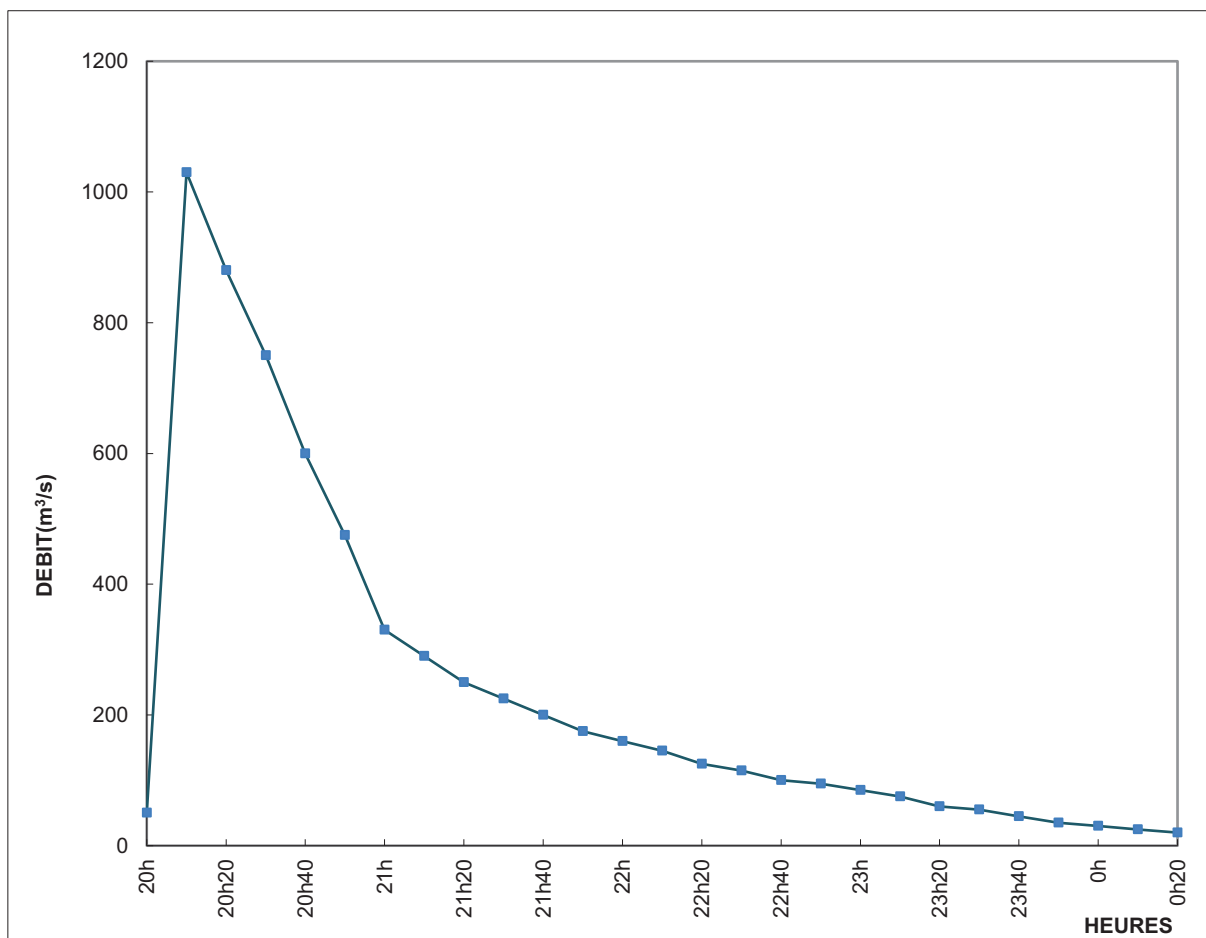
D'après l'historique des crues du bassin versant de l'Ourika, la durée de ces crues est généralement courte, allant de quelques heures à quelques dizaines d'heures.

#### II.1.1. La crue du 17 août 1995

En ce jeudi 17 août 1995, la vallée de l'Ourika a connu l'une des crues les plus dévastatrices de l'histoire du pays. Selon le service de la météorologie nationale, cette crue est le résultat d'une situation météorologique favorable au développement des orages. Un flux du sud aurait

apporté sur le Haut Atlas de l'air humide, frais et convectivement instable. Ce flux d'air s'est réchauffé au contact des pentes surchauffées. En surface, l'air chaud d'origine continentale a rejoint au nord les reliefs du Haut Atlas, s'humidifiant au contact de l'air maritime de l'Atlantique et accentuant ainsi son instabilité. En après-midi, cet air chaud avec des températures dépassant les 40°C a recouvert la vallée. Un soulèvement brutal provoqué d'une part par la convection thermique et d'autre part par l'effet orographique est donc survenu. Ayant comme résultat, la formation locale de nuages orageux très dense, qui ont pris une ampleur considérable à partir de 19h05 et ont commencé à s'éparpiller en se dirigeant vers l'est aux alentours de 21h35. L'orage a frappé en haute montagne, au niveau des altitudes de 2000 et 3000 m (INGEMA, 1996).

La crue n'a duré que 4 heures avec un temps de montée très bref de 15 minutes (Fig. 24). Le débit de pointe au niveau de la station d'Aghbalou, qui a atteint 1030 m<sup>3</sup>/s selon l'ABHT, a fait de cette crue, un événement de référence pour toute étude portant sur l'analyse des crues dans les bassins versants du Haut Atlas marocain.



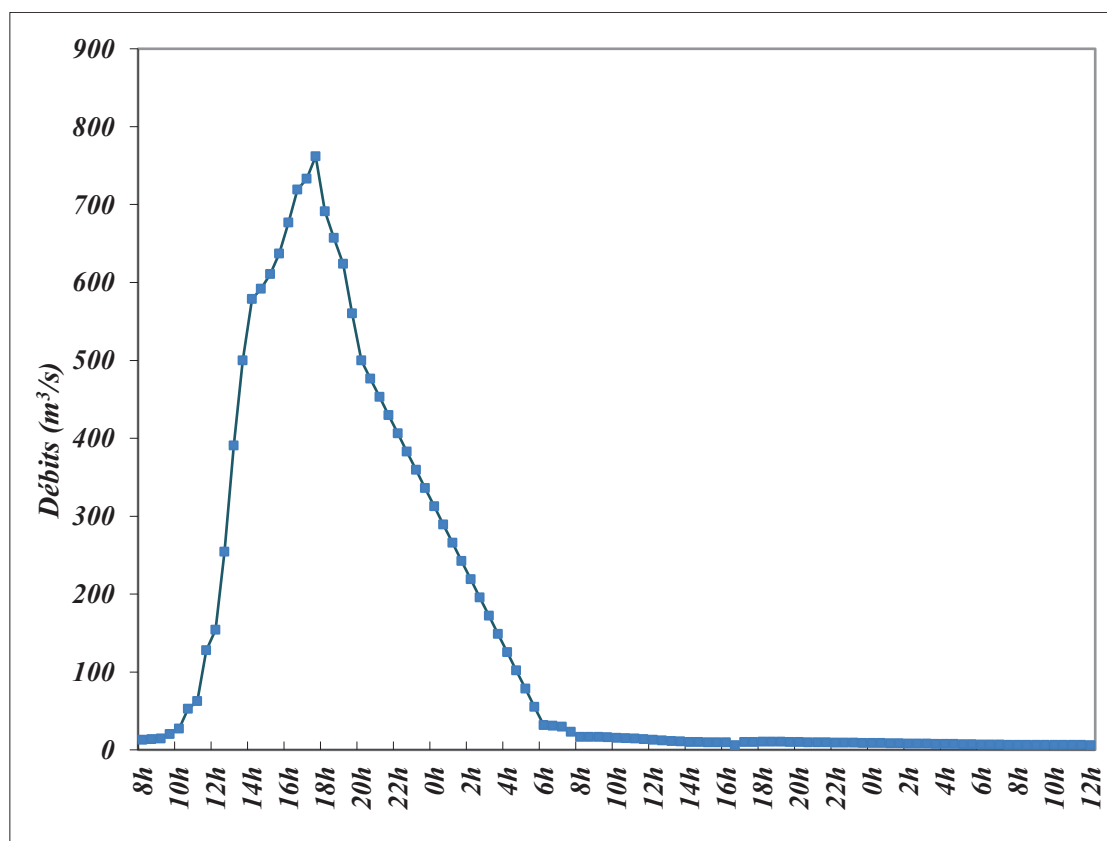
**Figure 24: Hydrogramme de la crue du 17/08/1995 à la station d'Aghbalou (OURIKA)**

**Tableau 3: Caractéristiques de la crue du 17 août 1995**

|  |                          |
|--|--------------------------|
| Moment du début                                  | 17/08/1995 à 20h         |
| Moment de la fin                                 | 18/08/1995 à 00h         |
| Débit de pointe                                  | 1030 (m <sup>3</sup> /s) |
| Débit de base avant la crue                      | 50 (m <sup>3</sup> /s)   |
| Débit de base après la crue                      | 30 (m <sup>3</sup> /s)   |
| Volume de la crue 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> | 3,651                    |
| Temps de base                                    | 4 h                      |
| Temps de montée                                  | 15 min                   |
| Coefficient de pointe                            | 4,1                      |

### II.1.2. La crue du 28 octobre 1999

Outre la crue du 17 août 1995, le bassin versant de l'Ourika enregistre chaque décennie une multitude de crues d'ampleur différente. En 1999 et plus particulièrement le 28 octobre, une forte crue a frappé la vallée. Cette crue est caractérisée par un énorme volume d'eau mobilisé (Tableau 4). En effet plus de 25 millions de mètres cubes d'eau sont passés par l'exutoire du bassin, et le débit de pointe a atteint 762 m<sup>3</sup>/s. Ce débit a augmenté dans un laps de temps de 9h, et le pic a été enregistré à 17h30 (Fig. 25). Cette crue a duré 24h et a provoqué une vingtaine de maisons détruites et plusieurs hectares de terres agricoles endommagés (Direction de l'Agriculture de Marrakech, 1999).



**Figure 25: Hydrogramme de la crue du 28/10/1999 a la station d'Aghbalou (OURIKA).**

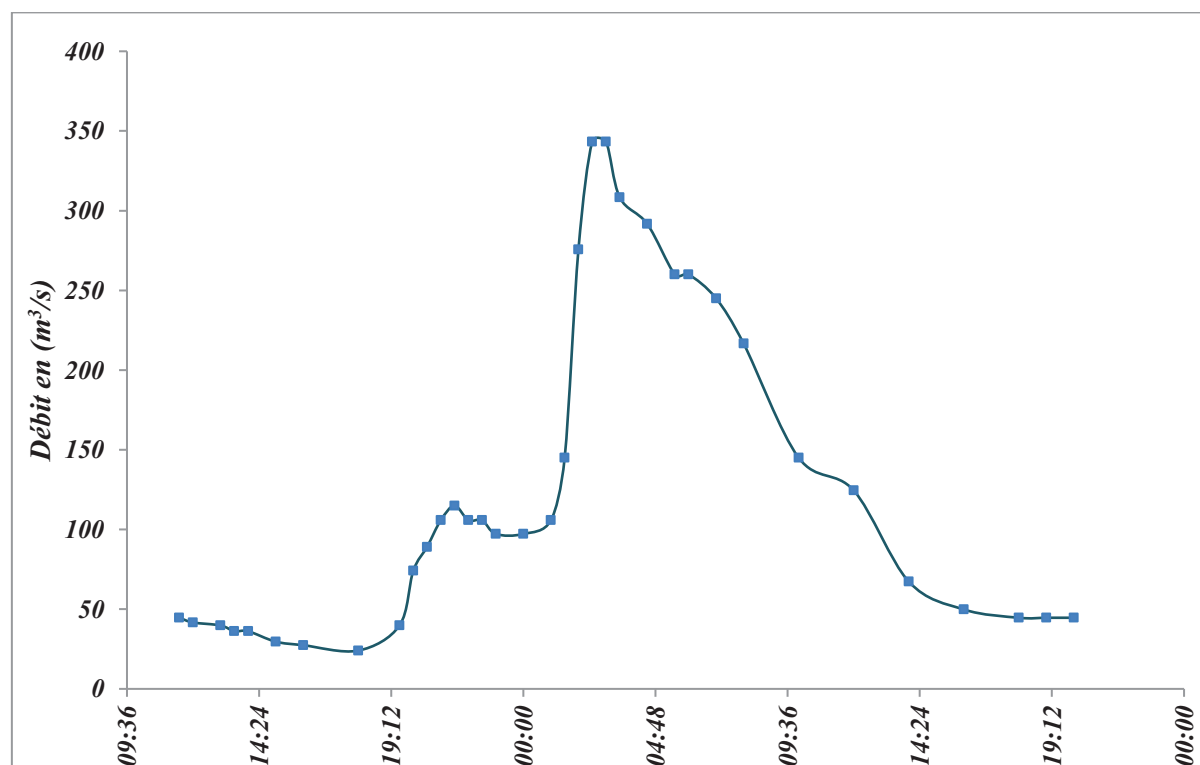


**Tableau 4: Caractéristiques de la crue du 28 octobre 1999.**

|  |                           |
|--|---------------------------|
| Moment du début                                  | 28/10/1999 à 8h           |
| moment de la fin                                 | 29/10/1999 à 8h           |
| Débit de pointe                                  | 762 (m <sup>3</sup> /s)   |
| Débit de base avant la crue                      | 12,72 (m <sup>3</sup> /s) |
| Débit de base après la crue                      | 16,46 (m <sup>3</sup> /s) |
| Volume de la crue 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> | 25,987                    |
| Temps de base                                    | 23,5 h                    |
| Temps de montée                                  | 9,5 h                     |
| Coefficient de pointe                            | 2,5                       |

### II.1.3. La crue du 22 novembre 2014

En novembre 2014, le bassin versant de Tensift a connu un épisode de précipitations sans précédent, provoquant des crues de différentes ampleurs quasiment dans tous les sous-bassins versants. Le bassin versant de l'Ourika a vécu lors de cet épisode, une crue importante (Fig. 26), caractérisée par un temps de montée de 15h et un débit de pointe de 343 m<sup>3</sup>/s enregistré le 22 novembre à 2h30 (tableau 5). Cette crue a causé beaucoup de dégâts matériels tels que la destruction de certains équipements de télésures de débits dans la station hydropluviométrique d'Aghbalou et la destruction de divers bâtiments sur la berge droite en aval de cette station (Fig.27).



**Figure 26: Hydrogramme de la crue du 22/11/2014 à la station d'Aghbalou (Ourika)**



**Figure 27: Dégâts matériels causés par la crue du 22 novembre 2014 de l'oued Ourika au douar Akhlij-Tnine Ourika (photo ABHT).**

**Tableau 5: Caractéristiques de la crue du 22 novembre 2014.**

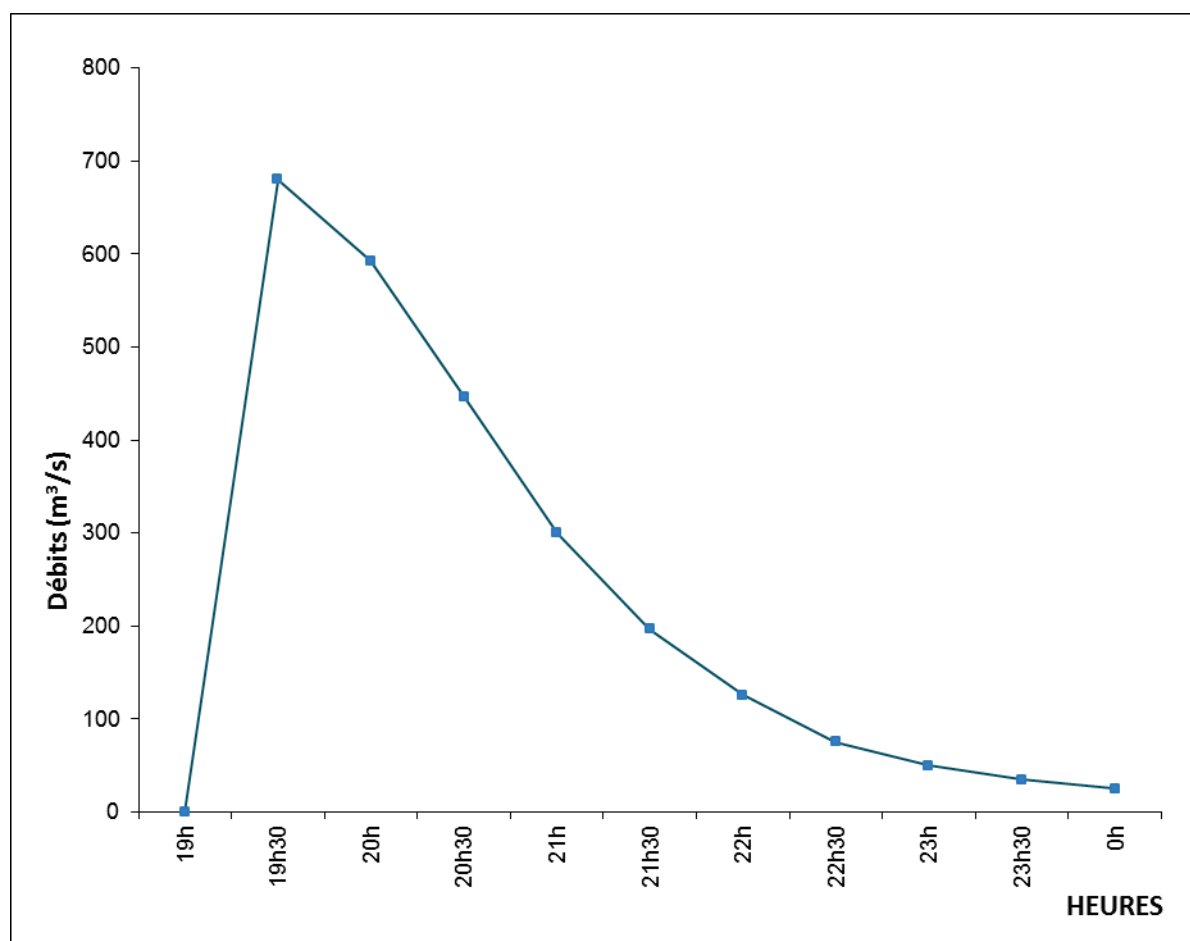
|  |                    |
|--|--------------------|
| Moment de début de la crue                       | 21/11/2014 à 11h30 |
| Moment de fin de la crue                         | 22/11/2014 à 20h   |
| Débit de pointe (m <sup>3</sup> /s)              | 343                |
| Débit de base avant la crue (m <sup>3</sup> /s)  | 44,6               |
| Débit de base après la crue (m <sup>3</sup> /s)  | 49,8               |
| Volume de la crue 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> | 13,538             |
| Temps de base                                    | 32h5               |
| Temps de montée                                  | 15h                |
| Coefficient de pointe                            | 2,96               |

## **II.2. Le bassin versant de la Rheraya**

### **II.2.1. La crue du 17 août 1995 :**

Le bassin versant de la Rheraya a connu le 17 août 1995, une crue similaire à celle qu'a connue le bassin versant de l'Ourika. L'hydrogramme de cette crue (Fig.28) a relativement la même forme que celui de l'Ourika. Il s'agit bien d'une crue unimodal avec une pointe de crue qui est, bien que moins importante qu'à Aghbalou, est très importante par rapport à la surface du bassin. Selon les caractéristiques de cette crue (Tableau 6), le débit de pointe a en effet atteint une valeur de 680 m<sup>3</sup>/s, avec un temps de montée très court ne dépassant pas une

demi-heure. Ce genre de crue représente un risque majeur au niveau du bassin versant de la Rheraya. Il engendre des dégâts considérables et laisse des traces mémorables.



**Figure 28: Hydrogramme de la crue du 17/08/1995 a la station de Tahanaout (Rheraya)**

**Tableau 6: Caractéristiques de la crue du 17 août 1995 à la station de Tahanaout.**

|   |                  |
|---|------------------|
| Moment du début de la crue                      | 17/08/1995 à 19h |
| Moment de fin de la crue                        | 18/08/1995 à 0h  |
| Débit de pointe (m <sup>3</sup> /s)             | 680              |
| Débit de base avant la crue (m <sup>3</sup> /s) | 0,020            |
| Débit de base après la crue (m <sup>3</sup> /s) | 25,40            |
| Volume 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>           | 4,27             |
| Temps de base                                   | 4,5 h            |
| Temps de montée                                 | 0,5 h            |
| Coefficient de pointe                           | 2,6              |

### **II.2.2. La crue du 28 octobre 1999**

Le bassin versant de la Rheraya a connu le 28 octobre 1999 une crue dont l'hydrogramme (Fig. 29) est également unimodal. La crue a atteint un débit de pointe de 413 m<sup>3</sup>/s vers 17h30 et le temps de montée fût de 15h. (Tableau 7).

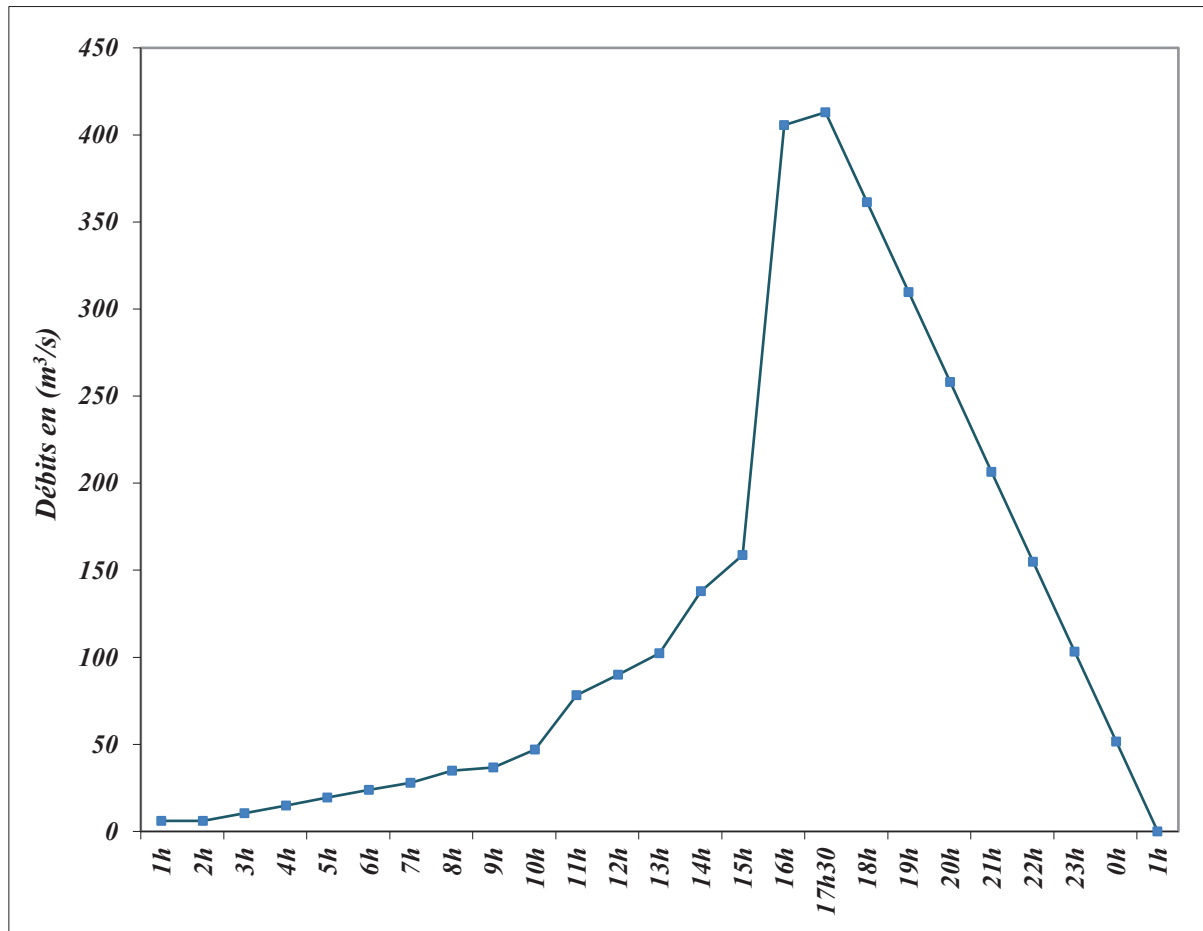


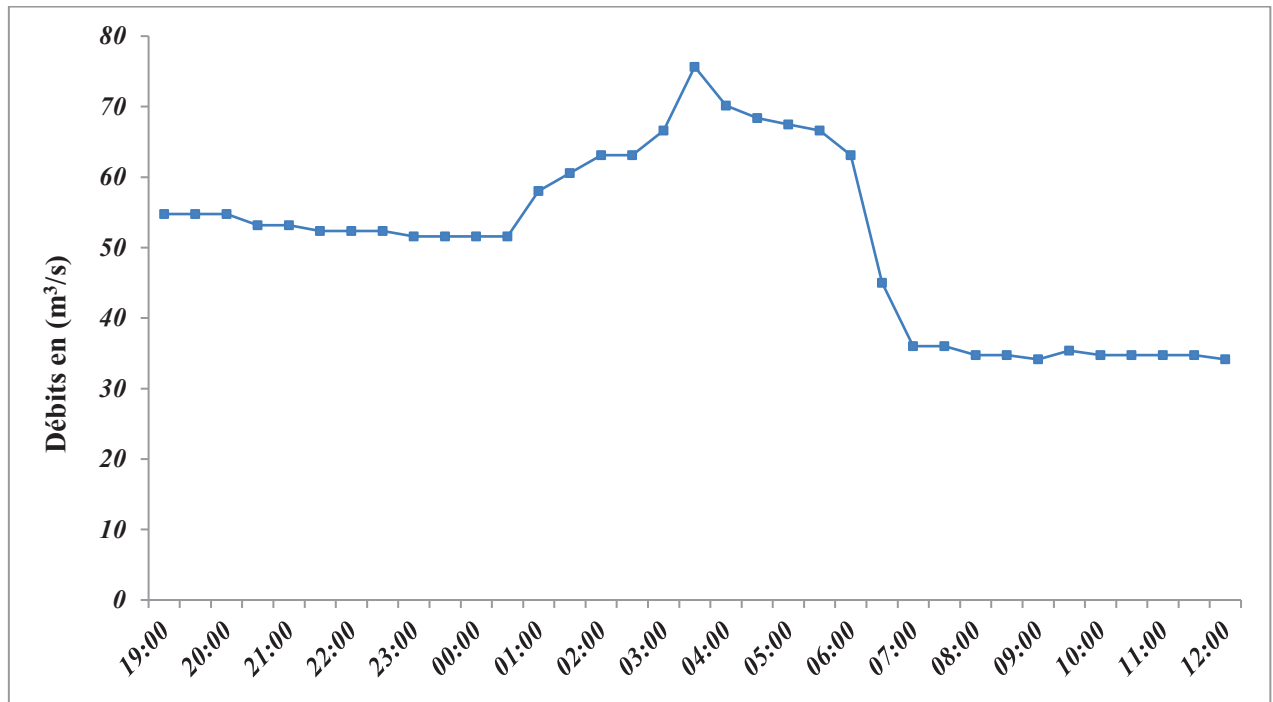
Figure 29: Hydrogramme de la crue du 28/10/1999 à la station de Tahanaout (Rheraya)

Tableau 7: Caractéristiques de la crue du 28 octobre 1999 à la station de Tahanaout.

|   |                 |
|---|-----------------|
| Moment de début de la crue                      | 28/10/1999 à 2h |
| Moment de fin de la crue                        | 29/10/1999 à 1h |
| Débit de pointe (m <sup>3</sup> /s)             | 413             |
| Débit de base avant la crue (m <sup>3</sup> /s) | 6               |
| Débit de base après la crue (m <sup>3</sup> /s) | 0,08            |
| Volume 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>           | 10,82           |
| Temps de base                                   | 22 h            |
| Temps de montée                                 | 15,5 h          |
| Coefficient de pointe                           | 3               |

### II.2.3. La crue du 22/11/2014

Lors de l'épisode pluvieux de novembre 2014, le bassin versant de la Rheraya n'a pas été épargné. Le bassin a en effet connu une crue qui n'a certes pas une grande ampleur, mais elle n'était pas négligeable (Fig. 30). Le temps de montée était assez long de l'ordre de 13h et le débit de pointe était de 75,65 m<sup>3</sup>/s (tableau 8).



**Figure 30: Hydrogramme de la crue du 22/11/2014 à la station de Tahanaout (Rheraya)**

**Tableau 8: Caractéristiques de la crue du 22 novembre 2014 à la station de Tahanaout.**

|   |                    |
|---|--------------------|
| Moment de début de la crue                      | 21/11/2014 à 00h00 |
| Moment de fin de la crue                        | 23/11/2014 à 20h30 |
| Débit de pointe (m <sup>3</sup> /s)             | 75,65              |
| Débit de base avant la crue (m <sup>3</sup> /s) | 3,48               |
| Débit de base après la crue (m <sup>3</sup> /s) | 32,92              |
| Volume 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>           | 9,234              |
| Temps de base                                   | 60h                |
| Temps de montée                                 | 13h                |
| Coefficient de pointe                           | 1,96               |



**Figure 31: paysage de la vallée en amont d'Asni après le passage d'une crue (photo T.Ruf)**

### **III. Vitesse de propagation des crues**

La propagation d'une crue dans un cours d'eau est similaire à la propagation d'une onde. De ce fait, la crue est caractérisée par une vitesse de propagation tout au long du cours d'eau. Dans le cas des bassins versants étudiés, la vitesse de propagation de la crue sera calculée entre les stations d'Aghbalou et de Tazitount pour le bassin versant de l'Ourika, et entre les stations de Tahanaout et Tinitine pour le bassin versant de la Rheraya (Fig.32). En effet, Il est possible d'obtenir les vitesses de propagations des crues en divisant la distance (le long du cours d'eau) entre les deux stations amont et aval, par la durée séparant les moments des pointes de crues enregistrées aux deux stations.

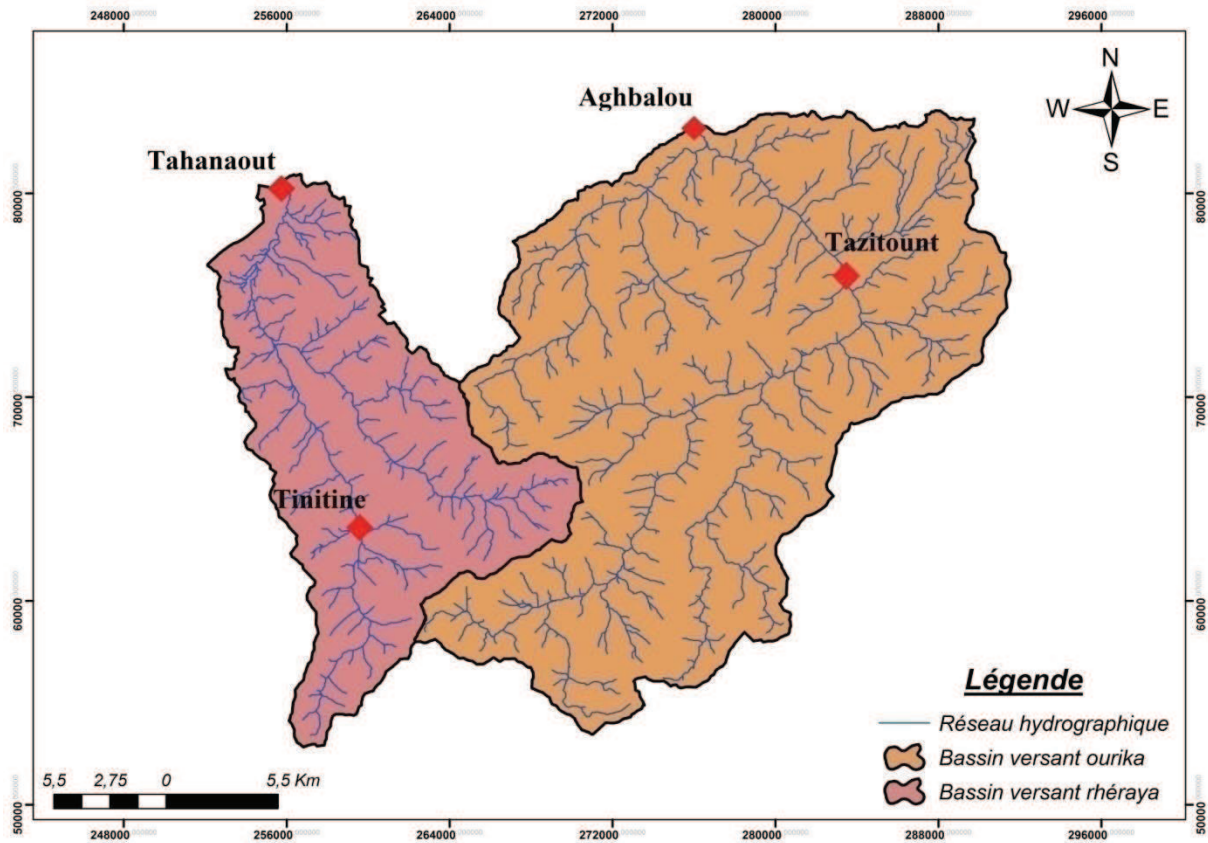


Figure 32: Localisation des stations hydrométriques au niveau des deux bassins versants (O. Bennani).

### III.1. Le bassin versant de l'Ourika

#### a. Crue du 22/11/2014:

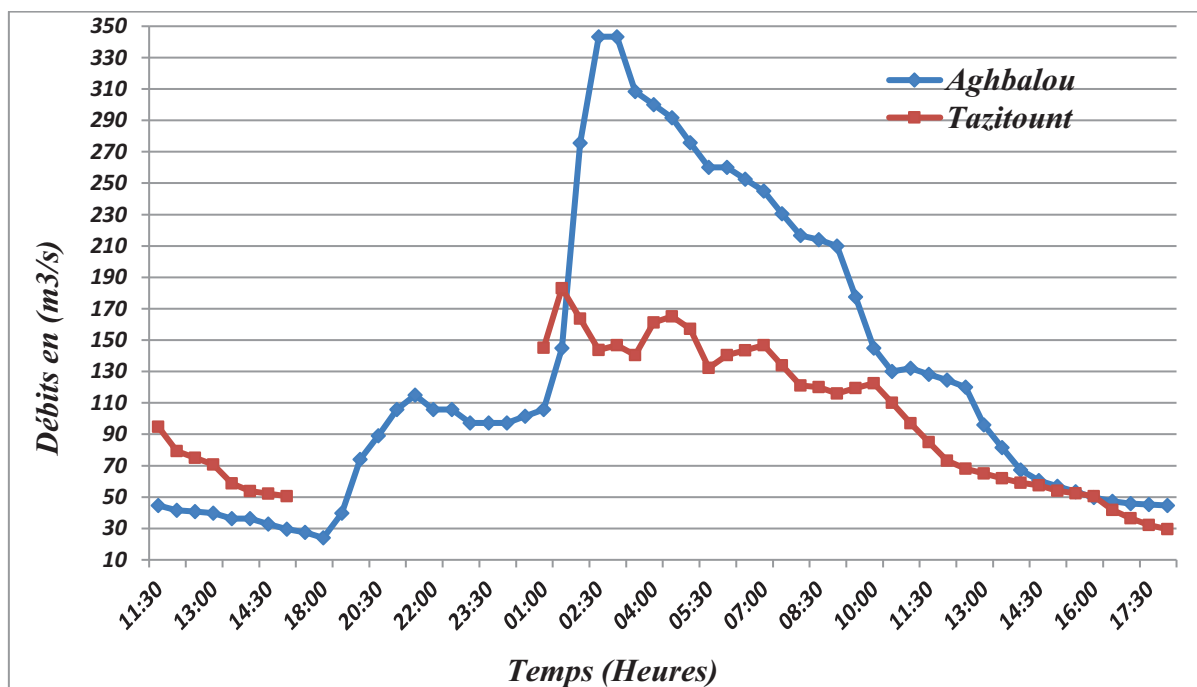
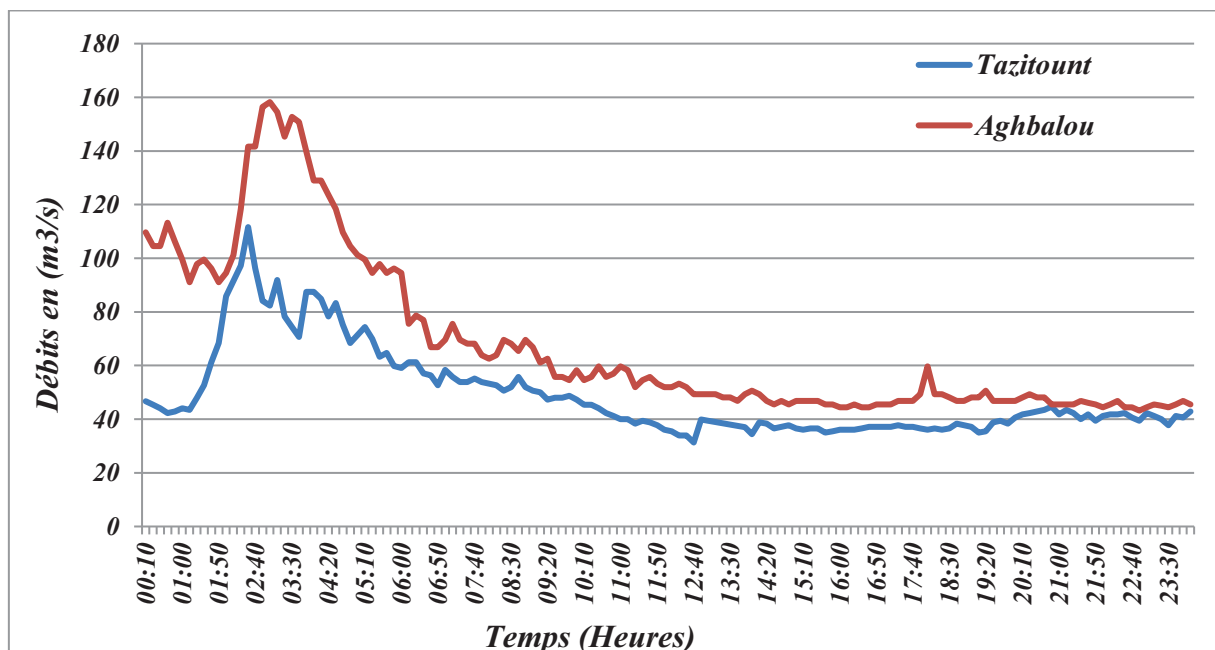


Figure 33: Propagation de la crue du 22/07/2014 entre les stations d'Aghbalou et de Tazitount.

Lors de la crue du 22 novembre 2014, le premier pic de l'hydrogramme de crue est enregistré à la station de Tazitount suivi par un pic à Aghbalou (Fig. 33) avec un intervalle de temps d'une heure. La première pointe de crue a été notée à 1h30 au niveau de la station de Tazitount et à 2h30 du même jour au niveau de la station d'Aghbalou, ce qui permet de calculer aussi la vitesse de propagation de la crue qui est de 2,7 m/s.

Avec un temps de propagation de 1heure, il est envisageable de mettre à disposition des visiteurs et usagers de la vallée des mesures de prévision et d'alerte permettant ainsi une limitation des dégâts.

*b. La crue du 05/05/2016 :*



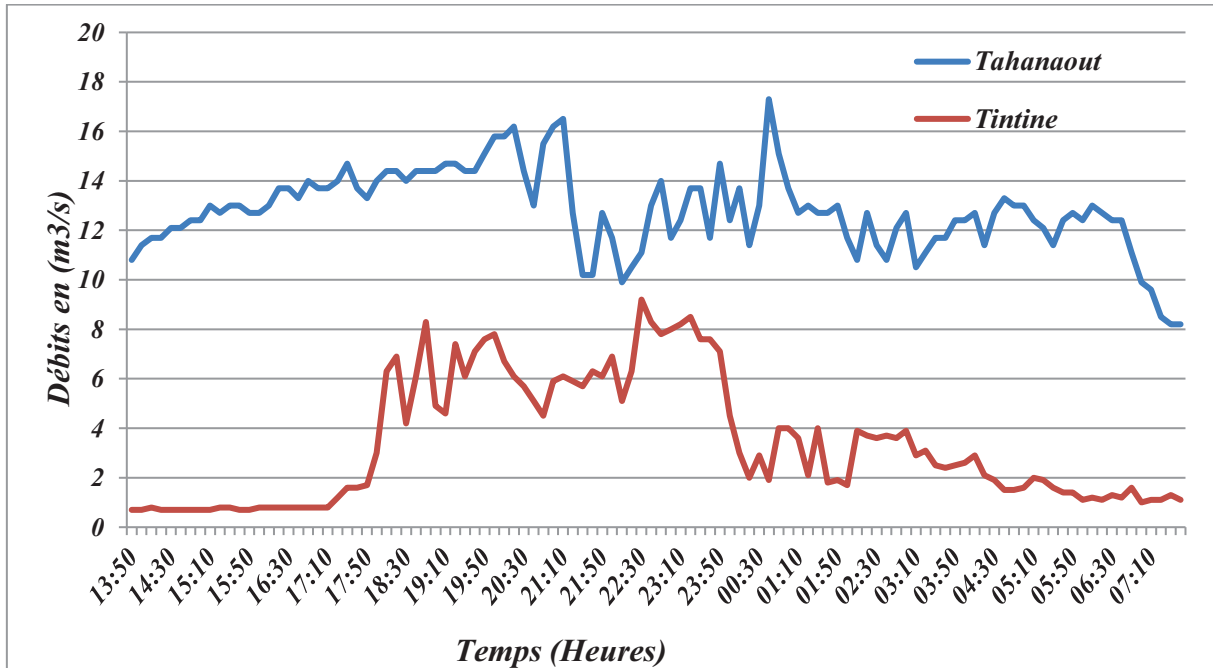
**Figure 34: Propagation de la crue du 05/05/2016 entre les stations de Tazitount et d'Aghbalou.**

Pour cette crue du 5 mai 2016, le premier pic a été enregistré à la station de Tazitount à 2h30. Au niveau de la station d'Aghbalou le maximum de crue n'a été enregistré qu'une demi-heure après, à 3h00 (Fig. 34). Ce court intervalle traduit une vitesse de propagation élevée qui est de l'ordre de 5 m/s.



### III.2. Le bassin versant de la Rheraya

#### a. La crue du 04/05/2016.



**Figure 35: Propagation de la crue du 04/05/2016 au niveau des stations de Tahanaout et Tintine.**

La crue du mois de mai 2016 s'est étalée au niveau du bassin versant de la Rheraya sur 2 jours. Elle a débuté le 04/05/2016 au soir et s'est amplifiée le lendemain. Après l'illustration simultanée des hydrogrammes observés à Tintine et Tahanaout (figure 35), nous avons relevé le moment du pic de la crue en amont et celui du pic enregistré à l'exutoire. Avec un décalage de 2 heures entre les deux pics, la vitesse de propagation de cette crue est de l'ordre de 2,5m/s.

Ces différentes vitesses de propagation des crues de l'Ourika et de la Rheraya appellent à plus de vigilance vis-à-vis de la remontée rapide des eaux des deux oueds. Ces grandes vitesses, surtout pour l'Ourika, peuvent surprendre les riverains et les visiteurs en cas de défaillance du système d'alerte aux crues.

#### IV. Conclusion sur l'étude dynamique des crues :

De ce chapitre, dans lequel nous avons analysé les crues des bassins versants de l'Ourika et de la Rheraya et leurs dynamismes, nous retiendrons que les hydrogrammes de crues sont dans l'ensemble unimodals avec des temps de montée très courts tandis que la décrue est plus lente. Nous avons aussi constaté que des crues d'ampleurs importantes qui enregistrent des débits de pointe assez élevés sont enregistrées lors d'épisodes exceptionnels tels que l'épisode d'août 1995, d'octobre 1999 ou encore celui de l'automne 2014. Cela n'empêche que les

bassins versants de l'Ourika et de la Rheraya sont assujettis à plusieurs petites crues tout au long de l'année ou de la décennie. Cette fréquence relativement importante des crues peut être expliquée par l'altitude élevée, l'intensité importante par moment des précipitations sur un substratum pentu et très peu perméable ou encore par les nombreux affluents qui se jettent dans le cours principal.

Les bassins versants de l'Ourika et de la Rheraya sont caractérisés par des crues d'une puissance remarquable et un volume d'eau mobilisée assez important. Ce caractère violent est souvent relatif aux bassins versants montagneux des milieux arides à semi-arides, où les crues sont caractérisées par des montées d'eau brutales et rapides.

## Chapitre IV : Analyse fréquentielle des débits de crues.

Au Maroc, les oueds sont caractérisés par des crues fréquentes et marquantes. Étant considérées comme des événements indépendants d'une année hydrologique à l'autre, les crues doivent être étudiées et statistiquement analysées afin de quantifier les risques et d'estimer le débit de crue correspondant à différentes périodes de retour.

Si cette catastrophe naturelle est bien étudiée dans certains milieux climatiques tels que les climats tempérés (Ambroise, 1998 ; Riad, 2003), il n'en est pas de même pour les zones à climats semi-arides notamment dans les pays en voie de développement où les stations de mesure sont rares et parfois mal équipées (Farquharson *et al.* 1992).

L'étude de ce risque hydrologique se base sur la détermination des débits maximaux des crues. Le but est de réaliser une analyse fréquentielle qui est l'un des principaux outils d'estimation du débit pour une période de retour donnée. L'analyse fréquentielle est utilisée lorsqu'il y a suffisamment de données hydrologiques sur le site. Elle est basée sur des méthodes statistiques de prédétermination afin de définir la probabilité d'occurrence future d'un événement donné (Stedinger *et al.*, 1993; Ahattab *et al.*, 2015).

Les méthodes d'analyse fréquentielle sont souvent utilisées pour décrire l'occurrence et l'ampleur des événements extrêmes, afin d'améliorer la gestion des ressources en eau (Stedinger *et al.* 1993 ; Rao et Hamed, 2001). Ces analyses statistiques permettent d'ajuster une distribution statistique à une série d'observations d'événements de crues, dans le but de déterminer leurs périodes de retour (Katz *et al.*, 2002).

L'analyse fréquentielle passe par différentes étapes dont :

- Application de tests statistiques pour la vérification de l'homogénéité, de l'indépendance et de la stationnarité.
- Ajustement de lois statistiques et estimations des paramètres.
- Choix de la meilleure distribution et calcul des quantiles pour les différentes périodes de retour.

## I. Les tests statistiques :

Dans une analyse des séries chronologiques de précipitations ou de débits, il est important de vérifier que les observations de la chronique sont indépendantes et identiquement distribuées (hypothèses i.i.d.) ; d'où la nécessité de vérifier l'homogénéité, l'indépendance et la tendance de ces séries.

Afin de vérifier ces hypothèses, plusieurs tests existent dont les plus utilisés sont :

- Le test de “Wald-Wolfowitz, 1943” (Wald et Wolfowitz, 1943) afin de vérifier l'hypothèse d'indépendance.
- Le test de « Mann-Kendall » (Mann, 1945) évalue l'existence de tendance dans une série d'observations (Kulkarni *et al.*, 1995).
- Le test de Wilcoxon (Kosiorowski *et al.*, 2019) permet de tester l'homogénéité de la série.

### I.1. Test d'homogénéité :

Un échantillon de données aléatoires est dit « homogène » lorsque les données qui le constituent proviennent de la même distribution. Le test de Wilcoxon est un des tests les plus utilisés pour vérifier cette homogénéité. Il permet d'effectuer des comparaisons entre deux sous échantillons et de vérifier si leurs moyennes sont significativement différentes.

La statistique de ce test  $V$  est distribuée asymptotiquement selon une loi normale centrée réduite et est exprimée comme suit :

$$V = [w - 0.5m(n + 1) + 0.5] / \sqrt{\text{var}(w)}$$

Où

$$W = \sum_{i=1}^m R_i S(R_i)$$

### I.2. Test d'indépendance :

Un échantillon est dit indépendant lorsqu'aucune autocorrélation n'existe entre les événements. L'indépendance des événements successifs retenus lors de l'échantillonnage peut être vérifiée à l'aide du test de Wald-Wolfowitz qui se calcule comme suit :

$$W = \sum_{i=1}^{n-1} (X_i X_{i+1}) + X_n X_1$$

Ce test est distribué asymptotiquement selon une loi normale centrée réduite. Les règles de décision, à un seuil  $\alpha$  donné, pour ce test sont les mêmes que celles de la loi normale.

### **I.3. Test de stationnarité :**

Appelée aussi test de tendance, la stationnarité d'un échantillon est son indépendance par rapport au temps. En effet une série est dite stationnaire si ses caractéristiques « moyenne, variance ou moment... », ne varient pas en fonction du temps.

Un des tests statistiques les plus utilisés pour procéder à la vérification de l'hypothèse de stationnarité est le test de Mann-Kendall. Ce test permet de comparer les hypothèses suivantes :

- $H_0$  : les caractéristiques statistiques des variables aléatoires sont constantes dans le temps.
- $H_1$  : les caractéristiques statistiques des variables aléatoires ne sont pas constantes dans le temps.

Pour ce, la statistique S de ce test est exprimée de la manière suivante :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{signe}(X_j - X_i)$$

Plus la statistique du test S tend vers la valeur 0, plus les observations seront considérées comme stationnaire.

### **I.4. Résultats des tests statistiques sur les données utilisées :**

Les tests statistiques ont été réalisés sur les deux bassins versants étudiés « Ourika » et « Rheraya » afin de vérifier la fiabilité des données utilisées dans cette étude.

#### I.4.1. Bassin versant de l'Ourika :

**Tableau 9: Résultats des tests statistiques des pluies/débits journaliers annuels utilisées pour le bassin versant de l'Ourika**

|                               | Ourika (Aghbalou) |                |
|-------------------------------|-------------------|----------------|
|                               | Débits            | Précipitations |
| Homogénéité (Wilcoxon)        | 0.27              | 0.66           |
| Tendance (Mann-Kendall)       | 0.14              | 0.36           |
| Indépendance (Wald-Wolfowitz) | 0.64              | 0.58           |

Les résultats des tests statistiques obtenus pour la série de données du bassin versant de l'Ourika (tableau 9) révèlent une bonne homogénéité, une bonne indépendance ainsi que l'absence de tendance, et ce pour les précipitations et les débits, selon un seuil de 5 % (Pval de 0.05).

#### I.4.2. Bassin versant de la Rheraya :

**Tableau 10: Résultats des tests statistiques des pluies/débits journaliers annuels utilisées pour le bassin versant de la Rheraya**

|                               | Rheraya (Tahanaout) |                |
|-------------------------------|---------------------|----------------|
|                               | Débits              | Précipitations |
| Homogénéité (Wilcoxon)        | 1.09                | 0.21           |
| Tendance (Mann-Kendall)       | 0.65                | 0.58           |
| Indépendance (Wald-Wolfowitz) | 0.89                | 0.20           |

Au niveau du bassin versant de la Rheraya, les tests statistiques (tableau 10) témoignent d'une bonne homogénéité et indépendance avec absence de tendance pour les précipitations ainsi que pour les débits, selon un seuil de 5 % (Pval de 0.05).

## II. Outils d'analyses et paramètres d'évaluation :

Afin de réaliser l'analyse statistique de la série des débits maxima annuels relatifs aux bassins versants étudiés, nous avons eu recours au logiciel « R » (DeMicheaux *et al.*, 2011). C'est un logiciel qui permet l'ajustement des lois statistiques afin d'effectuer l'analyse fréquentielle des séries de données relatives aux événements extrêmes.

La meilleure démarche à adopter pour les lois d'ajustement statistiques est de tester plusieurs lois et n'en retenir que celle présentant les meilleurs ajustements graphiques et statistiques.

### III. Ajustement des lois de probabilité et détermination des périodes de retour des débits extrêmes :

L'étude des événements à risque telle que les crues nécessite la prise en considération des événements avec des débits importants. Une fois l'extraction des valeurs de débits instantanés journaliers réalisés, une série de données est construite en utilisant pour chaque année la valeur maximale du débit instantané. Cette approche assure l'indépendance de ces valeurs entre elles. On utilise ensuite la méthode du maximum de vraisemblance afin d'estimer les paramètres des distributions ajustées (El Adlouni *et al*, 2008). Cette méthode permet en effet d'estimer à partir d'un échantillon observé, le paramètre d'une loi de probabilité ajustée à l'échantillon.

À partir de données instantanées au niveau des stations d'Aghbalou pour le bassin versant de l'Ourika et Tahanaout au niveau du bassin versant de la Rheraya, nous avons constitué les échantillons des maximums instantanés annuels.

Une variété de distributions communément utilisées pour représenter les crues dans ces régions ont été testées, notamment les distributions Gamma, GEV, Gumbel et Log Normal (Tableau 11).

**Tableau 11: Fonctions de distribution de probabilité utilisées.**

| Nom       | Fonction de densité de probabilité   | Domain   | Nombre de paramètres |
|-----------|--|--|----------------------|
| Gamma     | $f_x = \frac{\alpha^\lambda}{\Gamma(\lambda)} x^{\lambda-1} e^{-\alpha x}$   | $x > 0$  | 2                    |
| GEV       | $f_x = \frac{1}{\alpha} \left[ 1 - \frac{k}{\alpha} (x - u) \right]^{\frac{1}{k}-1} \exp \left\{ - \left[ 1 - \frac{k}{\alpha} (x - u) \right]^{1/k} \right\}$ | $x > u + \alpha/k$ if $k < 0$<br>$x < u + \alpha/k$ if $k > 0$ | 3                    |
| Gumbel    | $f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp \left[ - \frac{x - u}{\alpha} - \exp \left( \frac{x - u}{\alpha} \right) \right]$  | $-\infty < x$<br>$X < +\infty$                                 | 2                    |
| Lognormal | $f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ - \frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right\}$  | $x > 0$  | 2                    |

Le choix de la distribution qui correspond le mieux à la série des données et qui permettra par la suite d'estimer les débits de pointe correspondant à une période de retour donnée, est basé sur les critères de sélection, qui reposent sur la fonction de vraisemblance. Il s'agit des critères

d'information Akaike (1974) et Bayésien (Schwartz, 1978), respectivement donnés par les équations (1) et (2) ainsi que la probabilité à posteriori :

- AIC: information criterion Akaike

$$AIC = -2 \log(L) + 2k \quad (1)$$

- BIC: Bayesian information criterion

$$BIC = -2 \log(L) + 2k \log(N) \quad (2)$$

Où AIC est le critère d'information d'Akaike, BIC est le critère d'information Bayésien, L est la fonction de vraisemblance, k le nombre de paramètres et N la taille de l'échantillon.

Les 2 équations utilisent le nombre de paramètres k. Ainsi, la parcimonie est prise en compte lors de la sélection de la meilleure distribution en utilisant ces deux critères. Le meilleur ajustement est celui associé aux valeurs BIC et AIC les plus petites (Rao et Hamed, 2001; Trambly *et al.*, 2008).

#### **IV. Résultats de l'analyse fréquentielle et estimation des quantiles :**

Les séries des débits maxima annuels ont été employées pour l'analyse des crues au niveau des bassins versants étudiées. En procédant par l'ajustement des données aux lois statistiques, seules les lois réellement représentatives de l'échantillon ont été retenues pour chaque station.

##### **IV.1. Le bassin versant de l'Ourika à la station d'Aghbalou :**

En utilisant les débits maxima annuels de la station d'Aghbalou. Nous avons réalisé une analyse fréquentielle nous ayant permis d'obtenir des résultats qui montrent après traitement la meilleure adaptation de la loi Log Normal aux inondations de l'Ourika à la station d'Aghbalou. Néanmoins les différentes distributions représentent toutes assez bien la distribution des crues. Le résultat de la loi Log Normal présente une adéquation satisfaisante tant sur le plan graphique (Fig. 36) que sur le plan statistique (Tableau. 12), en enregistrant les plus faibles valeurs des critères BIC et AIC.



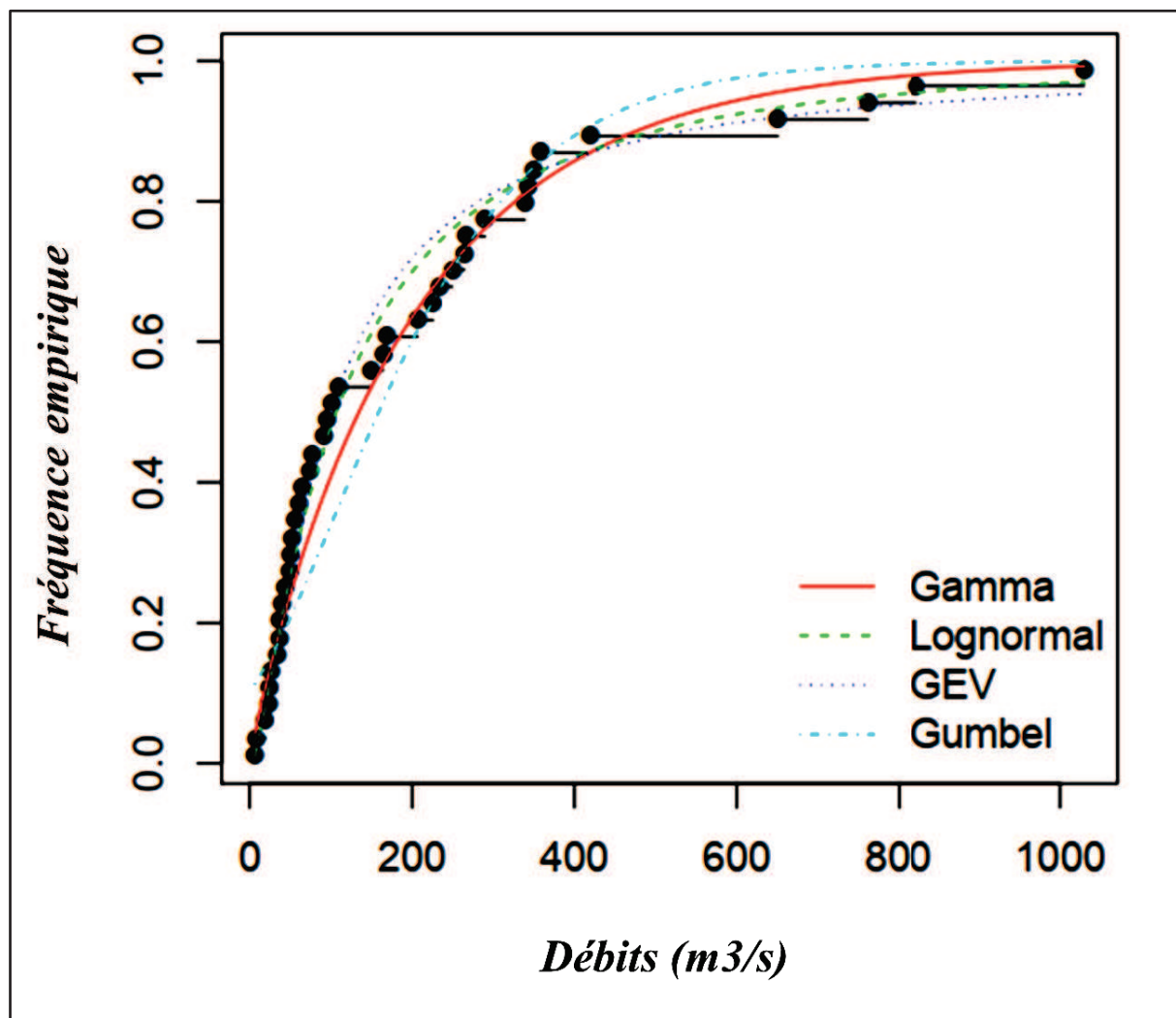


Figure 36: Ajustement graphique de lois à l'échantillon des débits maxima instantanés annuels de l'Ourika de 1970-1971 à 2014-2015

Tableau 12: Critères AIC et BIC pour les différentes distributions dans le bassin versant de l'Ourika.

| Loi        | P(Mi/x) | BIC    | AIC    |
|------------|---------|--------|--------|
| Log Normal | 89,01   | 568,17 | 564,56 |
| Gamma      | 5,55    | 573,72 | 570,10 |
| GEV        | 5,44    | 573,76 | 568,34 |
| Gumbel     | 0,00    | 596,42 | 592,80 |

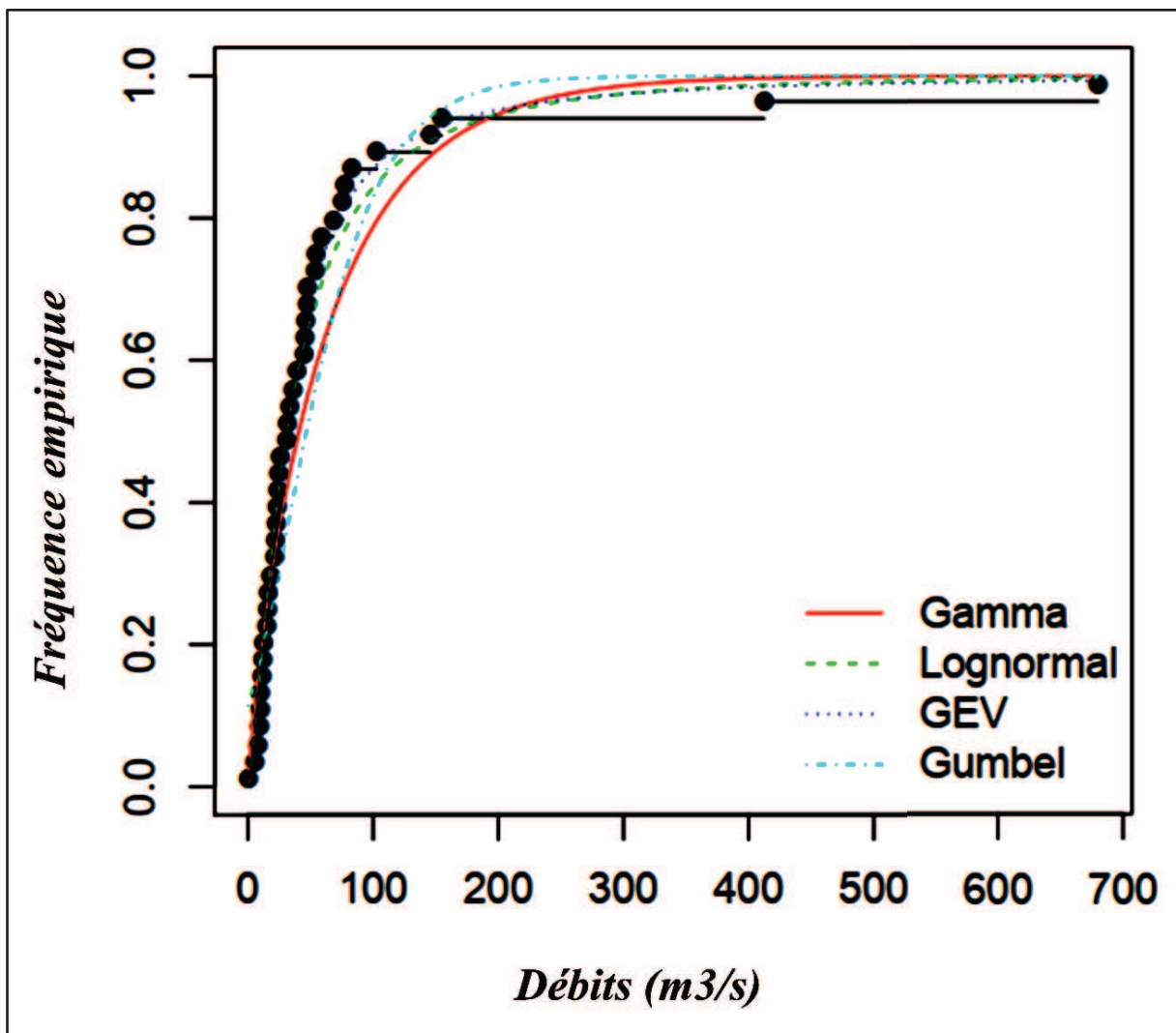
Ces critères nous ont donc permis d'utiliser la distribution Log Normal pour estimer les probabilités d'occurrence des inondations et leurs périodes de retour (tableau13).

**Tableau 13: Estimations des débits de pointe pour différentes périodes de retour dans l'Ourika.**

| Périodes de retour    | 5 ans | 10 ans | 20 ans | 50 ans | 100 ans |
|-----------------------|-------|--------|--------|--------|---------|
| Q (m <sup>3</sup> /s) | 284   | 465    | 697    | 1100   | 1490    |

**IV.2. Le bassin versant de la Rheraya à la station de Tahanaout :**

Les débits maximums annuels de la station de Tahanaout au bassin versant de la Rheraya s'ajustent mieux à la loi GEV. En effet les résultats obtenus montrent un bon ajustement de cette loi que ce soit sur le plan graphique (Fig. 37) ou statistique (Tableau14).



**Figure 37: Ajustement graphique de lois à l'échantillon des débits maxima instantanés annuels de la Rheraya de 1970-1971 à 2014-2015**

**Tableau 14: Critères AIC et BIC pour les différentes distributions dans le bassin versant de la Rheraya.**

| <b>Loi</b> | <b>P(Mi/x)</b> | <b>BIC</b> | <b>AIC</b> |
|------------|----------------|------------|------------|
| GEV        | 39,08          | 564,522    | 558,50     |
| Log Normal | 60,92          | 563,634    | 559,61     |
| Gamma      | 0,07           | 577,035    | 573,039    |
| Gumbel     | 0,00           | 611,441    | 607,42     |

Les valeurs obtenues nous ont permis d'utiliser cette distribution GEV afin d'estimer les probabilités d'occurrence d'inondation et les périodes de retour (tableau15).

**Tableau 15: Estimations des débits de pointe pour différentes périodes de retour dans la Rheraya.**

| <b>Périodes de retour</b>  | <b>5 ans</b> | <b>10 ans</b> | <b>20 ans</b> | <b>50 ans</b> | <b>100 ans</b> |
|----------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| <b>Q (m<sup>3</sup>/s)</b> | 78           | 130           | 209           | 378           | 585            |

## **V. Conclusion sur l'analyse fréquentielle :**

En se basant sur une série de données des débits instantanés qui varient entre 30 et 40 ans, l'objectif a été de déterminer les meilleures distributions des séries de débits de crues pour chaque bassin versant ainsi que l'estimation des débits de pointe de crues pour les différentes périodes de retour.

Les résultats obtenus ont démontré que la loi Log Normale est le meilleur choix à considérer pour les crues de l'Ourika, tandis que pour le bassin versant de la Rheraya, la distribution qui s'ajuste le mieux est la loi GEV. Ces résultats ont permis par la suite d'estimer les débits de crues potentielles selon les différentes périodes de retour. Les différents quantiles et leurs périodes de retours obtenus par cette analyse fréquentielle vont nous servir comme données d'entrée au niveau de la modélisation hydraulique, qui va faire l'objet du chapitre suivant.

# Chapitre V : Modélisation hydraulique

## I. Généralités sur la modélisation hydraulique :

Pour délimiter les zones inondées, des études récentes (Horritt et Bates, 2002; Noman *et al.*, 2001; Patro *et al.*, 2009; Sarhadi *et al.*, 2012) indiquent que les approches actuelles sont basées sur la simulation hydraulique intersectant les niveaux d'eau prédits avec une surface de plaine inondable. En effet, la simulation hydraulique vise à étudier la propagation de l'onde de crue dans le fleuve, à délimiter les plaines inondables et à simuler les niveaux d'eau. Les méthodes numériques peuvent consister en des modèles unidimensionnels ou bidimensionnels de la surface de l'eau (Horritt et Bates, 2002; Nardi *et al.*, 2006; Sarhadi *et al.*, 2012).

Ces modèles hydrauliques sont des outils mathématiques qui tentent de reproduire le mouvement des fluides et nécessitent généralement une estimation de leurs paramètres. Selon leur représentation spatiale du débit de la plaine inondable, les modèles peuvent être regroupés de manière dimensionnelle (Teng *et al.*, 2017).

## II. Outil de modélisation et données utilisées

La représentation la plus simple du débit de la plaine inondable consiste à traiter le débit comme unidimensionnel le long de la ligne médiane du chenal de la rivière (Brunner, 2016, Teng *et al.*, 2017). Le modèle unidimensionnel HEC-RAS (Brunner, 2016) définit un environnement de modélisation entièrement fonctionnel qui traite pratiquement tous les types de problèmes de réseau fluvial (Pistocchi et Mazzolie, 2002). Le modèle RAS (River Analysis System) du Centre d'ingénierie hydrologique (HEC) du Corps de l'armée américaine comprend un modèle à débit constant, un modèle à débit instable, ainsi qu'un large éventail de travaux hydrauliques et l'installation de conception hydraulique. En raison de sa grande capacité à décrire un large éventail de processus physiques, il s'est avéré très utile pour appuyer toutes les phases de la planification de la gestion des cours d'eau (Pistocchi et Mazzolie, 2002). Par ailleurs, du fait que la dynamique des écoulements des plaines d'inondation n'est pas linéaire, il est important d'utiliser des modèles numériques à différentes échelles afin d'effectuer une étude comparative permettant la détection des erreurs modélisées et d'obtenir une modélisation pointue et précise (Jung et Jasinski, 2015). Il a été prouvé que la représentation de la topographie réelle est l'un des paramètres les plus

importants dans la modélisation des inondations (Schuman *et al.*, 2007 ; Haile et Reintjes, 2005).

### II.1. L’outil de modélisation hydraulique utilisé :

L'outil utilisé pour effectuer cette simulation est le logiciel HEC-RAS (4.1.0), qui est un logiciel intégré pour l'analyse hydraulique. Cette extension de modélisation permet de gérer des aspects quasi 2D du débit en reliant la géométrie de la rivière à un modèle de terrain numérique sous la forme d'un réseau irrégulier triangulé. De cette manière, la sortie distribuée fournie par HEC RAS pour chaque section transversale est interpolée entre les sections transversales et conduit à une profondeur d'eau et à une surface de vitesse de l'eau (Pistocchi et Mazzoli, 2002). Le système HEC RAS contient trois composants d'analyse fluviale unidimensionnels pour: (1) les calculs de profil de surface d'eau à écoulement constant; (2) simulation d'écoulement instable (hydrodynamique unidimensionnelle et bidimensionnelle); (3) calculs de transport de sédiments à la limite mobile. Un élément clé est que ces composants utilisent une représentation de données géométriques commune et des routines de calcul géométriques et hydrauliques communes (Brunner, 2016).

Au niveau de HEC-RAS, la morphologie du cours d'eau est représentée par une série de sections transversales appelée section de rivière. La distance entre les sections transversales adjacentes est appelée la longueur de la portée. L'outil HEC RAS est capable d'effectuer des calculs unidimensionnels du profil de la surface de l'eau dans le cas de l'hydrodynamique de la surface de l'eau à flux constant et de l'écoulement instable (Brunner, 2016). Pour le premier cas, les profils sont calculés d'une section à l'autre en résolvant les équations de base, dont l'équation d'énergie, qui s'écrit comme suit:

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 v_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 v_1^2}{2g} + h_e$$

Où  $Z_1$ ,  $Z_2$  sont les altitudes du chenal principal inverse ;  $Y_1$ ,  $Y_2$  les profondeurs de l'eau aux sections transversales ;  $V_1$ ,  $V_2$  les vitesses moyennes (débit total / surface totale du flux) ;  $a_1$ ,  $a_2$  les coefficients de pondération des vitesses ;  $g$  l'accélération gravitationnelle et  $h_e$  la perte de charge énergétique.

La perte de charge d'énergie ( $h_e$ ) entre deux sections transversales comprend les pertes par frottement et les pertes par contraction ou expansion. L'équation de la perte de charge énergétique est la suivante:

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{a_2 v_2^2}{2g} - \frac{a_1 v_1^2}{2g} \right|$$

Où L est la longueur de portée pondérée en sortie ;  $S_f$  est la pente représentative du frottement entre deux sections et C le coefficient d'affaiblissement de dilatation ou de contraction.

La longueur d'atteinte pondérée en distance, L, est calculée comme suit:

$$L = \frac{L_{lob}\bar{Q}_{lob} + L_{ch}\bar{Q}_{ch} + L_{rob}\bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}}$$

Où  $L_{lob}$ ,  $L_{ch}$  et  $L_{rob}$  sont les longueurs des sections transversales spécifiées pour l'écoulement, respectivement dans les zones d'ondulation gauche, principale et droite. Et  $\bar{Q}_{lob}$ ,  $\bar{Q}_{ch}$  et  $\bar{Q}_{rob}$  sont la moyenne arithmétique des flux entre les sections respectivement pour les zones de débordement gauche, principale et droite.

Dans le deuxième cas, «hydrodynamique à écoulement instable», HEC RAS utilise l'équation du moment. La deuxième loi de Newton exprime la conservation de l'élan comme suit:

$$\sum F_x = \frac{d\vec{M}}{dt}$$

La conservation de la quantité de mouvement pour un volume de contrôle indique que le taux de quantité de mouvement net entrant dans le volume (flux de quantité de mouvement) plus la somme de toutes les forces externes agissant sur le volume, doivent être égaux au taux d'accumulation de quantité de mouvement. C'est une équation vectorielle appliquée dans la direction x. Le flux de quantité de mouvement (MV) est la masse de fluide multipliée par le vecteur vitesse dans la direction de l'écoulement. Trois forces seront considérées: (1) la pression, (2) la pesanteur et (3) la traînée limite, ou force de friction (Brunner, 2016).

La détermination du débit total et du coefficient de débit par HEC-RAS se fait en subdivisant chaque section en trois parties: rive droite, rive gauche et canal. Le flux est ensuite calculé dans chaque section à l'aide de l'équation de Manning:

$$Q = K(S_f)^{0,5}$$

Où K représente le moyen de transport et  $S_f$  la pente de frottement.

Le coefficient de rugosité de Manning est l'un des paramètres principaux du modèle hydraulique, car il définit la réaction du débit de la rivière en fonction du terrain couvert en

influençant la vitesse. Pour cela, la cartographie de l'occupation des sols est nécessaire afin de définir ce coefficient de rugosité. En effet, l'utilisation des données d'occupation des sols numérisées à partir d'une image de GeoEye de 2009, ainsi que les données de lithologie, de talus et de couverture végétale (Werren *et al.*, 2015), permet de prédire les caractéristiques du sol sur la base d'une analyse de corrélations environnementale (McKenzie et Ryan 1999, McBratney *et al.*, 2003, Werren *et al.*, 2015). À cet effet, nous avons utilisé une carte d'occupation du sol, qui nous a permis d'attribuer à chaque type de sol un coefficient de rugosité selon la table de rugosité de Manning.

## **II.2. Les données utilisées pour la modélisation hydraulique :**

Afin de réaliser la modélisation hydraulique au niveau du bassin versant de l'Ourika, nous avons besoin d'un modèle numérique de terrain qui représente la donnée principale. Dans ce cadre, nous avons utilisé le DEM ASTER d'une résolution de 30 m que nous avons comparé avec une autre représentation de terrain à haute résolution (4 m) issue d'un couple de deux satellites optiques d'observation de la Terre. Les satellites Pléiades.

### **II.2.1. La donnée Aster a 30 m :**

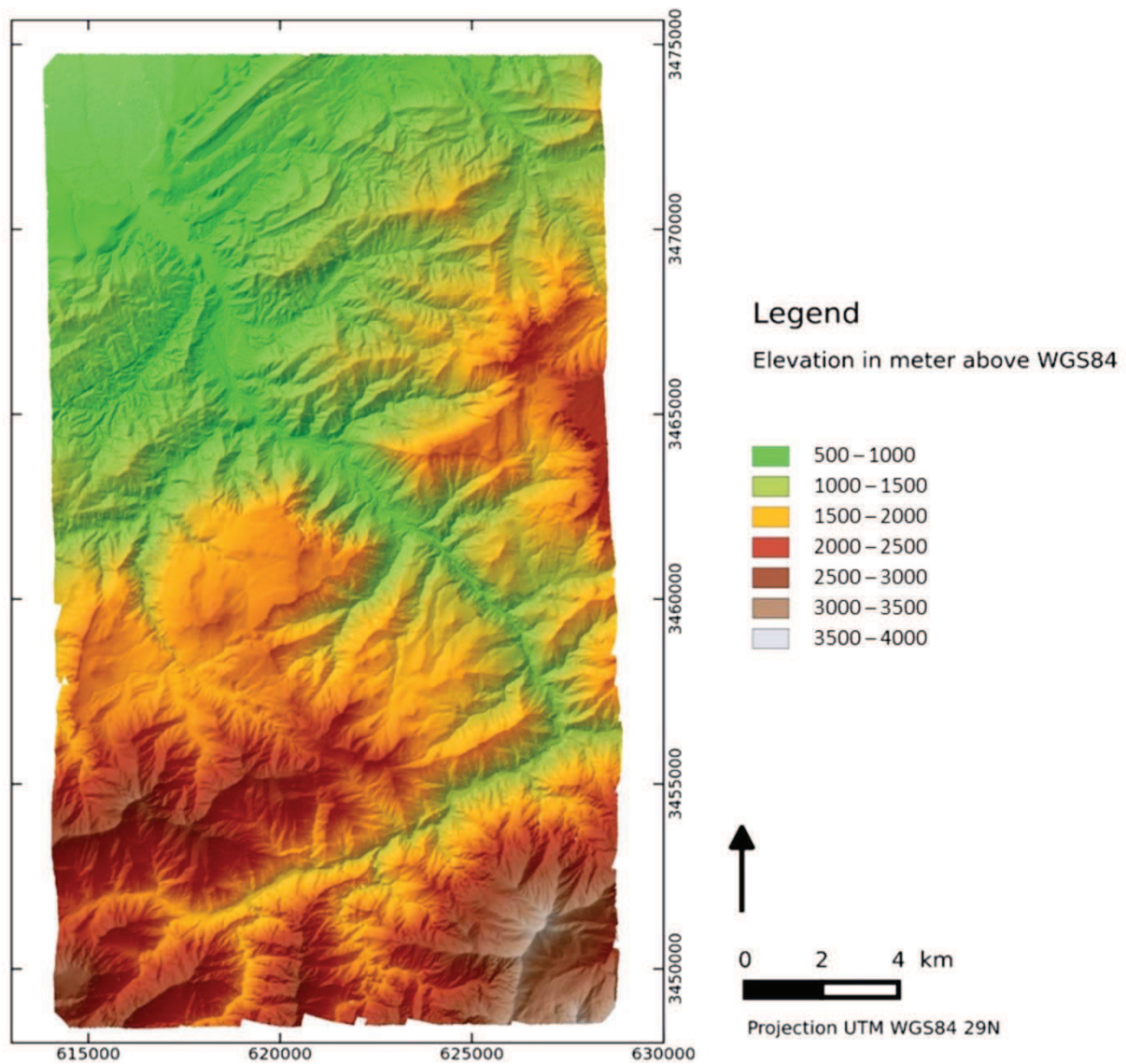
ASTER est un imageur multispectral avancé lancé à bord du satellite Terra de la NASA en décembre 1999. Il possède trois bandes spectrales visibles dans l'infrarouge proche (VNIR), six bandes infrarouges à ondes courtes (SWIR) et cinq bandes dans les régions infrarouges thermiques (TIR), avec des résolutions au sol de 15, 30 et 90 m (Yamaguchi *et al.*, 1998; Forkuor et Maathuis, 2012). Le ministère de l'Économie, du Commerce et de l'Industrie du Japon (METI) et la NASA des États-Unis ont publié conjointement un DEM global basé sur les images ASTER acquises depuis son lancement (1999) jusqu'à la fin du mois d'août 2008. Il couvre les zones situées entre 83 ° N et 83 ° S, y compris 22 600 dalles 10 par 10. Le GDEM est fourni avec une résolution d'une seconde d'arc (30 m) et est référencé au système géodésique mondial WGS 1984. Les altitudes sont donc calculées par rapport au géoïde WGS 84 EGM96 (Fujisada *et al.*, 2005; Frukuer et Maathuis , 2012).

### **II.2.2. La donnée Pléiades à haute résolution :**

Le lancement des satellites Pléiades fin 2011 et 2012 a permis de développer de nouvelles capacités d'acquisition d'images optiques à très haute résolution, dans le domaine particulier de la gestion de crise, mais aussi plus largement dans différents thèmes de l'observation de la Terre (Yésou *et al.*, 2015). Le système Pléiades consiste en une constellation de deux

satellites identiques pour l'observation optique VHR panchromatique (PA) et multispectral (XS) de la surface de la Terre. Les deux satellites volent sur des orbites héliosynchrones avec une inclinaison de 98,2 ° et un décalage de 180° l'une de l'autre, ce qui permet un temps de visite minimum de 24h. Le système Pléiades est le premier système du genre capable d'acquérir au moins trois images presque synchrones de la même zone avec un angle stéréo variant entre 6 ° et 28° (Bagnardi *et al.*, 2016). Cette capacité stéréoscopique permet de réaliser un modèle d'élévation numérique (DEM) précis et haute résolution de la surface d'un terrain complexe (Lacroix *et al.*, 2015). En juillet 2016, nous avons fait l'acquisition d'une paire stéréo Pléiades 1B pour le bassin versant de l'Ourika (Fig.38). Nous avons utilisé le pipeline stéréo Ames (Shean *et al.*, 2016) pour générer un DEM avec une résolution en pixels de 4 m dans le système cartographique UTM en suivant la procédure décrite dans Marti *et al.*, (2016). L'erreur circulaire de géolocalisation horizontale absolue (CE90) des images de Pléiades est inférieure à 6,5 m (Gleyzes *et al.*, 2012). Cette erreur horizontale absolue peut être considérablement réduite en utilisant un seul point de contrôle au sol (Lacroix *et al.*, 2015). Des études antérieures utilisant des images stéréoscopiques de Pléiades dans des zones montagneuses à la végétation clairsemée indiquent que la précision relative dans la direction verticale atteint 0,6 m (Lacroix *et al.*, 2015). Par ailleurs, on sait que la précision du radiomètre ASTER GDEM (ASTER: radiomètre perfectionné d'émission et de réflexion thermique; GDEM: Modèle numérique d'altitude numérique) est d'un ordre de grandeur supérieure dans la même configuration de terrain (Lacroix *et al.*, 2015).



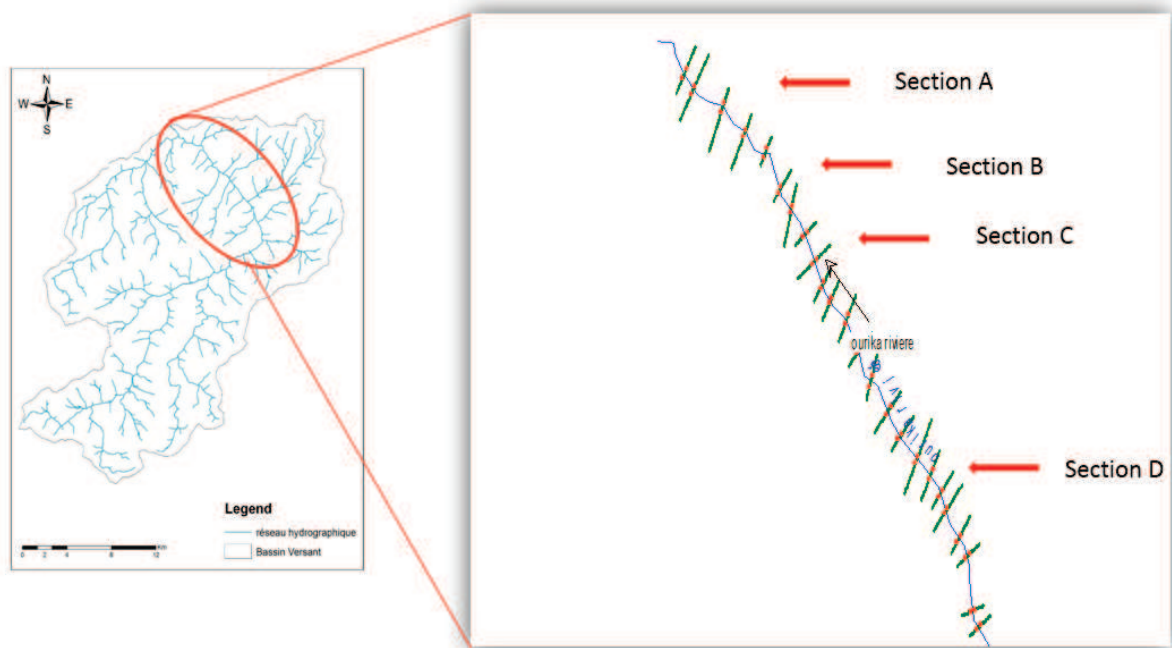


**Figure 38: Modèle numérique d'élévation pour le bassin versant de l'Ourika avec une résolution Pleiades 4 m.**

### **III. Résultats de la modélisation hydraulique**

#### **III.1. Bassin versant de l'ourika**

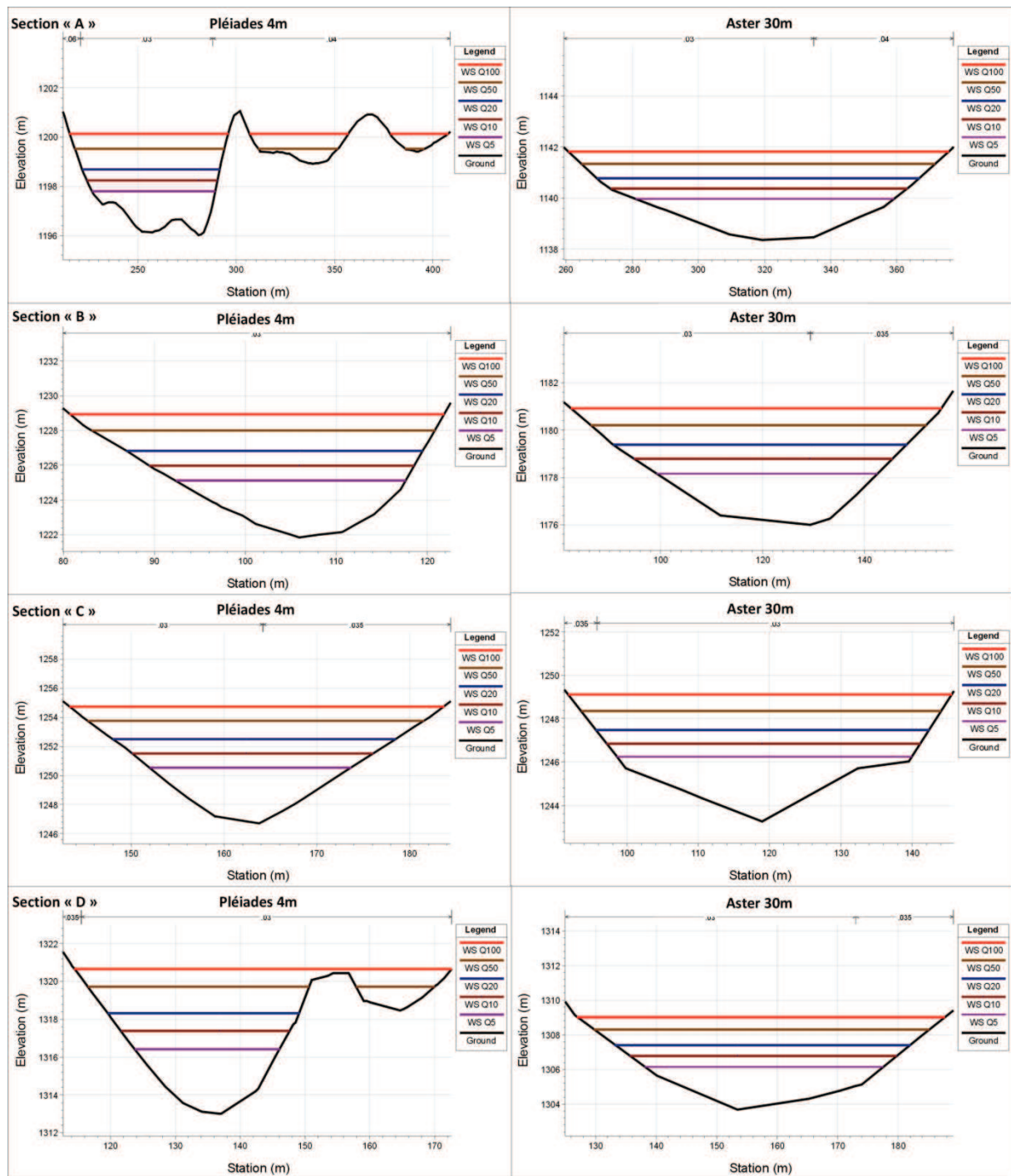
Afin d'avoir des résultats significatifs, plusieurs sections ont été tracées sur le tronçon étudié au niveau de l'Ourika. Nous avons choisi la représentation des sections les plus pertinentes en termes de visibilité des niveaux d'eau selon les différentes périodes de retour (Fig. 39).



**Figure 39: Localisation des sections étudiées. (O. Bennani)**

### **III.1.1. Comparaison des coupes transversales :**

Les résultats présentés ici nous permettent de comparer le MNT Pléiades au MNT ASTER sur la base de la résolution. Les sections transversales avec Pléiades MNT et ASTER MNT ainsi que les hauteurs d'eau sont représentées sur la figure 40. Les hauteurs d'eau étant calculées pour différentes périodes de retour dans chaque section considérée. La comparaison des différentes sections obtenues avec les deux résolutions montre des différences importantes. Les MNT dérivés de Pléiades permettent d'avoir une topographie très précise, réaliste par rapport aux observations au sol. Nous pouvons en conclure que les sections, en particulier (A) et (D), ne sont pas correctement reproduites dans le produit ASTER et qu'elles ne sont pas réalistes, en raison du fort lissage causé par la faible résolution.



**Figure 40: Illustration des coupes transversales pour les différentes sections.**  
(O. Bennani)

### III.1.2. Comparaison des résultats des deux modèles numériques du terrain :

Pour les différentes périodes de retour, les tableaux 16, 17, 18 et 19 donnent une vue d'ensemble sur les caractéristiques des débits calculés pour chaque section étudiée, en termes de superficie inondée et de niveau maximal de l'eau en tant qu'éléments de base pour l'évaluation des risques d'inondation. Ces paramètres nous donnent plusieurs indications sur la

dynamique des flux dans la zone étudiée, telles que les pentes de chaque section, en fonction de la résolution du MNT. Lorsque nous comparons les résultats entre les deux résolutions des MNT utilisées, nous constatons une différence remarquable, notamment en ce qui concerne les niveaux d'eau. Ceux calculés à partir du MNT de Pléiades sont plus élevés que ceux obtenus avec le MNT d'ASTER. Ce dernier sous-estime les niveaux d'eau de -46% et -25% en fonction de la section de la rivière. En plus, bien qu'avec des hauteurs d'eau sous estimées, les surfaces inondées obtenues avec le MNT ASTER sont en moyenne 15% plus grandes que les zones inondées obtenues avec le MNT Pleiades. Cela est dû à une résolution médiocre qui ne permet pas une reproduction correcte des pentes abruptes de chaque côté du lit de la rivière (en particulier pour les sections A et D). Cela indique que l'ASTER MNT fournirait des estimations peu réalistes des cartes d'inondation, en raison de sa résolution grossière qui ne permet pas de représenter le canal.

Il est nécessaire de valider l'étendue de l'inondation et les niveaux d'eau simulés par le modèle HEC-RAS avec des mesures sur le terrain. Cependant, de telles enquêtes de terrain n'ont pas été organisées systématiquement dans le bassin de l'Ourika après les inondations. Seulement pour la crue de 1995, des analyses post-inondation ont été effectuées par l'agence du bassin hydraulique de Tensift. Les estimations des niveaux d'eau atteints lors de l'inondation de 1995 sont basées sur les traces laissées par les crues et les témoignages de la population locale (Bien qu'ils puissent être associés à quelques incertitudes). La figure 41 montre le niveau d'eau observé sur un bâtiment de la section "C" située dans la région d'Oulmes, qui a subi lors de l'inondation de 1995 des dégâts impressionnants. Selon les témoignages de résidents, les hautes eaux ont été estimées à environ 7 m de hauteur (à partir du fond du lit) (Figure 40). Ceci valide les résultats obtenus à l'aide de la modélisation hydraulique avec Pleiades MNT. Le tableau 17, indique en effet que la hauteur d'eau estimée pour l'inondation avec une période de retour de 50 ans, qui correspondrait à l'inondation de 1995, est de 6,9 m. Alors que pour la modélisation effectuée avec ASTER MNT, le tableau montre que pour la même période de retour, le niveau d'eau n'est que de 5,09 m. Cela indique que, par rapport aux niveaux d'eau obtenus avec le MNT Aster, les niveaux d'eau obtenus avec le MNT Pleiades sont plus proches de ceux observés en réalité. Cependant, ce résultat doit être confirmé par un plus grand nombre d'enquêtes sur le terrain et la notification de l'extension effective des inondations.

**Tableau 16: Résultats de la quantification des éléments de l'inondation relative à différents débits de pointe - section "A".**

| Périodes de retour | Q total (m3/s) | Niveau d'eau (m) |              | Vitesse max. (m/s) |              | Zone d'écoulement (m <sup>2</sup> ) |              | Hauteur d'eau |              |
|--------------------|----------------|------------------|--------------|--------------------|--------------|-------------------------------------|--------------|---------------|--------------|
|                    |                | Aster 30 m       | Pléiades 4 m | Aster 30 m         | Pléiades 4 m | Aster 30 m                          | Pléiades 4 m | Aster 30 m    | Pléiades 4 m |
| 5 ans              | 284            | 1139.97          | 1332.32      | 3.31               | 4.27         | 78.33                               | 54.84        | 1.6           | 2.99         |
| 10 ans             | 465            | 1140.37          | 1333.14      | 3.77               | 4.61         | 112.24                              | 83.09        | 2             | 3.81         |
| 20 ans             | 697            | 1140.78          | 1333.85      | 4.19               | 5.05         | 150.19                              | 112.37       | 2.41          | 4.52         |
| 50 ans             | 1100           | 1141.35          | 1334.82      | 4.72               | 5.56         | 208.48                              | 158.38       | 2.98          | 5.49         |
| 100 ans            | 1490           | 1141.84          | 1335.6       | 5.08               | 5.96         | 262.7                               | 199.92       | 3.47          | 6.27         |

**Tableau 17: Résultats de la quantification des éléments de l'inondation relative à différents débits de pointe - section "B".**

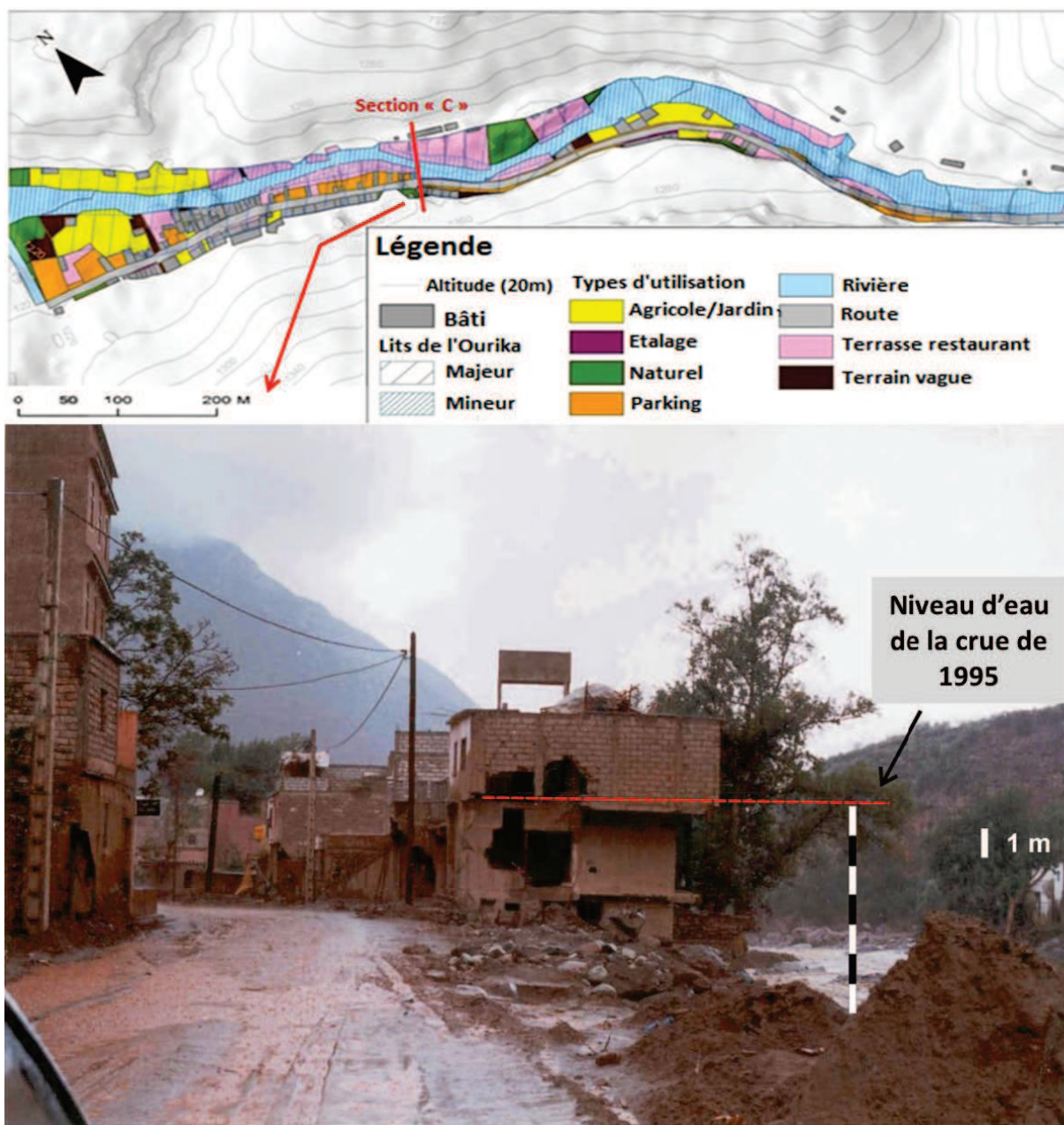
| Périodes de retour | Q total (m3/s) | Niveau d'eau (m) |              | Vitesse max. (m/s) |              | Zone d'écoulement (m <sup>2</sup> ) |              | Hauteur d'eau |              |
|--------------------|----------------|------------------|--------------|--------------------|--------------|-------------------------------------|--------------|---------------|--------------|
|                    |                | Aster 30 m       | Pléiades 4 m | Aster 30 m         | Pléiades 4 m | Aster 30 m                          | Pléiades 4 m | Aster 30 m    | Pléiades 4 m |
| 5 ans              | 284            | 1178.17          | 1225.12      | 3.93               | 4.49         | 62.95                               | 52.06        | 2.18          | 3.27         |
| 10 ans             | 465            | 1178.79          | 1225.99      | 4.42               | 5.05         | 92.17                               | 75.85        | 2.8           | 4.14         |
| 20 ans             | 697            | 1179.39          | 1226.84      | 4.86               | 5.55         | 124.83                              | 102.19       | 3.4           | 4.99         |
| 50 ans             | 1100           | 1180.22          | 1228.01      | 5.4                | 6.14         | 175.56                              | 143.38       | 4.23          | 6.16         |
| 100 ans            | 1490           | 1180.91          | 1228.96      | 5.75               | 6.6          | 224.03                              | 180.72       | 4.92          | 7.11         |

**Tableau 18: Résultats de la quantification des éléments de l'inondation relative à différents débits de pointe - section "C".**

| Périodes de retour | Q total (m <sup>3</sup> /s) | Niveau d'eau (m) |              | Vitesse max. (m/s) |              | Zone d'écoulement (m <sup>2</sup> ) |              | Hauteur d'eau |              |
|--------------------|-----------------------------|------------------|--------------|--------------------|--------------|-------------------------------------|--------------|---------------|--------------|
|                    |                             | Aster 30 m       | Pléiades 4 m | Aster 30 m         | Pléiades 4 m | Aster 30 m                          | Pléiades 4 m | Aster 30 m    | Pléiades 4 m |
| 5 ans              | 284                         | 1246.26          | 1250.54      | 3.84               | 4.91         | 60.93                               | 49,2         | 3             | 3,7          |
| 10 ans             | 465                         | 1246.85          | 1251.52      | 4.44               | 5.49         | 86.19                               | 72,59        | 3.59          | 4,68         |
| 20 ans             | 697                         | 1247.49          | 1252.5       | 4.93               | 5.91         | 115.08                              | 100,01       | 4.23          | 5,66         |
| 50 ans             | 1100                        | 1248.35          | 1253.76      | 5.64               | 6.47         | 156.99                              | 142,01       | 5.09          | 6,92         |
| 100 ans            | 1490                        | 1249.13          | 1254.75      | 6.11               | 6.92         | 197.51                              | 179,98       | 5.87          | 7,91         |

**Tableau 19: Résultats de la quantification des éléments de l'inondation relative à différents débits de pointe - section "D".**

| Périodes de retour | Q total (m <sup>3</sup> /s) | Niveau d'eau (m) |              | Vitesse max. (m/s) |              | Zone d'écoulement (m <sup>2</sup> ) |              | Hauteur d'eau |              |
|--------------------|-----------------------------|------------------|--------------|--------------------|--------------|-------------------------------------|--------------|---------------|--------------|
|                    |                             | Aster 30 m       | Pléiades 4 m | Aster 30 m         | Pléiades 4 m | Aster 30 m                          | Pléiades 4 m | Aster 30 m    | Pléiades 4 m |
| 5 ans              | 284                         | 1306.13          | 1225,12      | 3.9                | 4,49         | 59.98                               | 52,06        | 2.47          | 3,27         |
| 10 ans             | 465                         | 1306.76          | 1225,99      | 4.43               | 5,05         | 86.46                               | 75,85        | 3.1           | 4,14         |
| 20 ans             | 697                         | 1307.41          | 1226,84      | 4.88               | 5,55         | 116.25                              | 102,19       | 3.75          | 4,99         |
| 50 ans             | 1100                        | 1308.3           | 1228,01      | 5.42               | 6,14         | 162.7                               | 143,38       | 4.64          | 6,16         |
| 100 ans            | 1490                        | 1309.01          | 1228,96      | 5.88               | 6,6          | 204.27                              | 180,72       | 5.35          | 7,11         |

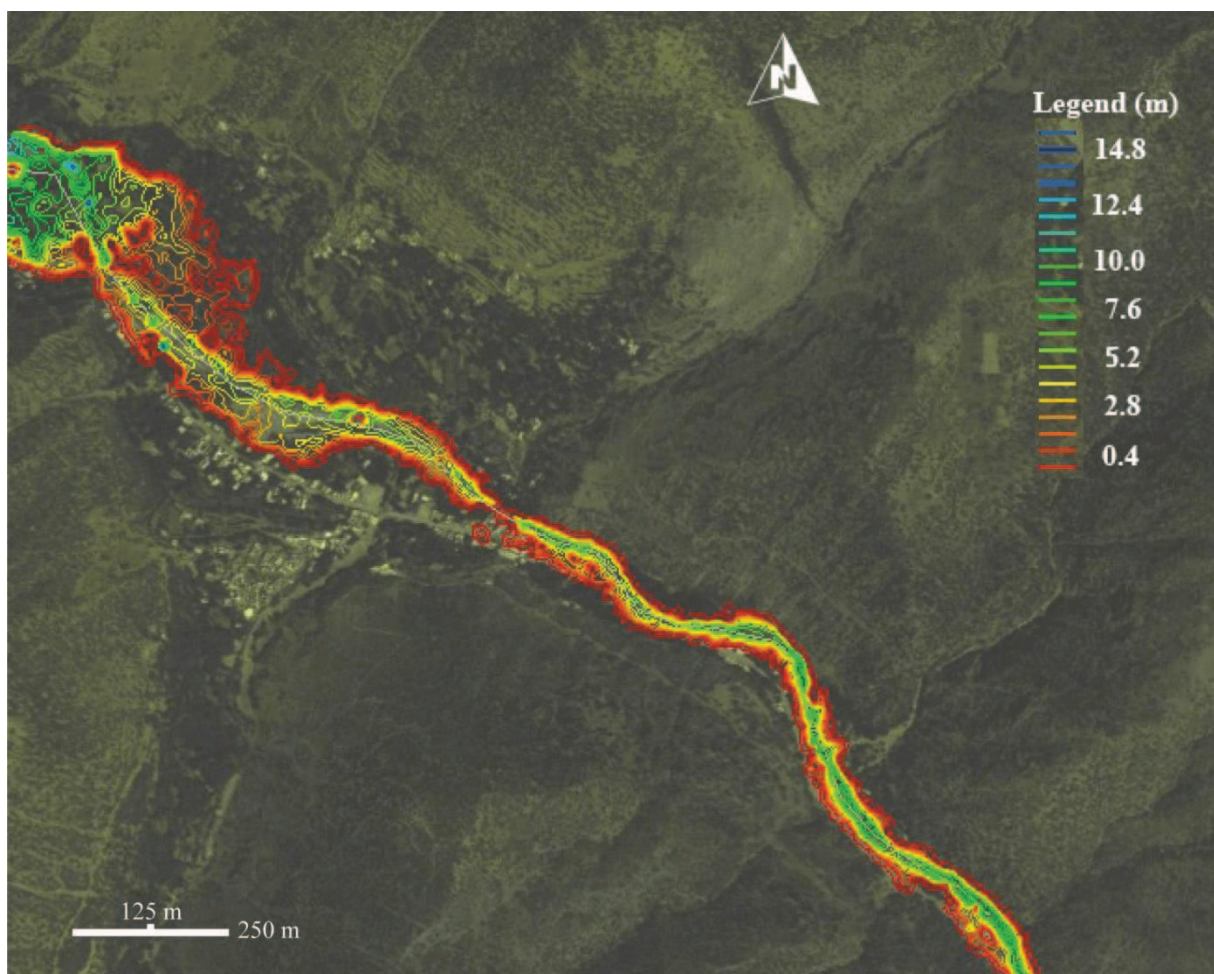


**Figure 41: Section « C » et hauteur maximale probable des eaux de la crue de l'Ourika du 17 août 1995.**

### III.1.3. Cartographie des zones inondables :

À partir des résultats de la modélisation hydraulique, nous pouvons également visualiser les résultats de la propagation de l'inondation pour différentes périodes de retour sur une carte 2D. Pour cela, les résultats de la simulation hydraulique sont exploités par des outils SIG afin de créer des cartes de la plaine inondable pour une inondation correspondant par exemple à une période de retour de 100 ans (Fig.42). La simulation de l'extension latérale de ces inondations met en évidence des débordements importants du cours d'eau sur ses rives. Selon

l'ampleur des inondations obtenues pour différentes périodes de retour, les inondations peuvent inonder les champs agricoles, les bâtiments et peuvent également couper la route provinciale P-2017, qui est la seule route reliant la vallée de l'Ourika à la ville de Marrakech. L'utilisation des données de Pléiades permet de décrire la gravité d'un événement en termes d'extension spatiale, car elle permet une cartographie détaillée des zones inondables (Fig.42). Nous observons que certaines parties des berges sont plus exposées que d'autres aux inondations en raison de la différence d'altitude. L'étendue de l'inondation et la profondeur de l'eau sont beaucoup plus élevées en aval qu'en amont du profil de la rivière. Avec le MNT de Pléiades, on observe l'effet de la migration en aval de l'inondation: l'extension de l'inondation dans la partie amont reste proche du lit principal du fleuve, tandis que la partie aval est fortement affectée par des zones inondées largement étendues en raison de l'apport d'eau de l'amont et des affluents et surtout à cause d'un encaissement plus faible de la vallée. Ce constat n'était pas aussi possible lorsqu'on utilise le MNT ASTER, qui a une représentation peu précise des sections du cours d'eau.



**Figure 42: Cartographie des plaines inondables à l'aide des Pléiades de 4 m. (O. Bennani)**



### III.2. Bassin versant de la Rheraya :

La modélisation hydraulique a été réalisée sur un tronçon aval du bassin versant de la Rheraya. Il s'agit de la zone la plus vulnérable, où il y a le plus d'habitations et d'infrastructures susceptibles d'être endommagées en cas d'inondation.

En se référant aux résultats de l'analyse fréquentielle, les débits instantanés maximaux dérivés de la distribution GEV pour les périodes de retour de 5, 10, 20, 50 et 100 ans ont été utilisés comme données d'entrée de l'outil de modélisation HEC RAS.

Sur la totalité des sections étudiées, nous allons présenter les sections les plus pertinentes, qui permettent une bonne visibilité des résultats obtenus par le modèle (fig.43).

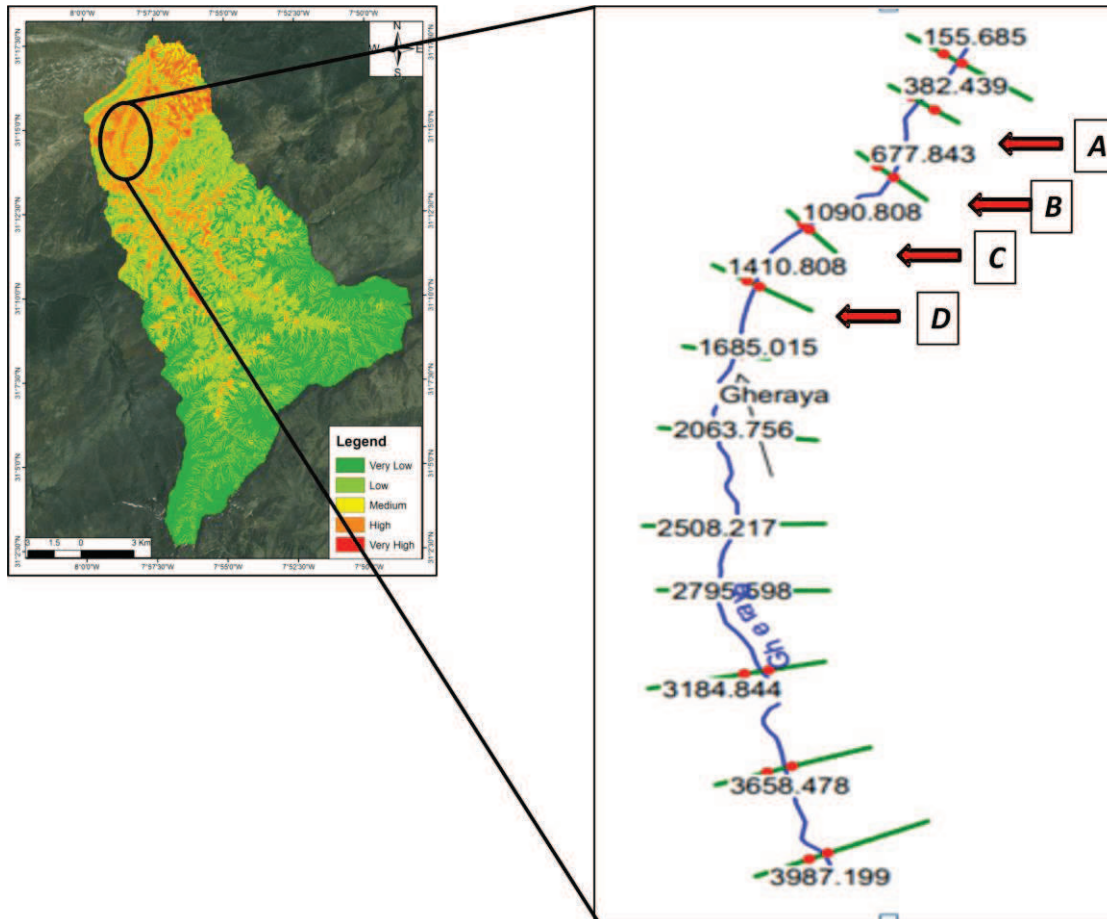
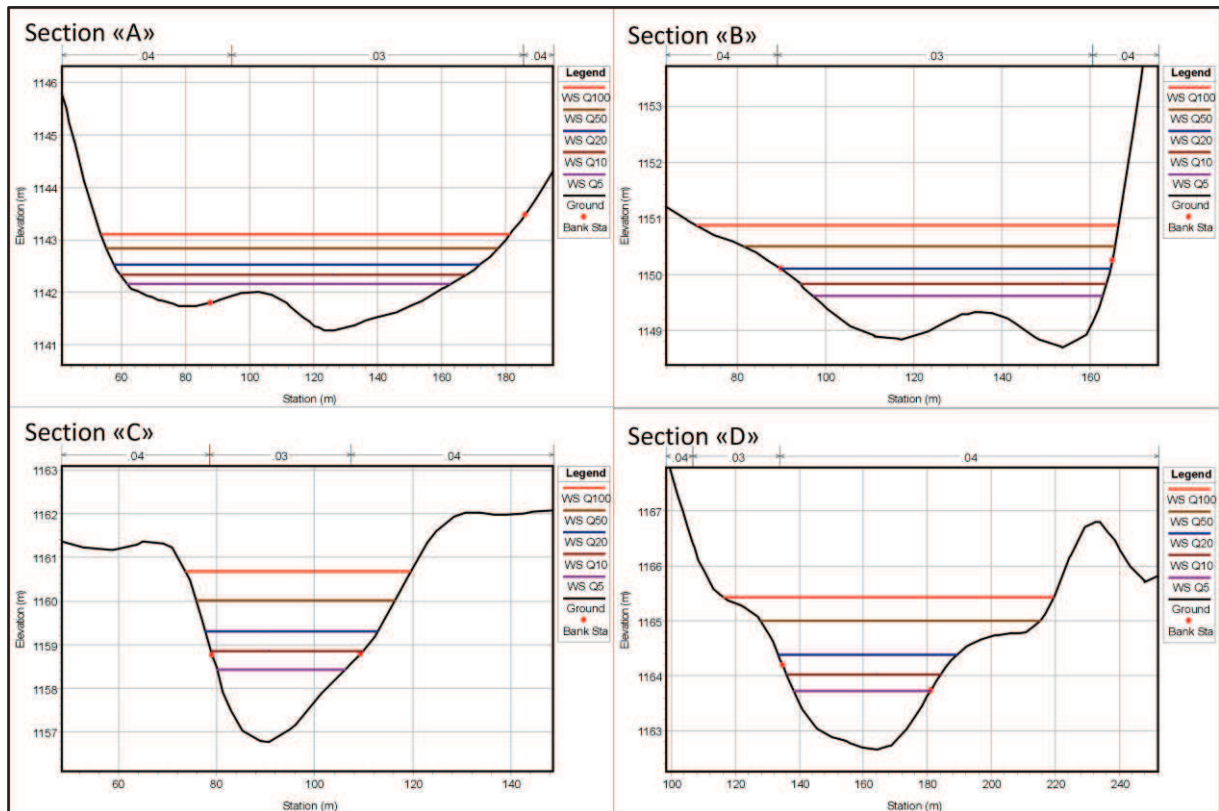


Figure 43: Localisation des sections étudiées au niveau du tronçon de la Rheraya.  
(O. Bennani)

Une fois le modèle tourné, nous avons obtenu pour chaque section une coupe transversale, qui renseigne sur les hauteurs d'eau selon les différentes périodes de retour en fonction des élévations (Fig.44).



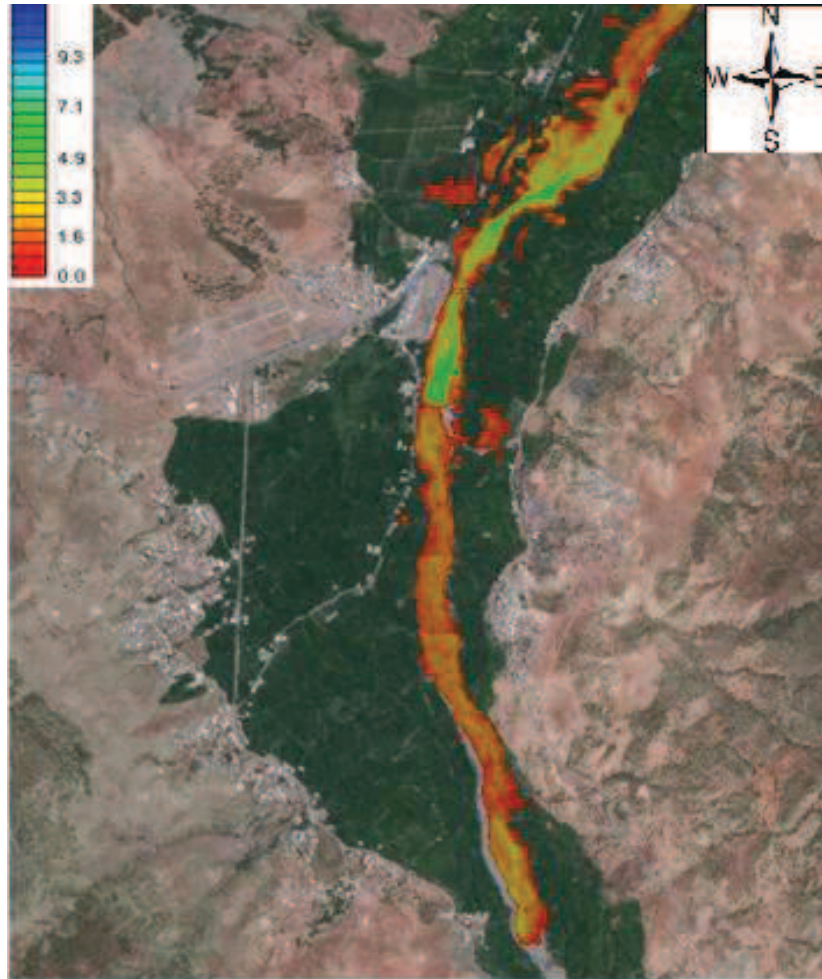
**Figure 44: Coupes transversales des sections et des niveaux d'eau calculés pour différentes périodes de retour. (O. Bennani)**

Les coupes transversales montrent les hauteurs d'eau pour différentes périodes de retour. Comme l'illustre la figure 44, les périodes de retour de 50 et 100 ans produisent à l'évidence des niveaux d'eau assez élevés et des plaines inondables importantes. Ceci indique la gravité de l'inondation estimée pour ces périodes de retour. Dans ce cadre, le tableau 20 donne une vue globale sur les caractéristiques des débits calculés pour les quatre sections étudiées. Ceci, en termes de zone inondée et de niveau d'eau maximal. Ceux-ci sont en effet des éléments importants pour l'évaluation des risques d'inondation. Ces paramètres fournissent des indications importantes sur la dynamique des flux dans la zone étudiée.

**Tableau 20: Caractéristiques des inondations pour différentes sections de la Rheraya**

| <b>Période de retour</b> | <b>Q max. (m<sup>3</sup>s)</b> | <b>Zone d'écoulement (m<sup>2</sup>)</b> | <b>Hauteur d'eau (m)</b> | <b>Zone d'écoulement (m<sup>2</sup>)</b> | <b>Hauteur d'eau (m)</b> | <b>Zone d'écoulement (m<sup>2</sup>)</b> | <b>Hauteur d'eau (m)</b> | <b>Zone d'écoulement (m<sup>2</sup>)</b> | <b>Hauteur d'eau (m)</b> |
|--------------------------|--------------------------------|--|--------------------------|--|--------------------------|--|--------------------------|--|--------------------------|
| <b>5 ans</b>             | 78                             | 42.66                                    | 0.89                     | 35.80                                    | 0.92                     | 26.55                                    | 1.65                     | 31.16                                    | 1.06                     |
| <b>10 ans</b>            | 130                            | 60.82                                    | 1.06                     | 51.18                                    | 1.15                     | 38.83                                    | 2.08                     | 45.17                                    | 1.37                     |
| <b>20 ans</b>            | 209                            | 82.69                                    | 1.26                     | 70.35                                    | 1.41                     | 54.01                                    | 2.53                     | 63.36                                    | 1.72                     |
| <b>50 ans</b>            | 378                            | 118.81                                   | 1.56                     | 101.64                                   | 1.81                     | 80.92                                    | 3.24                     | 107.48                                   | 2.35                     |
| <b>100 ans</b>           | 585                            | 153.61                                   | 1.84                     | 135.85                                   | 2.18                     | 109.79                                   | 3.9                      | 148.03                                   | 2.77                     |

À partir des résultats du modèle hydraulique, nous pouvons visualiser sur une carte, l'étendue de l'inondation pour différentes périodes de retour. Pour cela, les résultats de la simulation hydraulique sont exploités par un outil SIG pour créer la carte de la plaine inondable pour la crue centennale (Fig. 45). La simulation de l'étendue latérale de ces inondations met en évidence des débordements importants du cours d'eau sur ses rives. Selon les niveaux d'eau pour différentes périodes de retour, les inondations peuvent inonder des champs et des bâtiments.



**Figure 45: Cartographie de l'extension de la plaine inondable. (O. Bennani)**

#### **IV. Conclusion sur la modélisation hydraulique :**

Le but de ce chapitre était de comparer deux différents produits MNT dans leur aptitude à cartographier le risque d'inondation d'abord dans le bassin versant d'Ourika. Les résultats de la modélisation hydraulique montrent évidemment que le MNT à basse résolution (ASTER 30 m) sous-estime le risque d'inondation. En effet il existe des différences significatives dans les niveaux d'eau entre le MNT ASTER et le DEM issu des Pléiades. Ce dernier a permis d'avoir une précision plus élevée de la topographie (Bennani *et al.*, 2019a).

Nous concluons donc que les images du MNT Aster 30 m ne sont pas très adaptées à ce type d'exercice. En outre, le MNT dérivé des images de Pléiades représente un modèle plus approprié pour l'élévation. Les relevés sur le terrain permettent de reproduire plus précisément les niveaux d'eau lors d'inondations extrêmes. Ces nouvelles données spatiales à haute résolution de Pléiades offrent des opportunités réelles pour la cartographie des risques d'inondation sur un terrain aussi complexe. En raison de la disponibilité récente de ces

données d'altitude haute résolution, il est possible de mettre en œuvre ce type d'approche dans différents bassins versants afin de produire des cartes précises des plaines inondables.

Par ailleurs, les résultats de la modélisation hydraulique réalisée sur le bassin versant de la Rheraya, en utilisant également la donnée Pléiades 4m, nous ont permis de simuler, d'une part, le niveau d'eau de certaines sections et, d'autre part, de distinguer les zones sujettes aux inondations pour différentes périodes de retour. La carte de la zone d'inondation montre clairement que, pour des crues cinquantennales et surtout centennales, le niveau des eaux est assez élevé. Par conséquent, il est extrêmement important d'assurer une protection sur les deux rives du cours d'eau.

# Chapitre VI : Application de l'approche Géo-morpho-climatique à la cartographie du risque d'inondation.

Dans le présent chapitre, nous allons cartographier les zones à risque d'inondation dans le bassin versant de la Rheraya, en utilisant une méthode paramétrique traitée dans un environnement SIG. Il s'agit d'une approche géo-morpho-climatique qui utilise sept paramètres morpho-climatiques: l'accumulation de débit (F), l'intensité des précipitations (I), la géologie (G), l'occupation des sols (U), la pente (S), l'élévation (E), et la distance du réseau de drainage (D), d'où le nom FIGUSED. L'objectif est de définir les zones menacées d'inondation, dans lesquelles des mesures d'atténuation et de protection seraient requises.

## I. Présentation de l'approche géo-morpho-climatique :

L'application de l'analyse multicritères fondée sur les SIG dans le contexte de l'évaluation des risques d'inondation était rare jusqu'en 2000. [Black and Burns \(2002\)](#) présentent une vue d'ensemble des modifications de l'estimation du risque d'inondation sur les rivières écossaises en analysant les enregistrements d'inondation. Une première tentative d'utilisation de SIG sur les risques liés à l'eau a été présentée dans [Meja-Navarro et al. \(1994\)](#) ; et dans [Correia et al. \(1999\)](#), les SIG sont reconnues comme un moyen puissant d'intégrer et d'analyser des données provenant de différentes sources. Une cartographie des risques d'inondation a ensuite été fournie pour différents scénarios de croissance urbaine simulant les conséquences de cas alternatifs. Dans [Schumann et al. \(2000\)](#), une méthodologie basée sur les SIG pour la modélisation pluie-débit a été développée, tandis que les auteurs [Liu et al. \(2003\)](#) ont incorporé plusieurs paramètres dans leur modèle pluie-ruissellement (pente, utilisation des sols, type de sol, etc.). Ceci afin d'estimer la distribution spatiale du ruissellement et le temps moyen d'écoulement dans les bassins hydrographiques. Ce dernier travail a été développé par [Forte et al. \(2005\)](#), qui ont divisé une péninsule du sud de l'Italie en zones exposées présentant différents risques d'inondation. Ils ont superposé des couches de SIG contenant des informations géologiques et hydrologiques. Ils ont combiné des informations sur l'emplacement des dolines karstiques et des informations sur les inondations historiques. Les cartes thématiques illustrant ces informations ont été complétées par des cartes

géolithologiques, de perméabilité et de précipitations, produisant une carte des risques d'inondation.

## **II. L'indice de risque d'inondation FHI :**

En se basant sur des méthodologies récentes dans un environnement SIG, un modèle d'indice a été mis au point pour définir les zones à risque d'inondation d'un point de vue régional. En utilisant un indice de risque d'inondation (FHI), une analyse multicritères est effectuée par le modèle développé. Cet indice a pour but d'aider à identifier les zones liées au risque d'inondation.

En effet, l'indice FHI comprend les sept paramètres de critères hydro-géo-morpho-climatiques précités. Le choix de ces paramètres a été théoriquement basé sur leur pertinence vis-à-vis des risques d'inondation, documentée dans la littérature ([Haanet al., 1994](#) ; [Kazakis et al., 2015](#)).

Selon la méthodologie proposée (Fig. 46), les données d'entrée pour chaque paramètre sont introduites et traitées dans un environnement SIG, d'où des cartes thématiques relatives à chaque paramètre sont visualisées. Les cartes d'accumulation du flux, de pente et d'élévation sont issues d'un modèle numérique de terrain (MNT) à haute résolution Pléiades 4 m. De plus, les informations géologiques offrent une connaissance approfondie des unités géologiques, tandis que les informations sur l'occupation du sol indiquent la nature des terrains. En outre, la nature du réseau de drainage permet de calculer la distance par rapport au cours principal. Enfin, en utilisant l'indice de Fournier modifié (MFI), et en se basant sur les données de précipitations, l'intensité de ces précipitations est estimée.

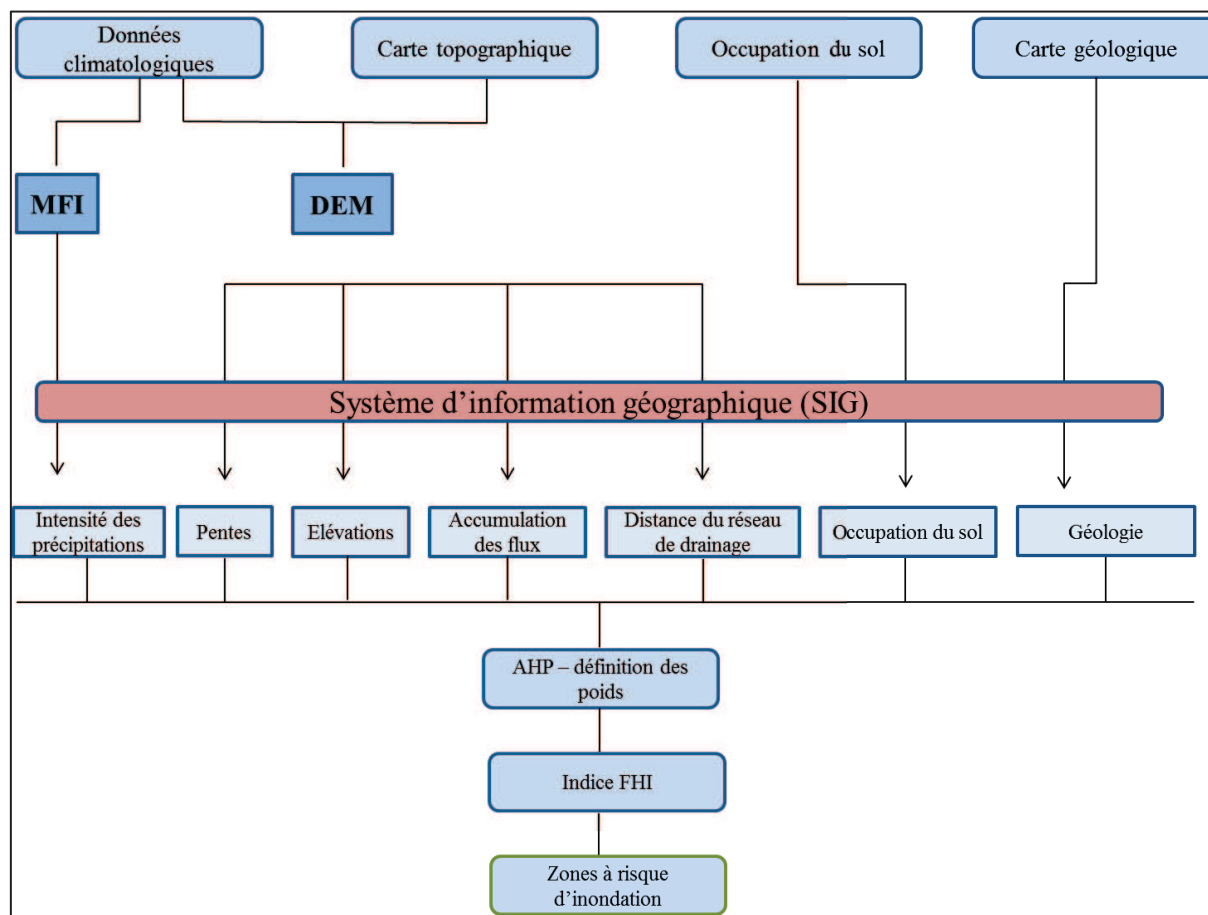


Figure 46: Organigramme de la méthode multicritères. (O. Bennani)

## II.1. Poids relatifs des critères

La méthode multicritère prend en compte les paramètres hydrologiques et morphologiques ci-dessus et le poids de chaque facteur détermine son rôle dans le résultat final. Ainsi, une analyse spatiale des zones étudiées évalue chaque point de la grille pour chaque paramètre. Ensuite, en fonction des conditions locales, chaque point de la grille se voit attribuer des valeurs sur une échelle allant de 2 à 10 (score d'évaluation). Les classes d'accumulation de flux, d'altitude et d'intensité des précipitations ont été définies à l'aide de la méthode de « catégorisation des ruptures naturelles » utilisée dans des études similaires (Huan *et al.*, 2012; Kazakis *et al.*, 2015). Les classes de pente ont été définies conformément à la classification de Demek (1972), tandis que les classes de distance du réseau de drainage ont été définies par le traitement des données relatives au réseau hydrographique et aux inondations historiques enregistrées dans le bassin. Les paramètres qualitatifs d'utilisation des sols et de formations géologiques ont été définis selon les méthodes utilisées dans des études précédentes, avec des modifications correspondant aux caractéristiques du site d'étude (Kourgialas et Karatzas, 2011; Tehrany *et al.*, 2013; Ouma et Tateishi, 2014).



Les valeurs acquises sont traitées afin de calculer la signification relative de chaque critère et le facteur de pondération correspondant ( $w$ ). Après le calcul des poids, le FHI peut être calculé en utilisant l'équation suivante :

$$FHI = \sum_{i=1}^n r_i \times w_i = F \times w_f + I \times w_i + G \times w_g + U \times w_u + S \times w_s + E \times w_e + D \times w_d$$

Avec :

$r_i$  : le classement du paramètre en chaque point ;

$w_i$  : le poids de chaque paramètre ;

$n$  : le nombre de critères.

## II.2. Processus hiérarchique analytique AHP

Le poids de chaque paramètre est défini selon le processus de hiérarchie analytique (AHP) (Saaty, 1990 ; Kazakis *et al.*, 2015). L'AHP est une technique structurée utilisée pour analyser des problèmes complexes, impliquant un grand nombre d'objectifs ou de critères. Les poids de ces critères sont définis après leur classement en fonction de leur importance relative. Ainsi, une fois que tous les critères sont triés de manière hiérarchique, une matrice de comparaison par pair est créée pour chaque critère afin de permettre une comparaison significative. Cette dernière est évaluée de 1 à 9, classant ainsi les critères du moins importants au plus importants.

La méthodologie proposée suggère une comparaison par paires, utilisant une matrice  $7 \times 7$ , où les éléments diagonaux sont égaux à 1. Dans le tableau 21, les critères de la méthode FIGUSED sont triés de manière hiérarchique pour le bassin de la Rheraya. Les valeurs de chaque ligne caractérisent l'importance entre deux paramètres. La première ligne du tableau illustre l'importance de l'accumulation de flux par rapport aux autres paramètres placés dans les colonnes. Par exemple, l'accumulation de flux est beaucoup plus importante en géologie et est donc affectée de la valeur 7. La ligne décrit l'importance de la géologie. Par conséquent, la ligne a les valeurs inverses de la comparaison par paires (par exemple 1/7 pour l'accumulation de flux). On trouvera plus de détails sur l'application du processus de hiérarchie analytique dans Saaty (1990).

**Tableau 21: Paramètres de risque d'inondation: Processus de hiérarchie analytique.**

| paramètres                     | Accumulation du débit | Distance du réseau du drainage | Élévation | Occupation du sol | Intensité des précipitations | Pentes | Géologie |
|--------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------|-------------------|------------------------------|--------|----------|
| Accumulation du débit          | 1                     | 2                              | 2         | 3                 | 3                            | 5      | 7        |
| Distance du réseau du drainage | 1/2                   | 1                              | 1         | 3                 | 3                            | 4      | 6        |
| Élévation                      | 1/2                   | 1                              | 1         | 3                 | 3                            | 4      | 6        |
| Occupation du sol              | 1/3                   | 1/3                            | 1/3       | 1                 | 2                            | 4      | 5        |
| Intensité des précipitations   | 1/3                   | 1/3                            | 1/3       | 1/2               | 1                            | 4      | 5        |
| Pentes                         | 1/5                   | 1/4                            | 1/4       | 1/4               | 1/4                          | 1      | 3        |
| Géologie                       | 1/7                   | 1/6                            | 1/6       | 1/5               | 1/5                          | 1/3    | 1        |

L'accumulation de débit est généralement considérée dans la littérature comme le paramètre le plus important. La distance du réseau de drainage et l'altitude ont une importance égale, car les zones inondées sont souvent situées à basse altitude et à proximité du réseau de drainage. L'utilisation des sols et l'intensité des précipitations sont considérées comme le troisième paramètre le plus important. Cependant, dans des petits bassins caractérisés par des zones bâties, l'occupation du sol a une influence plus grande sur la survenue des inondations. Dans les zones accidentées à altitudes variées, l'intensité des précipitations est également indirectement associée à l'altitude. La pente du terrain est prise en compte dans le paramètre d'élévation. En outre la géologie et la perméabilité peuvent être d'une importance cruciale pour le ruissellement et la survenue d'inondations, en particulier dans les petits bassins où la végétation est rare. Une comparaison par paires de la signification des critères a donné les valeurs du tableau 21.

Au niveau du tableau 22, les valeurs normalisées des paramètres du tableau 1 sont présentées. La moyenne de ces derniers représente le poids ( $w$ ) correspondant à chaque paramètre.

**Tableau 22: Paramètres normalisés des risques d'inondation: processus de hiérarchie analytique.**

| paramètres      | Accum. débit | Dist. drainage | Elev. | Occup. sol | Intens. Précip. | pent | Géolo. | Moy. | Poids wi |
|-----------------|--------------|----------------|-------|------------|-----------------|------|--------|------|----------|
| Accum. débit    | 0.33         | 0.39           | 0.39  | 0.27       | 0.24            | 0.22 | 0.21   | 0.30 | 3.0      |
| Dist. Drainage  | 0.17         | 0.20           | 0.20  | 0.27       | 0.24            | 0.18 | 0.18   | 0.21 | 2.1      |
| Elev.           | 0.17         | 0.20           | 0.20  | 0.27       | 0.24            | 0.18 | 0.18   | 0.21 | 2.1      |
| Occup. Sol      | 0.11         | 0.07           | 0.07  | 0.09       | 0.16            | 0.18 | 0.15   | 0.12 | 1.2      |
| Intens. Précip. | 0.11         | 0.07           | 0.07  | 0.05       | 0.08            | 0.18 | 0.15   | 0.10 | 1.0      |
| Pentes          | 0.07         | 0.05           | 0.05  | 0.02       | 0.02            | 0.04 | 0.09   | 0.05 | 0.5      |
| Géolo.          | 0.05         | 0.03           | 0.03  | 0.02       | 0.02            | 0.01 | 0.03   | 0.03 | 0.3      |

**a. Contrôle de cohérence :**

Une fois la matrice des vecteurs propres du AHP est créée, une évaluation de sa cohérence est nécessaire. Le niveau de cohérence requis est évalué à l'aide de l'indice suivant :

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

Avec CR : le rapport de consistance, CI : l'indice de cohérence, RI : l'indice aléatoire.

Les valeurs de l'indice RI sont dépendantes du nombre de critères ou paramètres (Tableau 23).

**Tableau 23: Indice aléatoire (RI) utilisé pour calculer les ratios de cohérence (CR).**

| Nbr de paramètres | 1 | 2 | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |
|-------------------|---|---|------|------|------|------|------|------|------|
| RI                | 0 | 0 | 0.58 | 0.90 | 1.12 | 1.24 | 1.32 | 1.41 | 1.45 |

Dans cette étude, nous utilisons sept paramètres, l'indice RI est donc égale à 1.32.

La théorie du processus hiérarchique analytique (AHP) suggère que le rapport de consistance (CR) doit être inférieur à 0.1.

L'indice de cohérence (CI) quant à lui, il se calcule en utilisant l'équation suivante :

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

Avec :

$\lambda_{\max}$  : valeur max de la matrice de comparaison ;

n : le nombre de critères.

Après calcul on obtient pour :  $\lambda_{\max} = 7,66$ ,  $n = 7$  et  $RI = 1,32$  et un rapport de consistance CR de l'ordre de 0,08. Puisque la valeur de CR est inférieure au seuil (0.1), la cohérence des pondérations est confirmée.

### **III. Résultats de l'approche géo-morpho-climatique appliquée sur le bassin versant de la Rheraya.**

Chacun des paramètres de l'approche géo-morpho-climatique joue un rôle important dans la caractérisation d'une zone inondable. En effet selon les poids attribués à chaque paramètre et les notes d'évaluation relative à différentes classes (Tableau 24) on obtient pour chaque paramètre la carte thématique.

**Tableau 24: Classes et poids relatifs à chaque paramètre.**

| <b>Paramètres</b>                                | <b>Classes</b>            | <b>Note d'évaluation</b> | <b>poids</b> |
|--|---------------------------|--------------------------|--------------|
| <b>Accumulation des débits</b>                   | 20 275.4 - 298 376        | 10                       | 3            |
|  | 2 377.8 - 20 275.4        | 8                        |              |
|  | 1 225.9 - 2 377.8         | 6                        |              |
|  | 1 151.8 - 1 225.9         | 4                        |              |
|  | 0 - 1 151.8               | 2                        |              |
| <b>Distance du réseau de drainage (m)</b>        | <10                       | 10                       | 2.1          |
|  | 10 – 20                   | 8                        |              |
|  | 20 – 40                   | 6                        |              |
|  | 40 – 100                  | 4                        |              |
|  | >100                      | 2                        |              |
| <b>Élévations (m)</b>                            | 1 049.5 - 1 565           | 10                       | 2.1          |
|  | 1 565 - 2 033             | 8                        |              |
|  | 2 033 - 2 549             | 6                        |              |
|  | 2 549 - 3 111             | 4                        |              |
|  | 3 111 - 4 036             | 2                        |              |
| <b>Occupation du sol</b>                         | Zones urbaines et humides | 10                       | 1.2          |
|  | Les pâturages             | 8                        |              |
|  | Zones agricoles           | 6                        |              |
|  | Végétation clairsemée     | 4                        |              |
|  | Forêts mixtes             | 2                        |              |
| <b>Unités d'intensité des précipitations MFI</b> | 43.6 - 48.9               | 10                       | 1.0          |
|  | 38.1 - 43.6               | 8                        |              |
|  | 32.8 - 38.1               | 6                        |              |
|  | 27.5 - 32.7               | 4                        |              |
|  | 22 - 27.4                 | 2                        |              |
| <b>Pentes (degrés)</b>                           | 0 – 2                     | 10                       | 0.5          |
|  | 2 – 5                     | 8                        |              |
|  | 5 – 15                    | 6                        |              |
|  | 15 – 35                   | 4                        |              |
|  | 35 – 86                   | 2                        |              |
| <b>Géologie</b>                                  | Roches cristallines       | 10                       | 0.3          |
|  | Dépôts lacustre           | 8                        |              |
|  | Sédiments néogènes        | 6                        |              |
|  | Dépôts continentaux       | 4                        |              |
|  | Dépôts alluviaux          | 2                        |              |

### **III.1. Lame d'eau écoulée :**

Selon le principe de la méthode utilisée et les valeurs du tableau 21, la lame d'eau écoulée est le paramètre le plus important pour définir le risque d'inondation. Le flux accumulé représente la quantité d'eau descendant dans les cellules du raster en sortie. Les valeurs élevées du débit accumulé indiquent des zones de débit concentré et par conséquent un risque d'inondation plus élevé. Les valeurs d'accumulation de débit varient entre 0 et 298 376 (Tableau 24). Les valeurs les plus élevées se produisant à la sortie de l'affluent d'Imlil et les valeurs inférieures de ce facteur apparaissent dans les flux d'ordre inférieur (Fig.47).

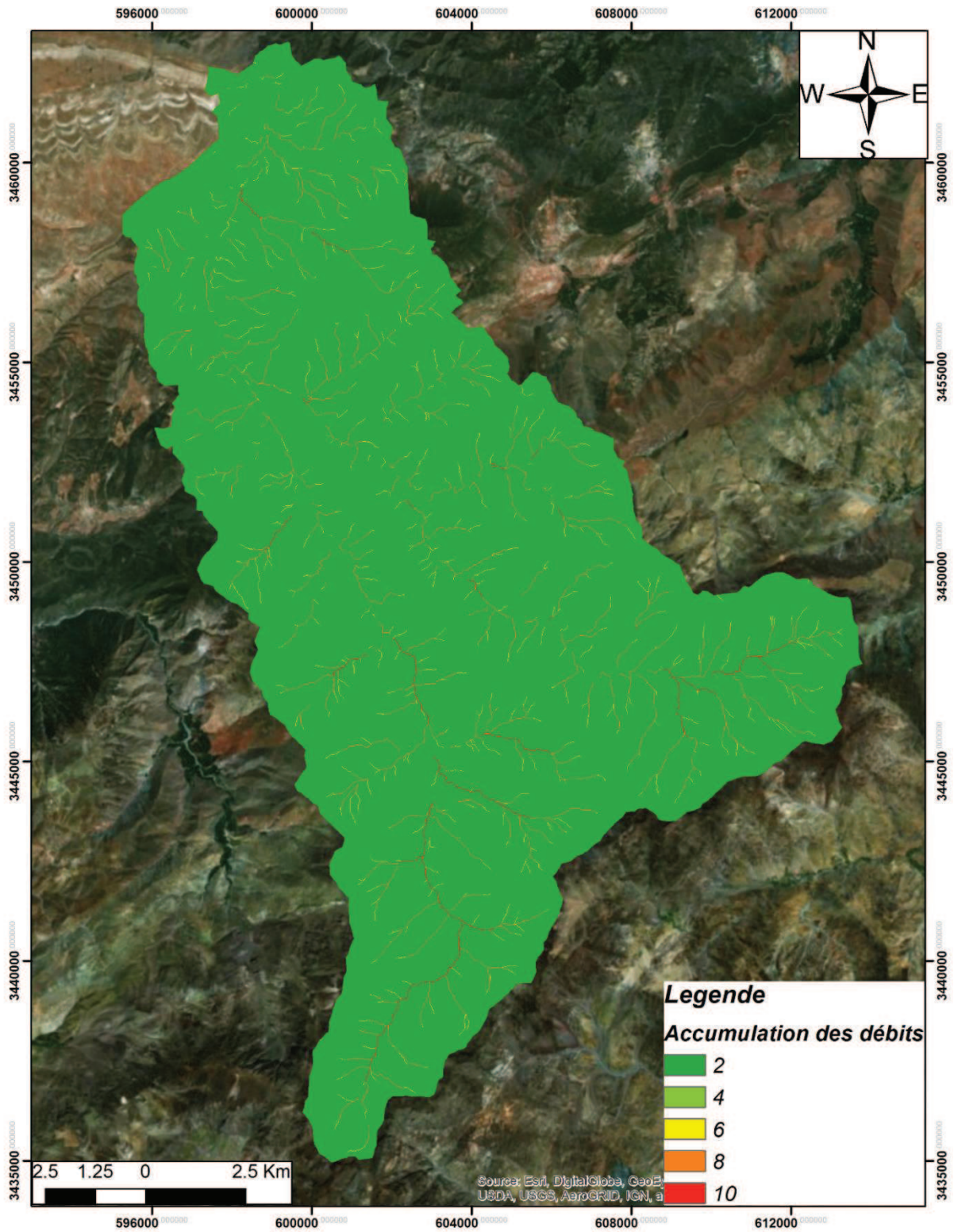


Figure 47: Carte thématique du paramètre accumulation des débits. (O. Bennani)

### III.2. Distance du réseau de drainage :

Outre les zones d'eaux de surface concentrées, les débordements des rivières sont cruciaux pour le déclenchement d'une inondation. Le rôle du lit de la rivière diminue au fur et à mesure que la distance de celle-ci augmente. Cela explique pourquoi un poids élevé est attribué au paramètre de la « distance du réseau de drainage ». Les zones proches du cours d'eau principale présentent évidemment un risque élevé d'inondation, alors que l'effet de ce paramètre diminue dans les distances les plus élevées (Fig. 48).

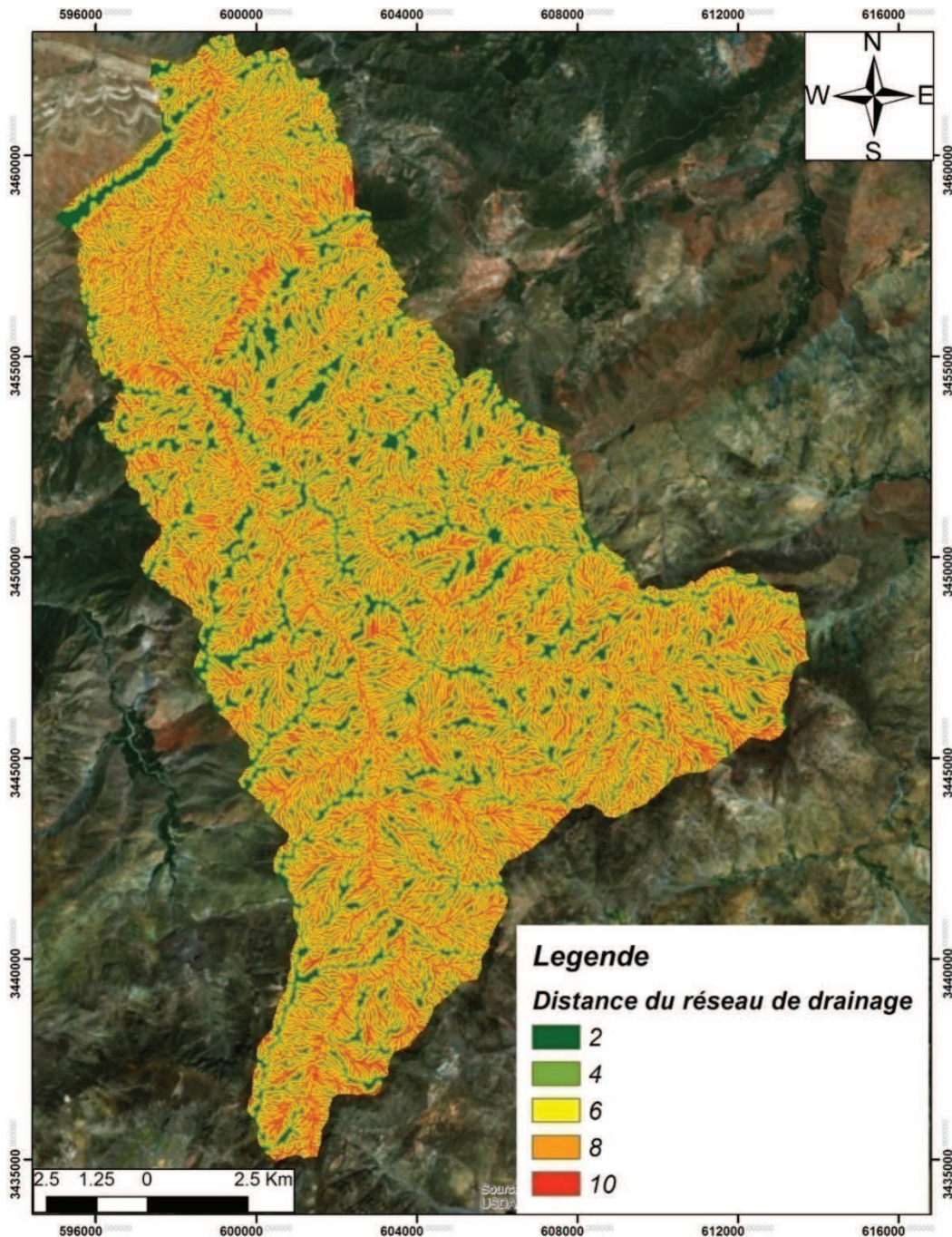


Figure 48 : Carte thématique du paramètre distance du réseau de drainage. (O. Bennani)



### III.3. Élévations et pentes :

Les hautes altitudes ainsi que les fortes pentes influencent remarquablement le ruissellement des eaux. Le bassin versant de la Rheraya est caractérisé par de fortes pentes qui favorisent un écoulement rapide. En outre, les zones situées en basses altitudes sont les plus exposées au risque d'inondation, contrairement à ceux se trouvant en altitude.

D'après les figures 49 et 50, les basses altitudes apparaissent dans la partie aval du bassin, où les pentes sont également plus faibles. À cet effet, c'est la partie aval de faibles élévations qui serait plus vulnérable aux risques d'inondations.

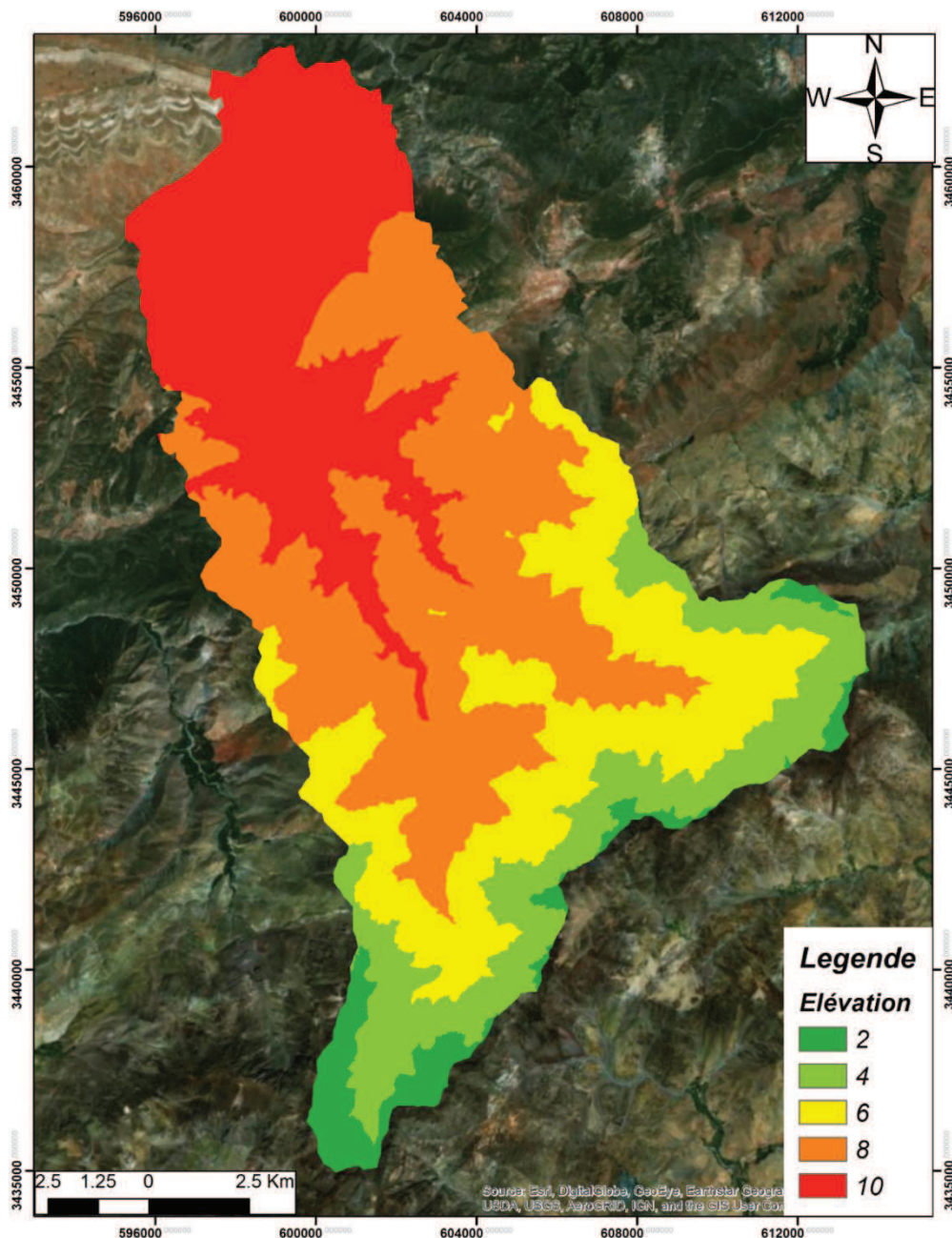


Figure 49: Carte thématique du paramètre Élévation du bassin de la Rheraya. (O. Bennani)

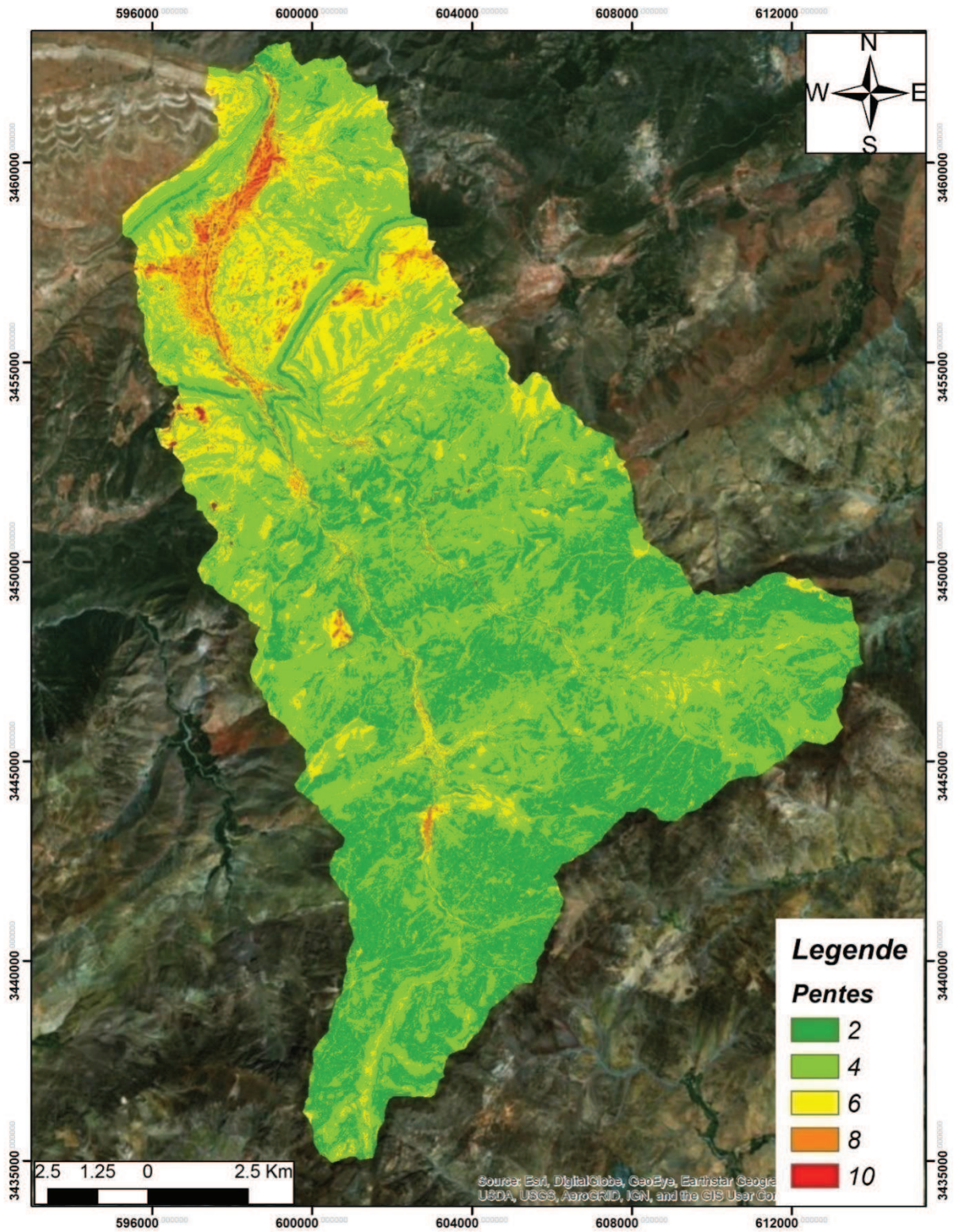


Figure 50: Carte thématique du paramètre des pentes du bassin versant de la Rheraya. (O. Bennani)

### III.4. Occupation du sol :

L'occupation du sol joue un rôle primordial dans la détermination des zones inondables. En effet, elle influence le taux d'infiltration, ainsi que les coulées des débris. Les forêts favorisent l'infiltration tandis que les zones nues ou urbanisées et les pâturages favorisent les flux d'eau en surface. Une grande partie de la zone étudiée est couverte de quelques forêts mixtes et de zones de végétation auxquelles des taux égaux à 2 et 4 ont été attribués, respectivement (Fig. 51).

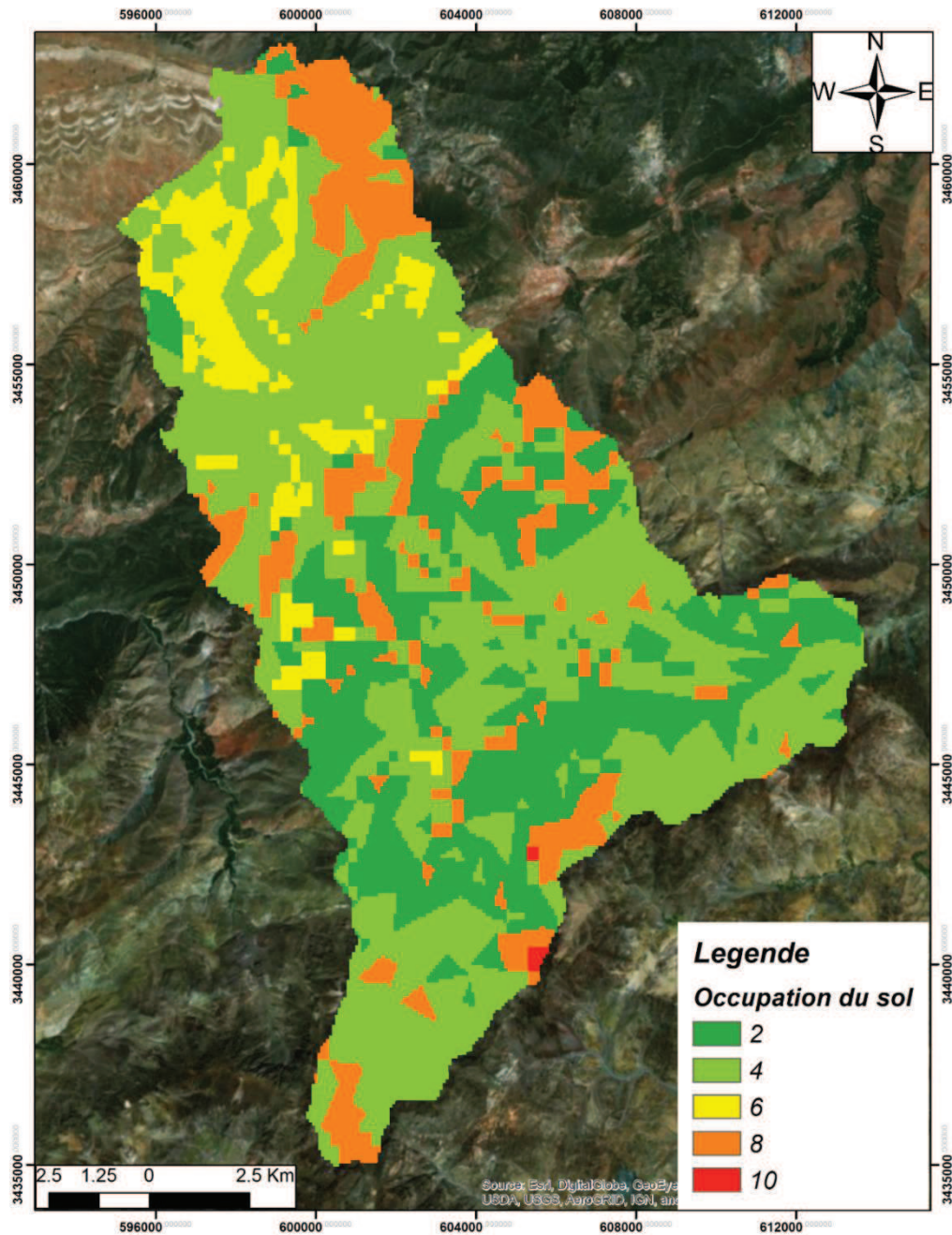


Figure 51: Carte thématique du paramètre Occupation du sol du bassin versant de la Rheraya. (O. Bennani)

### III.5. Intensité des précipitations :

L'intensité des précipitations est exprimée à l'aide de l'indice de Fournier modifié (MFI). Cet indice, calculer pour la première fois par Fournier (1960) et modifiée par Arnoldus (1977) donne une idée sur l'intensité moyenne mensuelle des précipitations à chaque station pluviométrique, et il se calcule selon l'équation suivante :

$$MFI = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{P}$$

Avec  $P_i$  : précipitation moyenne mensuelle (mm) et  $P$  : précipitation moyenne annuelle (mm)

La distribution spatiale de l'intensité des précipitations a été réalisée en tenant compte des altitudes de quatre stations (Tableau 25).

**Tableau 25: Élévations et les MFI relatifs aux stations utilisées.**

|           | Élévations | MFI  |
|-----------|------------|------|
| Tahanaout | 925        | 40.4 |
| Armed     | 1970       | 36.8 |
| Aghbalou  | 1070       | 55.2 |
| Tazitount | 1250       | 49.4 |

Les calculs et la carte thématique générée, relative à l'intensité des précipitations sur le bassin versant de la Rheraya (Fig. 52), indiquent que les valeurs de l'indice MFI varient entre 22 et 49 (Tableau 24), avec des valeurs plus élevées dans la partie aval du bassin.

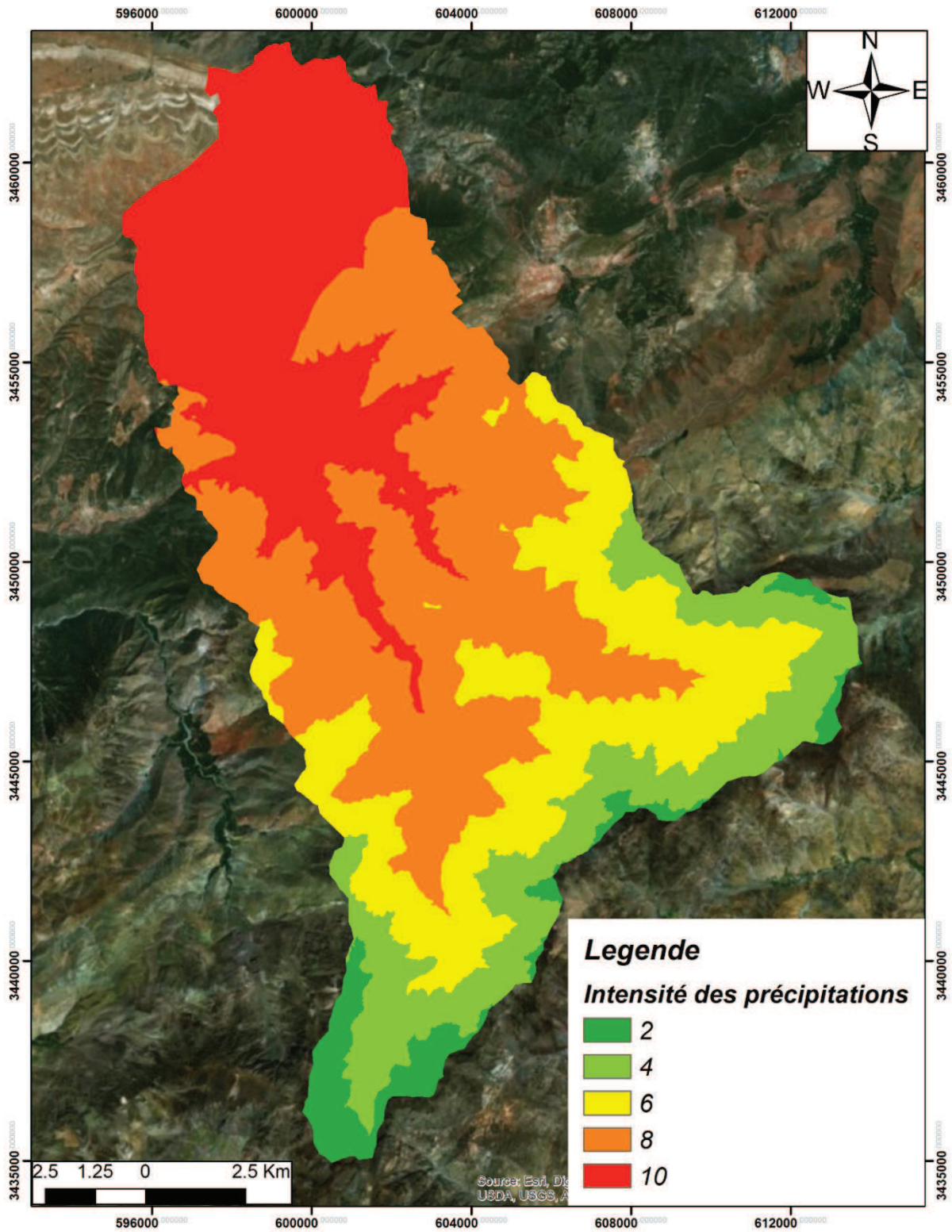
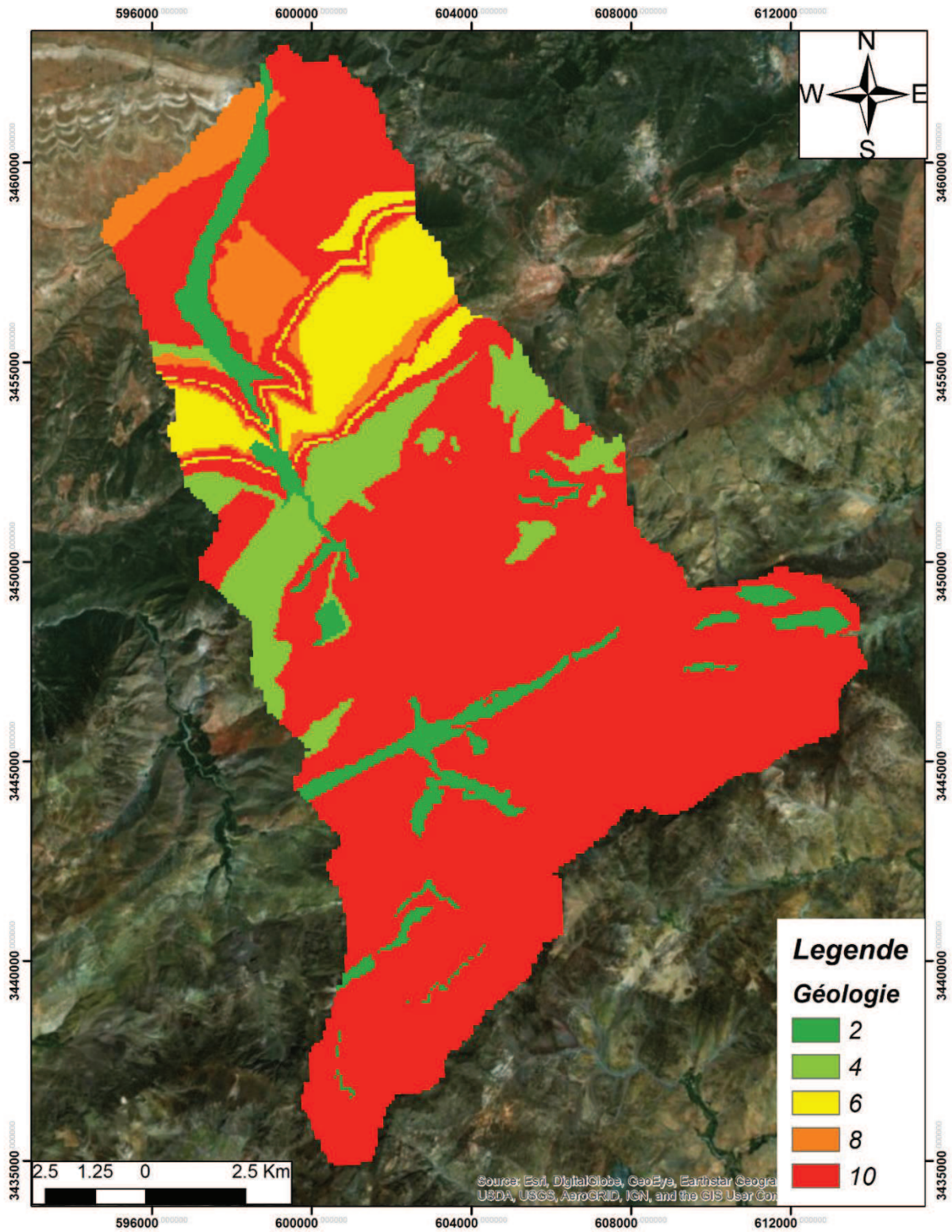


Figure 52: Carte thématique du paramètre d'intensité des précipitations. (O. Bennani)

### III.6. Géologie :

La géologie des zones à risque d'inondation est un critère à prendre en compte, car elle peut amplifier ou atténuer l'ampleur des inondations. Généralement les formations perméables favorisent l'infiltration d'eau. En Outre, les roches imperméables ou peu perméables, telles que les roches cristallines, favorisent le ruissellement en surface. Les zones contenant des roches cristallines peuvent également affecter de manière significative la génération d'inondations soudaines (Bonacci *et al.*, 2006). Par conséquent, les roches cristallines ainsi que des dépôts lacustres (argiles, marnes) ont été évalués respectivement à 10 et 8 (tableau 24). Une cote inférieure a été attribuée aux dépôts alluviaux et continentaux en raison de leur plus grande capacité d'infiltration (Fig.53).



**Figure 53: Carte thématique du paramètre Géologie de l'approche FIGUSED.  
(O. Bennani)**

#### **IV. Interpolation et cartographie des zones inondables :**

La méthodologie proposée combine de manière linéaire les paramètres sélectionnés, en tenant compte des poids relatifs. De ce fait, les cartes générées précédemment sont superposées avec les différents poids dans un environnement SIG. On obtient au final, la carte des risques d'inondation (Fig. 54), définissant ainsi 5 classes de vulnérabilité aux inondations (très faible, faible, modérée, élevée et très élevée). D'après cette carte d'inondabilité, les zones les plus vulnérables, outre les évidentes rives de l'oued, se trouvent en aval du bassin versant. Ces zones sont par endroit, des zones d'estivage et d'activités touristiques (exemple Rha Moulay Brahim). Quantitativement, la distribution des zones à risque d'inondation est illustrée par la figure 55. On peut y lire que, certes 72 % des terrains ne représentent pas de grand risque, mais certains lieux de fréquentation humaine et d'activités économiques (Restaurants, cafés, hébergement touristique ...) situés entre Asni et Tahanaout, représentent des risques élevés et très élevés (16 %). Ces zones aval du bassin versant de la Rheraya, constitueraient donc des points noirs auxquelles une attention particulière doit être accordée afin d'atténuer au maximum les effets de ces inondations et préserver les vies et les biens des gens. La vigilance est donc requise et des mesures de protection structurelles et non structurelles sont vivement conseillées pour ces zones.



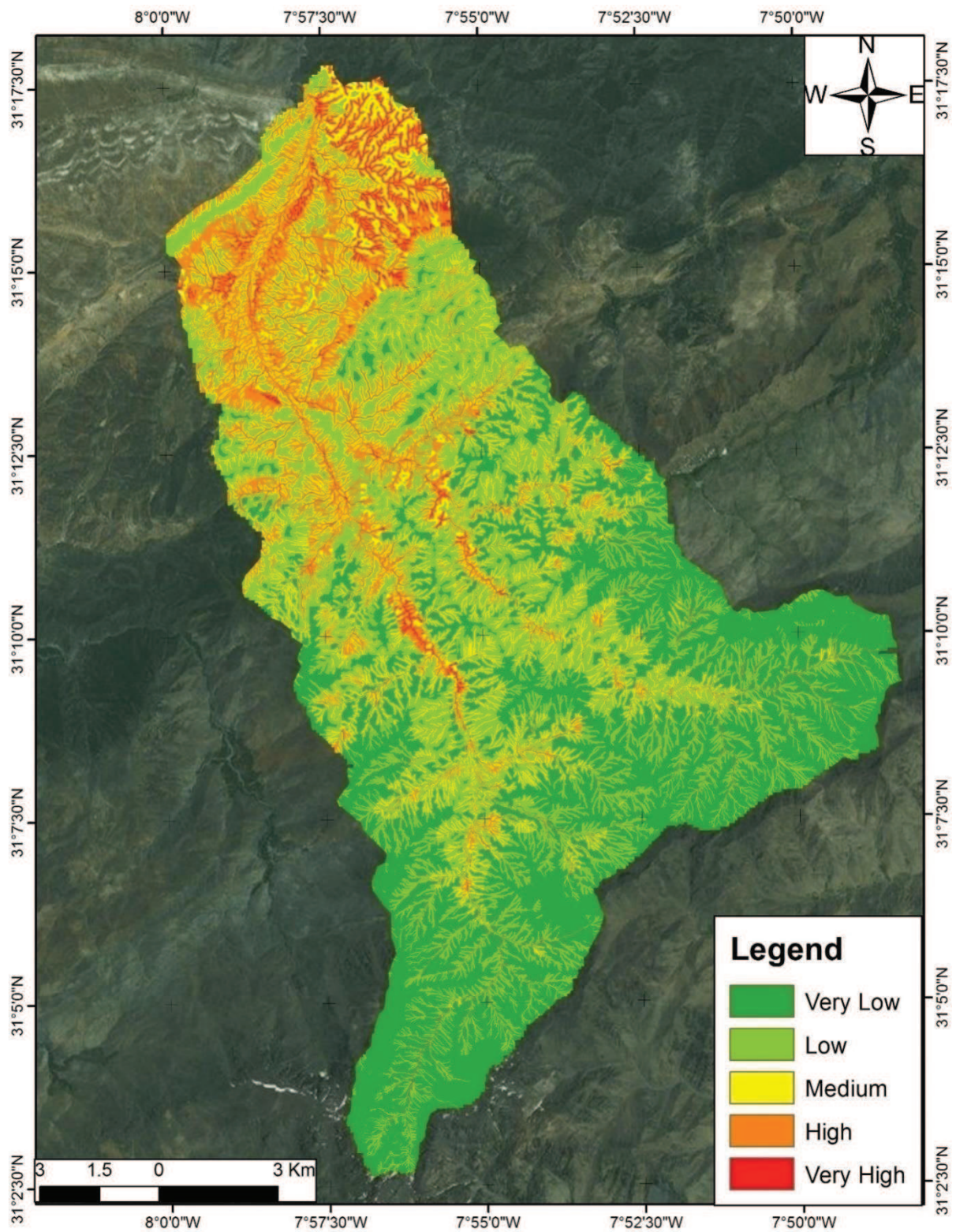


Figure 54: Carte du risque d'inondation du bassin versant de la Rheraya. (O. Bennani)

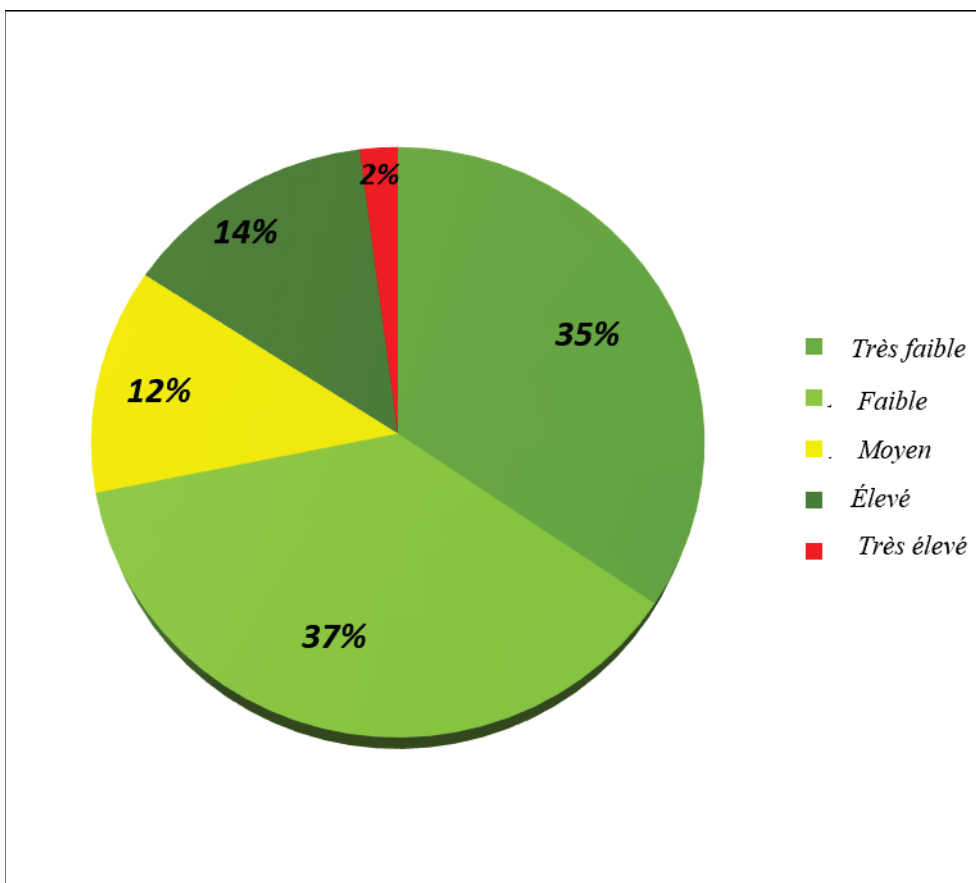


Figure 55: Répartition des zones inondables.

## **V. Conclusion sur l'approche géo-morpho-climatique:**

L'objectif principal de ce chapitre est de combiner deux méthodes pour identifier les zones exposées aux risques d'inondation dans un bassin versant semi-aride et montagneux. L'objectif est donc de fournir un plan ou une stratégie visant à mettre en place des mesures d'atténuation des inondations et à faciliter la prise de décision. La méthode basée sur un indice de risque d'inondation (FHI) a défini les zones de risque d'un point de vue régional. Cette méthodologie basée sur l'indice nommé « FIGUSED », analyse spatialement sept paramètres en combinant les informations contenues dans un indice de risque d'inondation. Les paramètres traités sont les lames d'eau écoulées (F), l'intensité des précipitations (I), la géologie (G), l'utilisation des sols (U), la pente (S), l'altitude (E) et la distance du réseau de drainage (D). L'importance de chaque paramètre est calculée par un processus de hiérarchie analytique. L'effet de chaque critère est combiné et il en résulte une cartographie qui permet de visualiser les zones très exposées. Le bassin versant en aval ainsi que de nombreux bords de cours d'eau sont, par exemple, très vulnérables aux débordements des eaux.

Les résultats obtenus à l'aide de cette approche valident en partie les résultats de la modélisation hydraulique effectuée au bassin de la Rheraya au chapitre précédent. Cette modélisation appliquée sur un tronçon aval (fig. 41-43), indiquait justement la présence d'un risque considérable avec des hauteurs d'eau simulées assez importantes. Les deux approches utilisées sont complémentaires dans la mesure où l'approche géo-morpho-climatique donne une cartographie globale du bassin et une information précise sur la localisation des zones les plus vulnérables. Tandis que la modélisation hydraulique permet d'avoir une vision plus pointue sur les niveaux d'eau selon différentes périodes de retour.

## Chapitre VII : Hydro-géomorphologie et diagnostic territorial et intégré du risque d'inondation dans la vallée de l'Ourika.

Diverses études se sont intéressées à la problématique des inondations dans la vallée de l'Ourika. Elles se sont toutefois trop focalisées sur leur composante physique et l'approche par modélisation. Le diagnostic territorial n'est pas toujours abordé et une lacune sur la vulnérabilité des bâtiments et des activités économiques peut demeurer. À cet effet, l'objectif principal de cette partie est de combler cette lacune afin de mieux orienter les actions institutionnelles visant à faire face aux inondations. Ceci, en spatialisant le risque d'inondation dans la vallée de l'Ourika afin de permettre une meilleure gestion des zones exposées et vulnérables. Nous allons nous y prendre en spatialisant l'aléa à l'aide de l'approche hydro-géomorphologique (Ballais *et al.*, 2011). Ceci en localisant les enjeux, en analysant leur vulnérabilité et en proposant un plan d'évacuation en fonction des composantes du risque telles que définies par Defossez *et al.* 2017 (Fig. 56).

Bien que la récurrence et la cinématique des inondations expliquent l'accent mis sur les approches mathématiques et les propriétés intrinsèques de ces inondations, ces approches manquent parfois d'une vision plus descriptive du terrain et de ses occupants humains et matériels. L'approche hydro-géomorphologique adoptée dans le présent document répond précisément à cette préoccupation. Couplée aux analyses de l'occupation des territoires riverains de l'oued et de leur présence humaine, cette approche viendra compléter le travail purement physique (Boumenni *et al.*, 2017, El Alaoui El Fels *et al.*, 2018, El Khalki *et al.*, 2018) dans une vallée touristique du Maroc.

Depuis la catastrophe de 1995, certaines mesures structurelles et non structurelles ont été prises, telles que l'édification d'ouvrages de protection et la mise en place d'un système d'alerte aux crues. Cependant, la meilleure stratégie pour réduire les risques d'inondation est de réduire l'exposition humaine dans les zones inondables (Hooijer *et al.*, 2004, Roy *et al.*, 2003, Kreibich *et al.*, 2005).

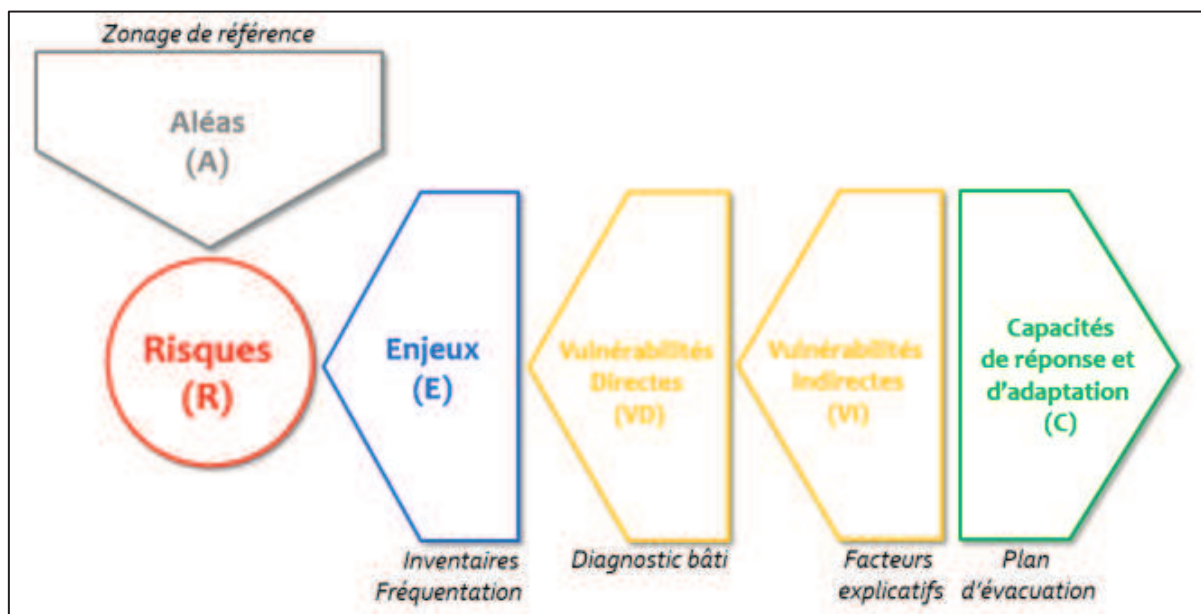


Figure 56: Les composantes du risque. (F. Léone)

## I. L'approche hydro-géomorphologique

Notre choix a été d'appliquer l'approche sur les zones touristiques les plus fréquentées de la vallée de l'Ourika. Il s'agit d'Aghbalou, Oulmes et Setti fadma.

Vue l'absence des certaines données nécessaires à la réalisation des étapes du diagnostic du risque d'inondation dans la vallée, la création de ces données s'est avéré essentielle. Pour cela, nous avons procédé tout d'abord par l'extraction d'images satellitaires à haute résolution et à l'aide du programme TerraIncognita il a été possible d'avoir les fonds Google Earth et Bing relatifs aux zones étudiées. Ces fonds sont ensuite projetés en SIG nous permettant ainsi d'avoir la donnée de base (Fig. 57, 58, 59) pour la réalisation des différentes étapes de l'étude.



Figure 57: Vue aérienne de la région d'Aghbalou (vallée de l'Ourika).



**Figure 58: Vue aérienne de la région d'Oulmes (vallée de l'Ourika).**

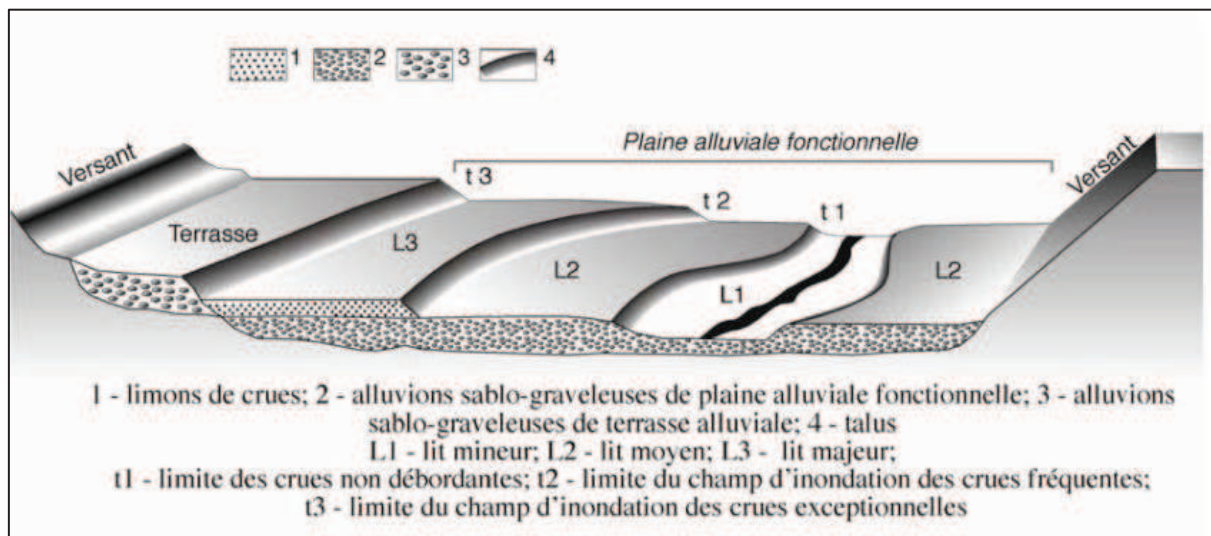


**Figure 59: Vue aérienne de la région de Setti Fadma (vallée de l'Ourika).**

### I.1. La spatialisation de l'aléa

En utilisant la méthode hydro-géomorphologique proposée par [Ballais et al. \(2011\)](#), nous avons réalisé une spatialisation de l'aléa pour la vallée de l'Ourika. Cette méthode est basée sur la détermination des limites des lits mineurs, moyens et majeurs. On peut distinguer plusieurs sous-entités dans le lit de la rivière (Fig. 60). Selon [Ballais et al. \(2011\)](#) :

- ✓ Un lit mineur évolue fréquemment, rarement colonisé par la végétation à cause des écoulements et est caractérisé par la présence de différentes formes actives de la dynamique fluviale.
- ✓ Un lit moyen marqué par une topographie irrégulière causé par les courants apportés par le lit mineur. Il est souvent fragmenté et peut être similaire au lit mineur ou au lit majeur surtout en milieu méditerranéen.
- ✓ Un lit majeur a une morphologie simple, et n'est généralement recouvert que par les crues les moins fréquentes. Avec une lame d'eau moins importante qu'au niveau du lit mineur et moyen, le lit majeur ne permet donc pas le transport des éléments grossiers.



**Figure 60: Relation topographique entre les différents lits (Ballais J. L.)**

À l'aide de l'observation de la topographie, des dépôts sédimentaires, de l'occupation du sol et de la végétation, nous avons reconstitué la dynamique fluviale de l'oued de l'Ourika.

Le lit mineur est facilement distingué grâce aux dépôts grossiers déposés de manière plus ou moins régulière par l'oued. Le lit moyen, lui, est différencié par sa microtopographie. La présence de la végétation ainsi que des petits talus indique que les eaux n'atteignent pas souvent certains espaces. À certains endroits au long de la vallée de l'Ourika le lit moyen a été fusionné avec les lits mineurs ou majeurs.

Le lit majeur est facilement identifiable grâce aux talus qui dépassent généralement 1 mètre. Au niveau des zones urbanisées, il a été plus difficile d'identifier les lits à cause des étendues non dégagées occupées par des terrasses de loisirs.

### I.1.1. Le site d'Aghbalou :

Cette approche s'est avérée très fonctionnelle au niveau de la zone d'Aghbalou, car à cette partie de la vallée, il y a des talus qui délimitent bien les lits majeurs et mineurs. À cette partie de l'Ourika, la vallée est relativement large (Fig.61) et les habitations et les commerces restent assez surélevés pour être inondés et donc le risque est minime à cette zone (Fig. 62).

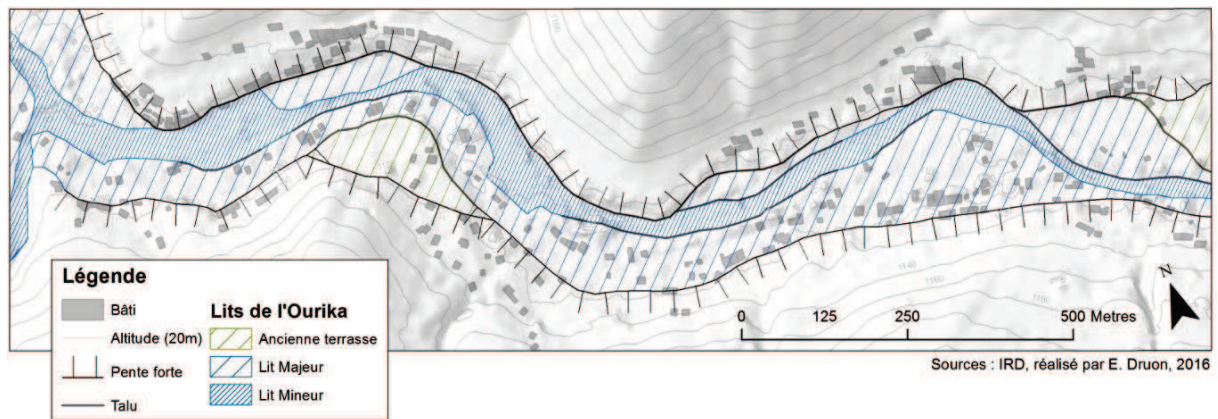


Figure 61: Hydro-géomorphologie de la vallée de l'Ourika à Aghbalou



Figure 62: le cours d'eau principale de l'Ourika à Aghbalou. (E. Druon)



### I.1.2. Le site d'Oulmes :

À Oulmes, il a été plus difficile d'appliquer l'approche hydro-géomorphologique, à cause de l'impact de l'activité humaine sur la rivière ainsi que la confusion des différents lits de cette dernière (Fig. 63). En effet, vu que tous les restaurants sont localisés entre le lit mineur et le lit majeur, il a été difficile de limiter ces lits. Aussi la présence de la route construite en partie dans le lit mineur de l'oued empêche l'identification de la limite entre le lit mineur et le lit majeur (Fig. 64). L'affluent Tighzert quant à lui, il a creusé au fil du temps son lit dans le cône de déjection à l'entrée d'Oulmes. Les écoulements qui en proviennent s'étendent donc sur la route et donc sur le village.

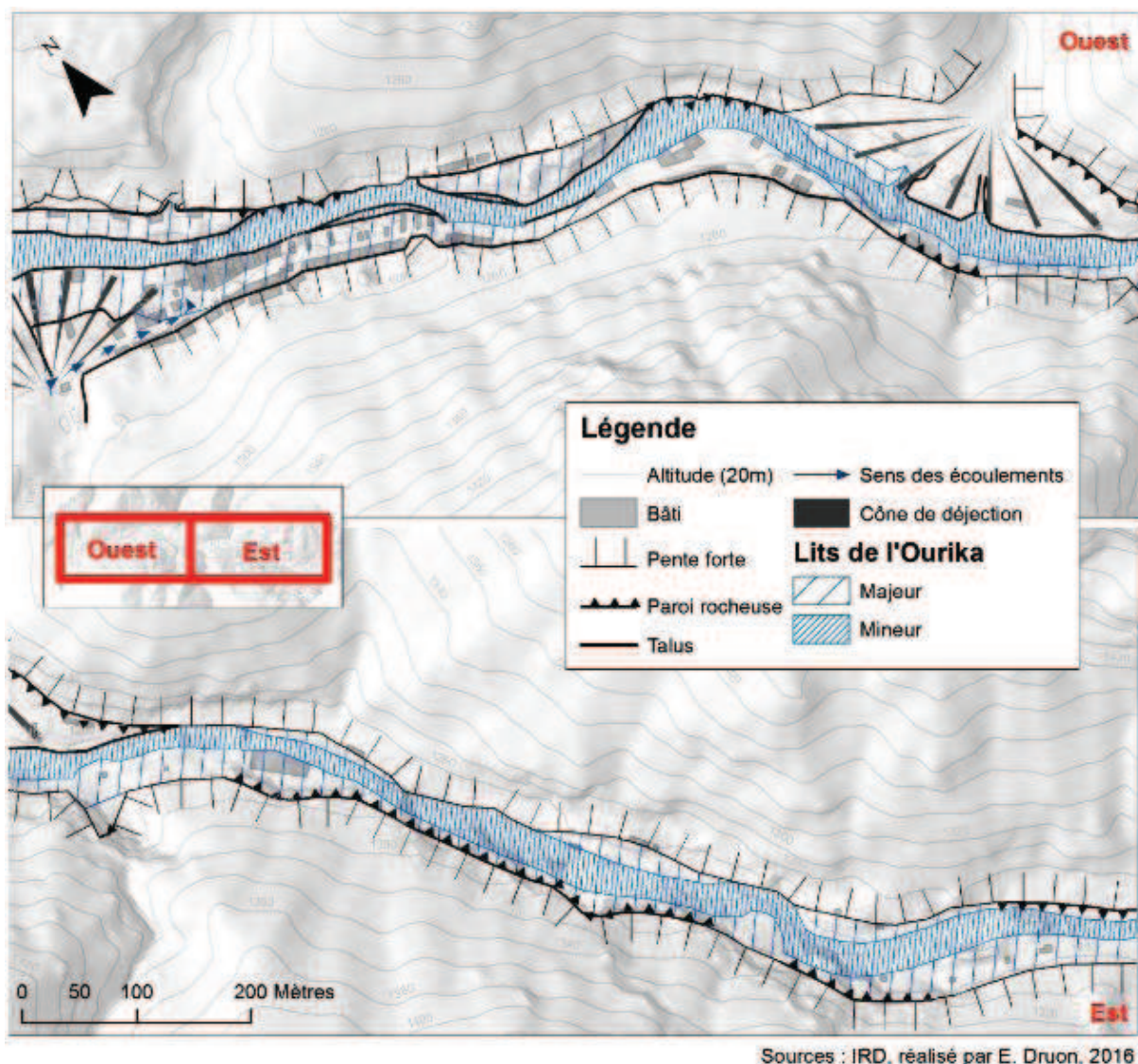


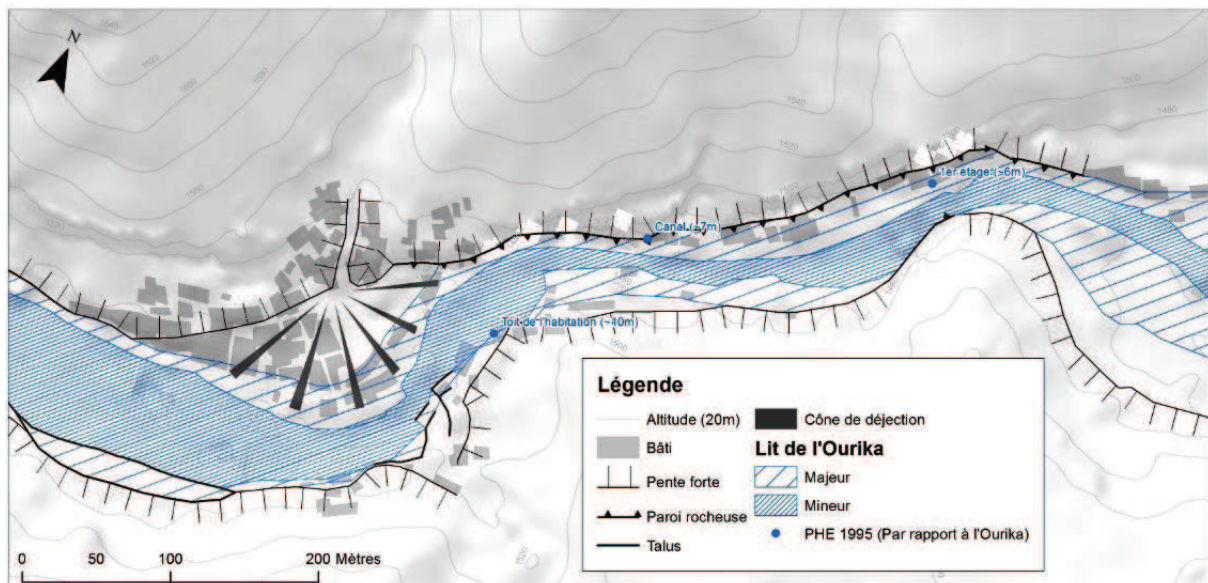
Figure 63: Hydro-géomorphologie de la vallée de l'Ourika a Oulmes



**Figure 64: Vue du cours d'eau principal au niveau d'Oulmes.**

### **I.1.3. Le site de Setti Fadma :**

À Setti Fadma, l'implantation du village sur un cône de déjection (Fig.65), ainsi que l'installation des terrasses de cafés et de restaurants ont modifié le bon fonctionnement du lit (Fig. 66). La délimitation des différents lits s'avère donc difficile. La route étant un obstacle aux écoulements provenant du versant. Ces derniers se concentrent dans des ravins qui passent sur la route pour rejoindre le cours d'eau principal.



**Figure 65: Hydro-géomorphologie de la vallée de l'Ourika à Setti Fadma**



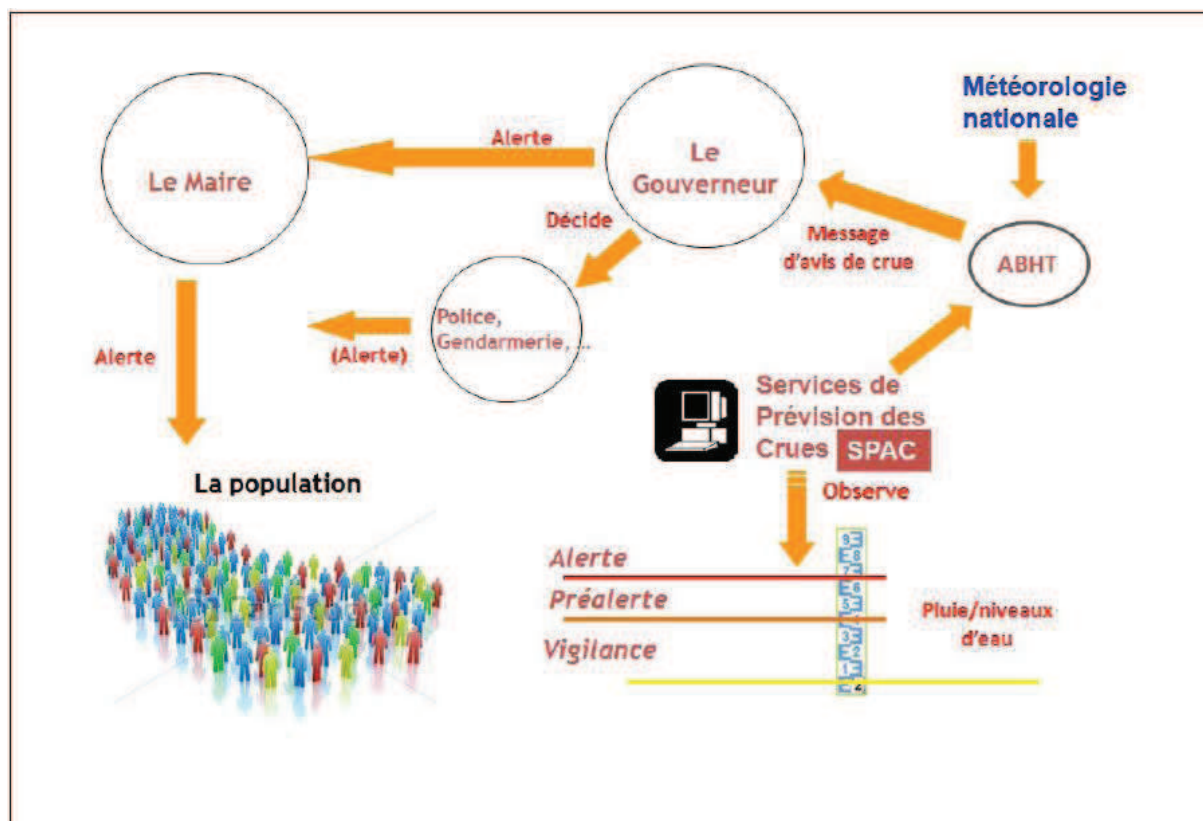
**Figure 66: Empiètement des terrasses de restaurants sur le cours d'eau à Setti Fadma.**

## **II. Diagnostic territorial et intégré du risque d'inondation**

### **II.1. Système de Prévision et d'Alerte aux Crues**

Le Maroc a bénéficié d'une coopération internationale pour développer le projet de la mise en place d'un Système de Prévision et d'Alerte aux Crues (SPAC) au niveau du Haut Atlas. Une élaboration du plan directeur du SPAC dans la zone du Haut Atlas a d'abord été effectuée. Elle a été suivie de l'installation du projet pilote dans la vallée de l'Ourika en 2001. Plus tard, il y a eu l'extension du projet dans le reste du bassin versant de l'Ourika et dans des bassins versants voisins comme celui de la Rheraya.

La procédure générale du système d'alerte fait recours à plusieurs intervenants permettant une bonne transmission de l'information et par défaut une bonne gestion du risque. La figure 67 résume les éléments et fonctionnements du SPAC.



**Figure 67: Composantes et fonctionnement général du SPAC. (ABHT)**

## **II.2. Composantes du système de prévision et d’alerte aux crues « SPAC ».**

Le SPAC «Système de Prévision et d’Alerte aux Crues» est un système hydrométéorologique crée en décembre 2001 avec l’appui de l’agence japonaise de coopération internationale (JICA). Ce système se base sur une étude des données pluviométriques et des hauteurs d’eau pour juger s’il y a lieu ou non de donner une alerte. Il est administrativement géré par deux parties :

- Le ministère de l’Équipement qui est responsable de l’observation hydrologique, la collecte et l’analyse des données ;
- Le ministère de l’intérieur chargé de l’émission d’alerte et l’évacuation des gens.

Le système est réalisé dans un premier temps sur le bassin d’Ourika comme un projet pilote (Fig. 68) pour tester et confirmer la précision du projet ; réduire les pertes humaines et les dégâts matériels et examiner l’efficacité des équipements et du système de prévision proposé.

Le bassin versant de l'Ourika est équipé d'un seul poste de commande d'alarmes qui permet de donner l'alerte au bon moment par le système de prévision et d'alerte aux crues. Il est installé à Igharf, avertissant ainsi les estivants et la population locale par des haut-parleurs.

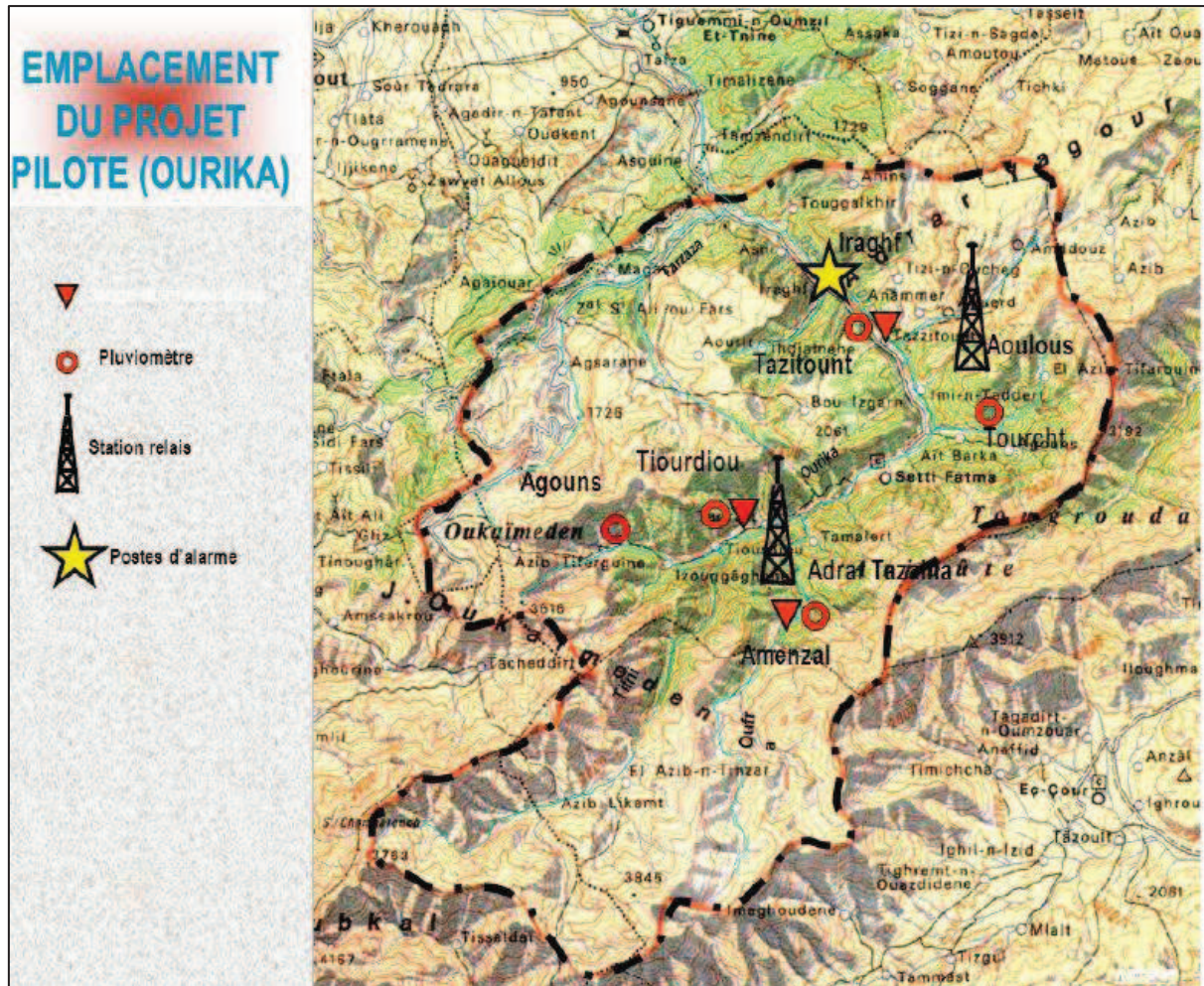


Figure 68: Emplacement des zones du projet à Ourika. (ABHT)

### II.3. Fonctionnement et exploitation du SPAC :

Pour le fonctionnement du SPAC, un événement de crue est divisé en quatre phases : une phase normale, une phase préparatoire, une phase d'observation de la crue et éventuellement la phase d'évacuation selon l'ampleur de cette crue.

La phase normale précède la crue et c'est la phase des messages d'alerte ou de préalerte diffusés par la Direction de la Météorologie nationale. Les principales administrations doivent observer une permanence de 24h/24h, et les équipements du SPAC doivent être maintenus en bonnes conditions. Cette phase est aussitôt suivie de la phase préparatoire où l'ABHT émettrait des préavis de crues ou d'écoulement de débris. Si la situation ne se détériore pas,

cette phase préparatoire s'achève. La phase d'observation est déclenchée quand la situation se détériore au point que de fortes précipitations et une augmentation significative des eaux de l'oued sont remarquées. Si la situation de la crue se stabilise, on retourne à la phase normale. La phase d'évacuation est la période pendant laquelle la situation de la crue s'est détériorée au point de rendre nécessaire une évacuation. Dès que la situation s'améliore, l'ABHT peut annuler tous les messages d'avis de crue et d'écoulement des débris. La phase d'évacuation se termine alors et celle de l'observation de la crue reprend.

Le fonctionnement du SPAC est réparti sur quatre étapes :

### **II.3.1. Prévision météorologique et collecte des données hydrologiques:**

Les stations sont équipées de systèmes de télémétrie automatique qui permettent les mesures des pluies et des niveaux d'eau en temps réel et leur transmission à l'ABHT. Cette transmission est garantie par deux relais, chacun comporte deux émetteurs et deux récepteurs.

La transmission des données est assurée sur une fréquence horaire. Dès que les précipitations de plus d'une minute sont enregistrées, l'intervalle de prise de mesures et de transmission est porté à 10 minutes pour noter toute augmentation soudaine de pluie.

### **II.3.2. Analyse des données, prévision, émission des avis de crues et diffusion des informations :**

Les données de pluies et du niveau d'eau sont réceptionnées à l'ABHT sous forme graphique et numérique. Le traitement de ces données se fait grâce à un serveur qui assure l'extraction des précipitations qui dépassent les seuils de pré alerte et d'alerte prédéfinis (tableau 26). Sur la base de ces données et des prévisions effectuées, l'ABHT se charge de l'émission des messages d'alerte.

**Tableau 20: Les seuils de précipitations définis pour l'alerte et la préalerte par l'ABHT.**

| Pré-alerte |                            | Alerte |                            |
|------------|----------------------------|--------|----------------------------|
| Durées     | Hauteur des précipitations | Durées | Hauteur des précipitations |
| 10 min     | 5 mm                       | 10 min | 15 mm                      |
| 60 min     | 10 mm                      | 60 min | 30 mm                      |

### **II.3.3. Déclenchement et diffusion de l'alerte :**

Les autorités de la région doivent émettre les alertes de crues qui appellent directement à la vigilance et à la planification de l'évacuation des riverains et des touristes se trouvant dans les zones à haut risque.

La diffusion de l'alerte aux crues se fait à l'aide des 11 postes d'alarme qui couvrent la vallée de l'Ourika et qui sont équipés d'un radiotéléphone qui permet la communication des informations relatives aux crues aux autorités.

### **II.3.4. L'évacuation :**

Une fois l'alerte de crue lancée, la province et la protection civile prennent en charge l'évacuation des populations. Cette dernière doit être effectuée rapidement et correctement en suivant un plan préparé pour toutes les zones à haut risque et qui comporte :

- La localisation des sites et routes d'évacuation ;
- La disponibilité des équipements ;
- La présence d'assistance pour les touristes ;
- Le partage de l'information et l'éducation.

## **II.4. Caractérisation des enjeux**

Afin de caractériser les différents enjeux relatifs à la vallée de l'Ourika, trois points essentiels sont à traiter dont l'occupation du sol, l'exposition et vulnérabilité des bâtiments et enfin la fréquentation du bâti et des espaces extérieurs.

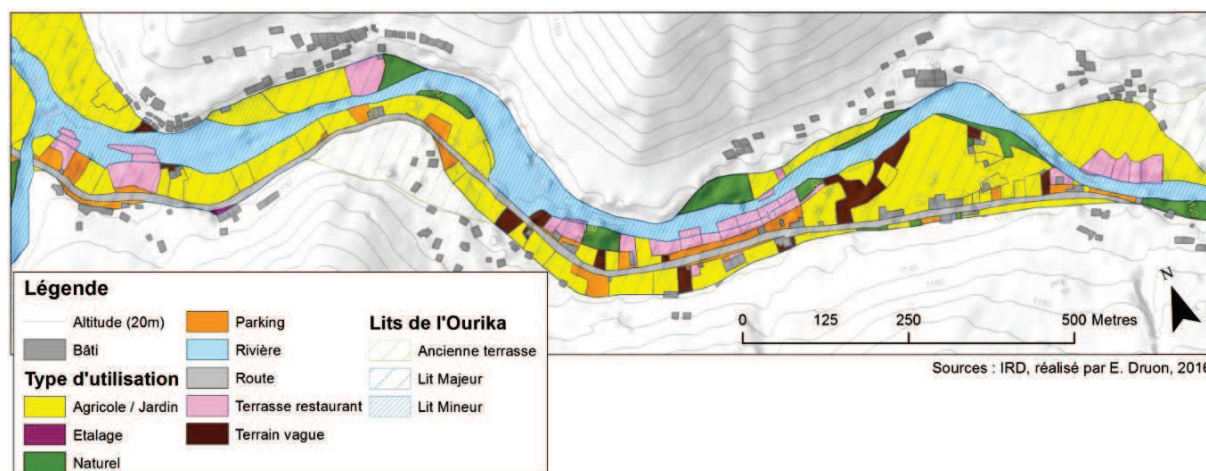
### **II.4.1. Occupation du sol :**

La détermination de l'occupation du sol nous a permis d'avoir une vision précise sur l'utilisation de l'espace dans les zones les plus exposées à l'aléa et de l'implantation des activités anthropiques dans les lits de la rivière. Elle permet également d'avoir une vue d'ensemble sur le territoire et ainsi de cibler les zones d'action.

Plusieurs classes ont été créées : les bâtiments, les parcelles agricoles ou jardins, les étalages devant certains magasins, les espaces naturels - couverts de végétation, les parkings, la rivière, la route, les terrasses de restaurant et enfin les terrains vagues.

### *a. Site d'Aghbalou :*

Dans cette zone, la largeur du fond de la vallée permet à l'agriculture de bien s'étendre (Fig. 69). Les points touristiques sont répartis en trois parties, une à l'entrée du village d'Aghbalou, une au centre et la dernière un peu en amont au niveau du douar d'Aghbalou.

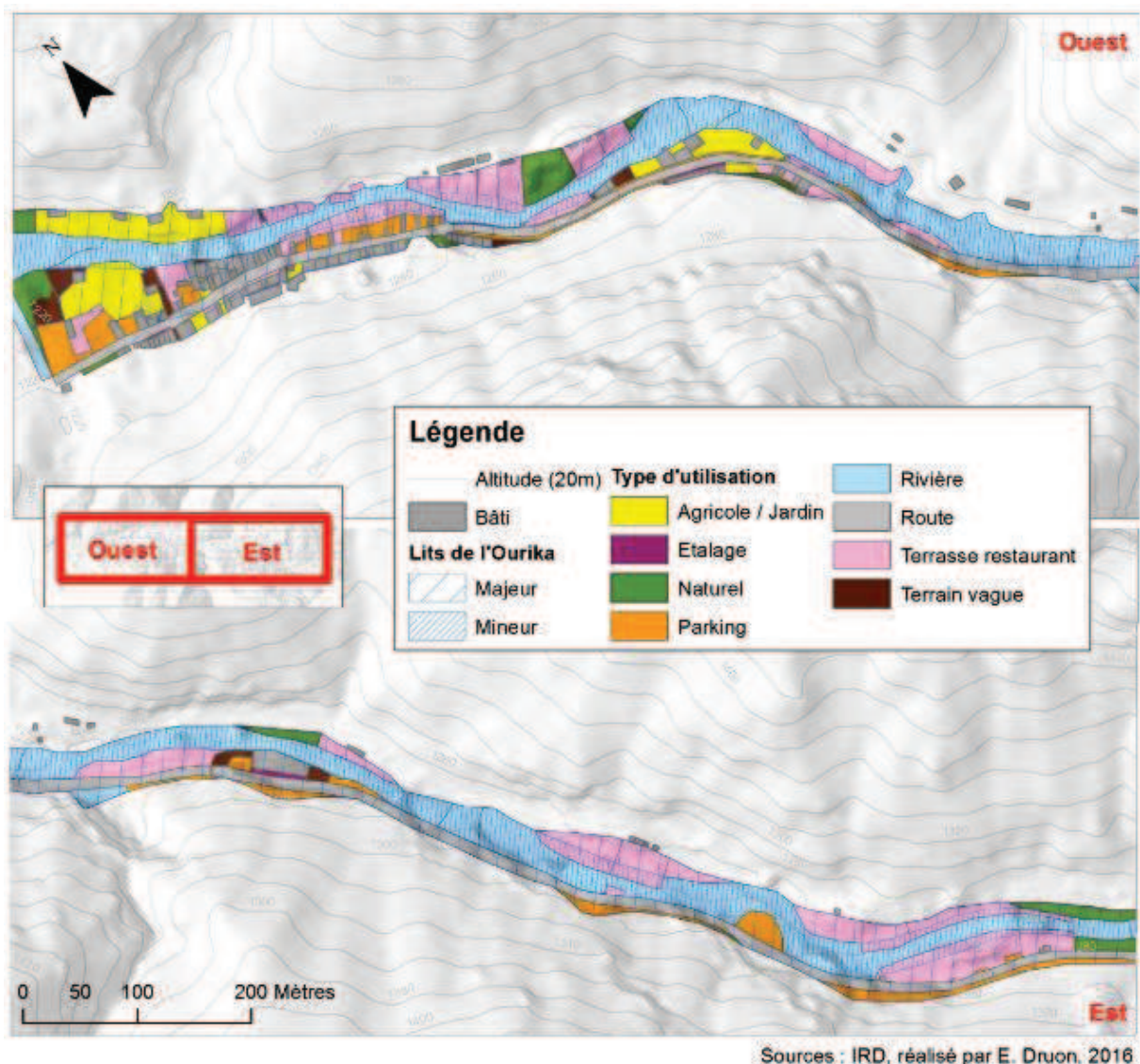


**Figure 69: Occupation du sol de la vallée de l'Ourika à Aghbalou**

### *b. Site d'Oulmes :*

Au niveau d'Oulmes (Fig. 70) on distingue l'entrée du village qui est relativement large et qui est caractérisée par la présence de quelques espaces agricoles. En amont du village, la vallée se resserre et il ne reste plus que la route et les restaurants situés dans le lit de l'Oued.

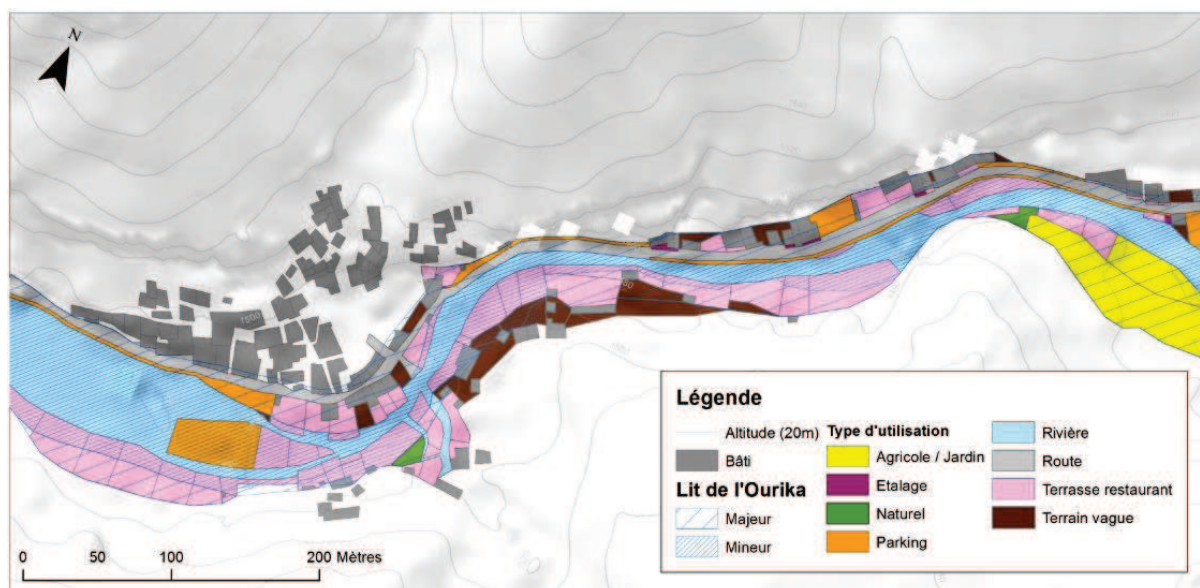




**Figure 70: Occupation du sol dans la vallée de l'Ourika à Oulmes**

*c. Site de Setti Fadma :*

Comme il semble être le point le plus attractif de l'Ourika, le village de Setti Fadma est caractérisé par une activité touristique remarquable. La majorité des espaces sont occupés par des parkings et des terrasses de restaurants (Fig. 71). C'est la zone la plus fréquentée et ce à cause, entre autres, de chutes d'eau et de cascades attractives.



**Figure 71: Occupation du sol de la vallée de l'Ourika à Setti Fadma**

#### **II.4.2. Exposition et vulnérabilité du bâti :**

Pour l'analyse de la vulnérabilité et en se référant à la littérature, il a été possible de créer un indice de risque pour les bâtiments. Plusieurs facteurs influencent la vulnérabilité tels que la géographie, la population, la socio-économie ...etc. (Léone *et al.* 2012). Cependant nous nous sommes concentrés sur les facteurs de vulnérabilités intrinsèques aux bâtiments.

Plusieurs guides méthodologiques pour le diagnostic de la vulnérabilité seraient disponibles. Celui proposé par le Centre européen de Prévention des Risques d'Inondation (CEPRI, 2010), retient comme points essentiels :

- La capacité du bâtiment à résister aux sollicitations exceptionnelles.
- L'existence d'une zone hors d'eau pour se réfugier
- La possibilité pour les secours d'atteindre facilement l'habitation
- Les risques liés aux équipements (électrocution, explosion de gaz,...)
- Les risques liés à la modification de l'environnement (effondrement de voirie ou mur, sols glissants)

En prenant appui sur la méthodologie adoptée par certains auteurs Léone *et al.* (2012), les critères de vulnérabilité (Tableau 27) retenus sont :

**Tableau 21: Critères de vulnérabilités des bâtiments face aux crues torrentielles de l'Ourika**

|               |                 | Critères des bâtiments   |
|---------------|-----------------|--|
| vulnérabilité | Sur le Terrain  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Isolé/ Groupé</li> <li>- Nombre d'étages</li> <li>- Matériaux de construction</li> <li>- Mur de clôture</li> <li>- Grille aux fenêtres</li> <li>- Ouverture au RDC</li> </ul> |
|               | SIG « Arc Gis » | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Surface supérieure à 100 m<sup>2</sup></li> </ul>   |

Chaque critère apporte une information sur la capacité du bâtiment à résister à une crue et à permettre aux habitants d'être en sécurité. Pour chacun de ces critères un nombre de points est attribué, en additionnant ces points on obtient l'indice de vulnérabilité.

Afin d'appliquer l'équation classique qui veut que le risque soit le produit d'un aléa et d'une vulnérabilité. L'incorporation des critères d'exposition (Tableau28) est obligatoire pour calculer approximativement la section mouillée à partir de laquelle un bâtiment serait touché par une inondation.

$$Exposition = (L Min \times (H Min - S) + S \times L Maj) + D Min$$

**Tableau 22: Critères d'exposition des bâtiments face aux crues torrentielles de l'Ourika**

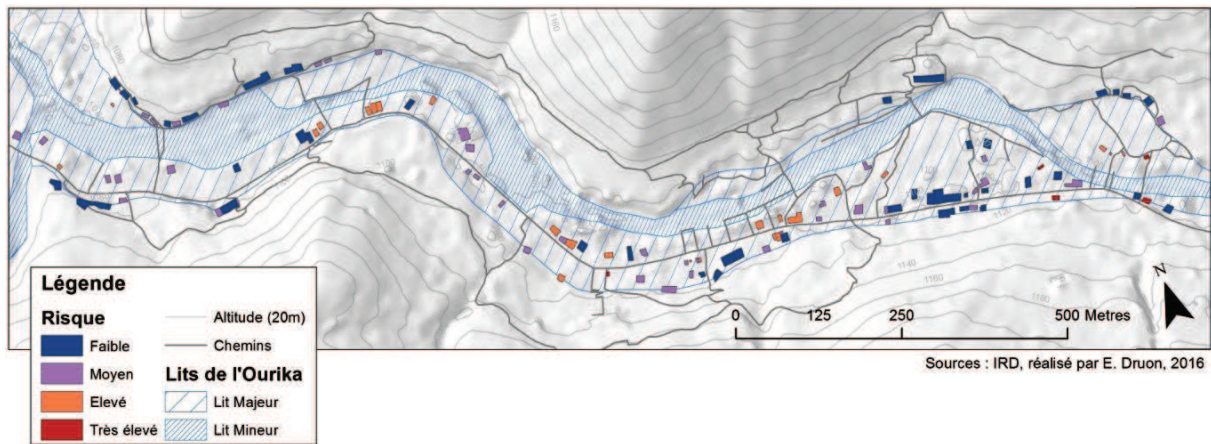
|            |                | critères  |
|------------|----------------|---|
| Exposition | Sur le Terrain | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Hauteur par rapport au lit mineur ;</li> <li>- Surélévation par rapport au terrain naturel.</li> </ul>               |
|            | SIG            | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Distance par rapport au lit mineur ;</li> <li>- Largeur du lit mineur ;</li> <li>- Largeur du lit majeur.</li> </ul> |

Pour obtenir les valeurs relatives à ces critères d'exposition, un télémètre laser a été utilisé et le calcul des distances et des largeurs a été effectué sous SIG.

À la vallée de l'Ourika, il existe peu de bâtiments résistants, comme le collège d'Aghbalou et la grande mosquée de Setti Fadma, qui sont tous deux localisés loin de la zone à risque et qui font objet de zone de refuge en cas de crue.

*a. Site d'Aghbalou :*

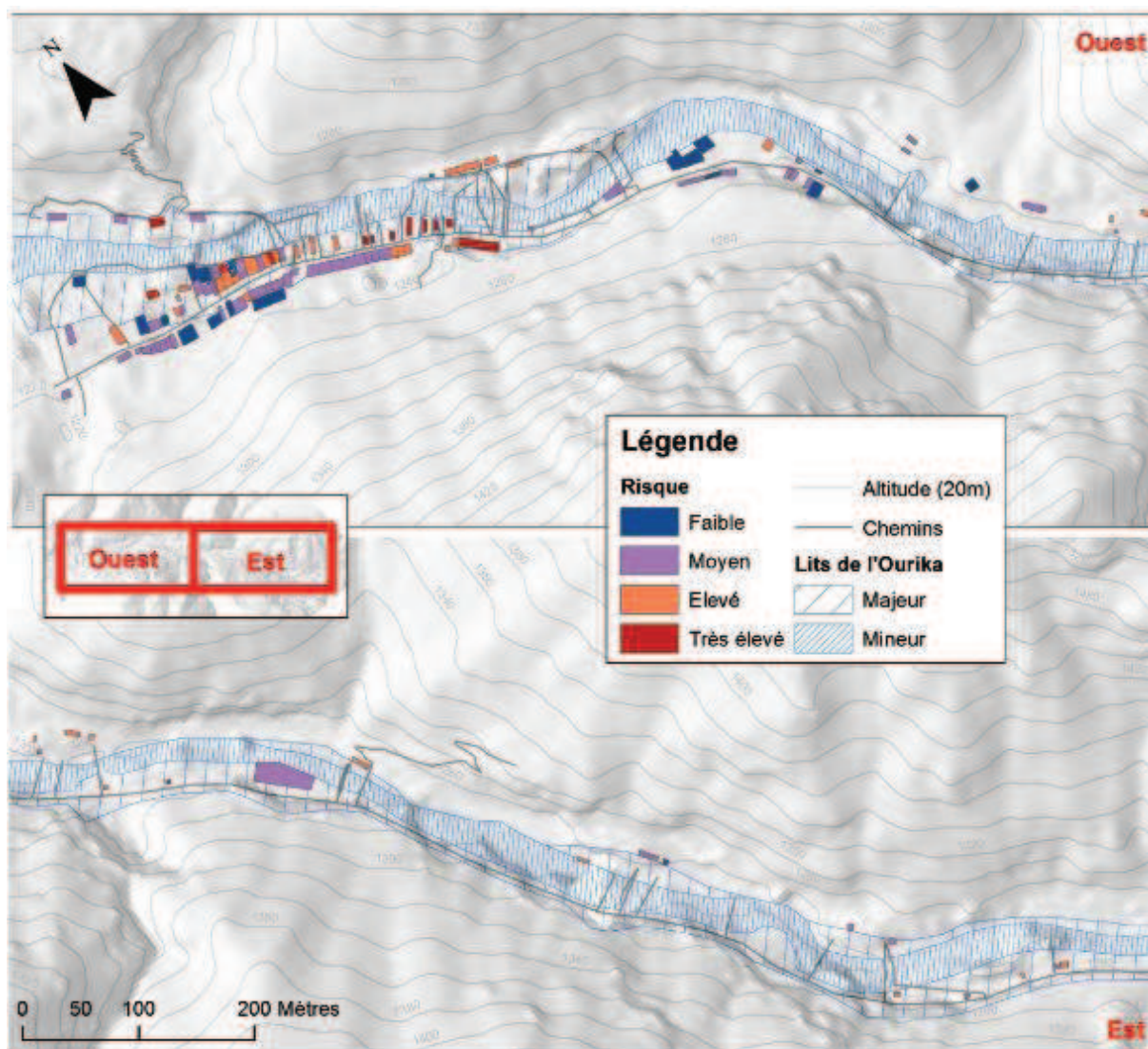
À Aghbalou, peu de bâtiments sont exposés au risque (Fig. 72), cela s'explique en partie par la largeur du lit de l'Oued à cet endroit. Avec plus d'espace, les crues s'étalent et n'atteignent pas de grandes hauteurs.



**Figure 72: Indice de risque des bâtiments à Aghbalou**

*b. Site d'Oulmes :*

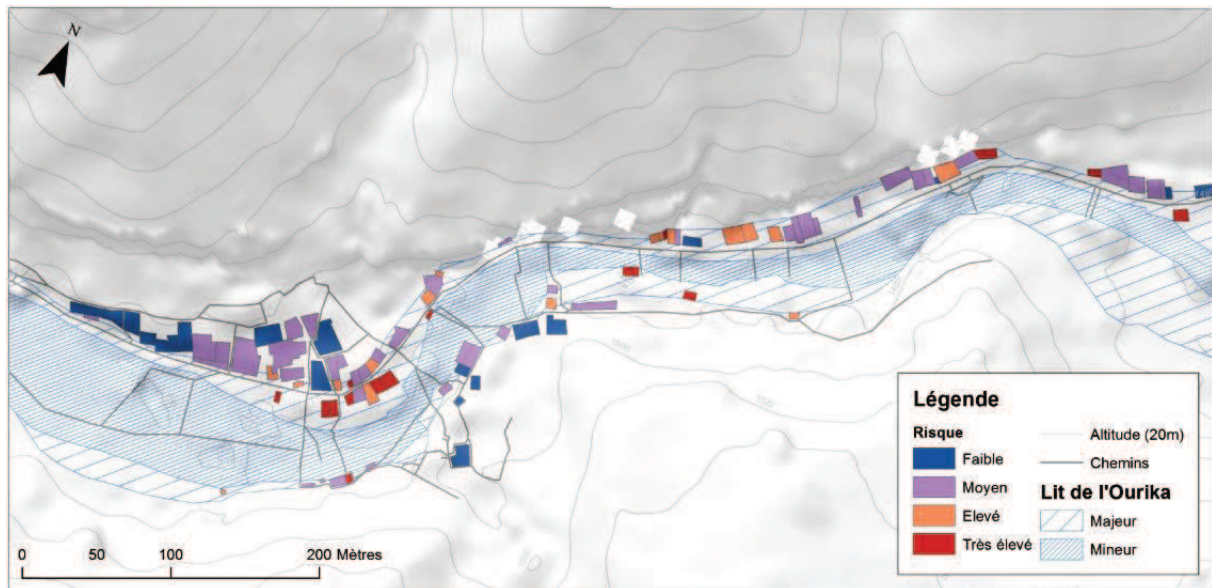
Au centre du village d'Oulmes, les bâtiments situés sur la rive gauche ont généralement un indice de risque assez faible et ce grâce à leur construction sur les pentes. En outre, à l'entrée du village en provenant de la ville de Marrakech, les bâtiments ont un indice de risque assez élevé. Dans cette partie de la vallée, la majorité des constructions sont de faible résistance et la route est très basse et du coup très proche du lit de l'Oued (Fig.73).



**Figure 73: Indice de risque des bâtiments à Oulmes**

*c. Site de Setti Fadma :*

Les bâtiments de Setti Fadma les plus exposés (Fig. 74) sont à utilisation touristique (restaurants, commerces et hôtels), avec des indices de risque élevés, cette zone est qualifiée pour être la plus vulnérable face aux crues de la vallée.



**Figure 74: Indice de risque des bâtiments à Setti Fadma**

### II.4.3. Fréquentation du bâti et des espaces extérieurs:

Le but principal de cette partie de l'étude est d'identifier les poches d'enjeux humains ainsi que la quantification de leur fréquentation. Pour ce, les comptages ont été plus concentrés sur les zones de grande sensibilité et à haute fréquentation.

#### *a. Comptage des terrasses :*

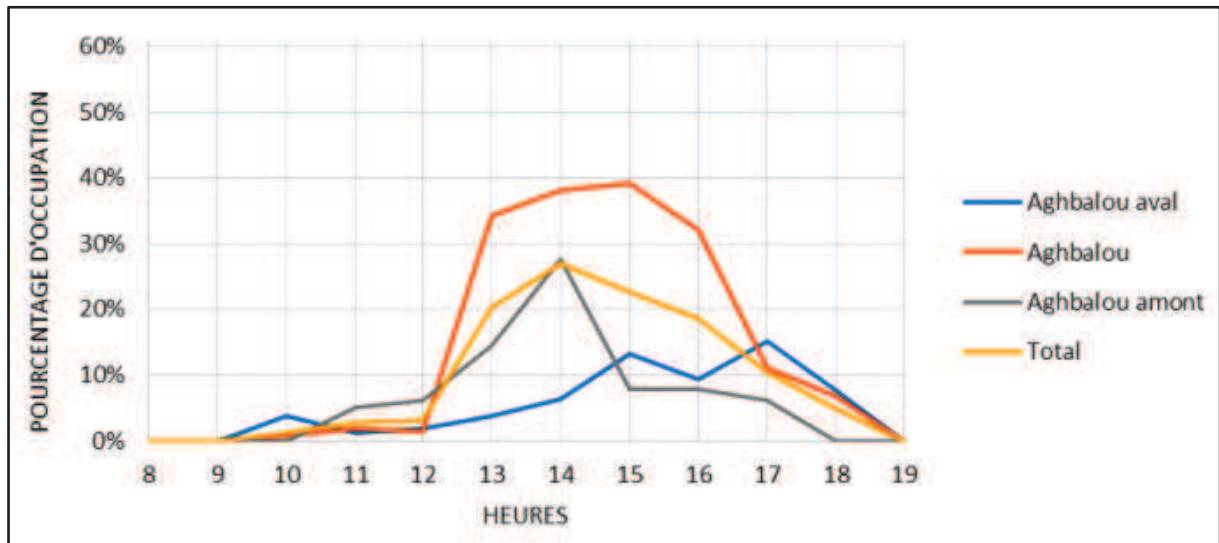
Une mesure de la capacité maximale a été réalisée pour tout espace fortement fréquenté. Concernant les restaurants et les hôtels, le comptage de nombre des places disponibles est facilement réalisable. En outre le comptage des personnes profitant de la fraîcheur de la rivière et de la beauté de la vallée, sans pour autant s'installer dans l'un des bâtiments faisant objet de comptage préalable, est à prendre en considération. De ce fait la capacité maximale obtenue fut augmentée d'à peu près 10% après observation empirique.

Plusieurs comptages ont été effectués par la suite au niveau des terrasses de restaurants en tant qu'espaces accueillant le plus de monde. Ces comptages concernent les trois zones étudiées et selon différentes périodes.

#### ➤ Site d'Aghbalou :

Le premier comptage s'est déroulé le samedi 19 mars 2016 sur le secteur d'Aghbalou. L'activité des restaurants a débuté vers 9h du matin avec l'installation des tables et des chaises. L'apparition d'épisodes nuageux a stoppé l'activité, il est donc fort probable que la météo influence la fréquentation surtout dans les périodes à risque de pluies intenses. En effet,

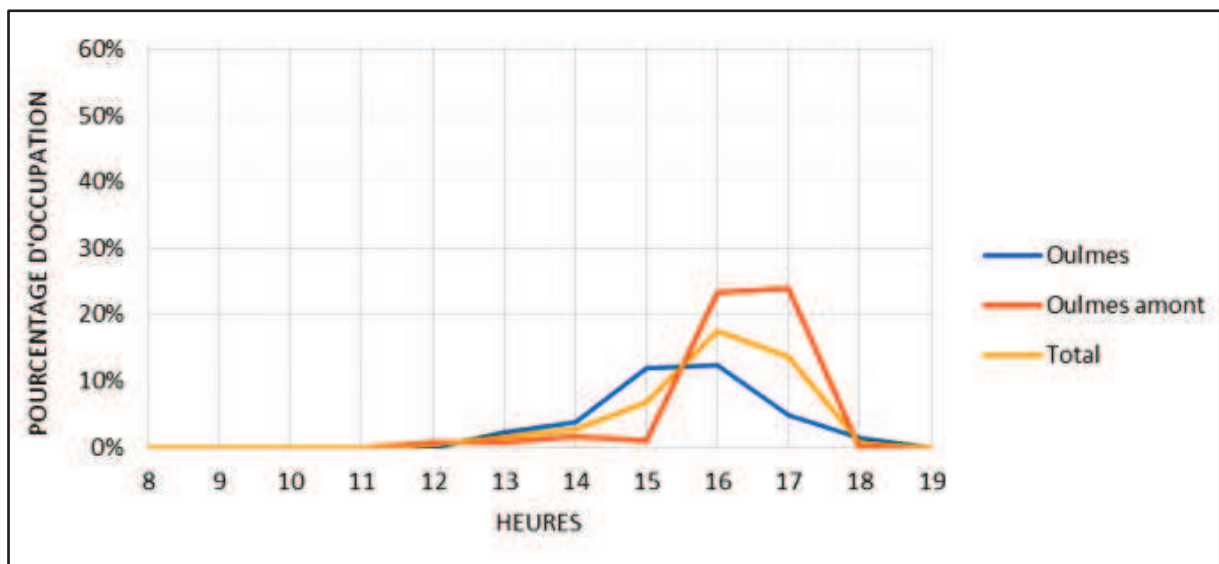
dans cette période de l'année l'activité touristique reste faible avec moins de 30% d'occupation des terrasses au total (Fig. 75).



**Figure 75: Occupation des terrasses des restaurants à Aghbalou le 19 mars 2016**

➤ Site de Oulmes :

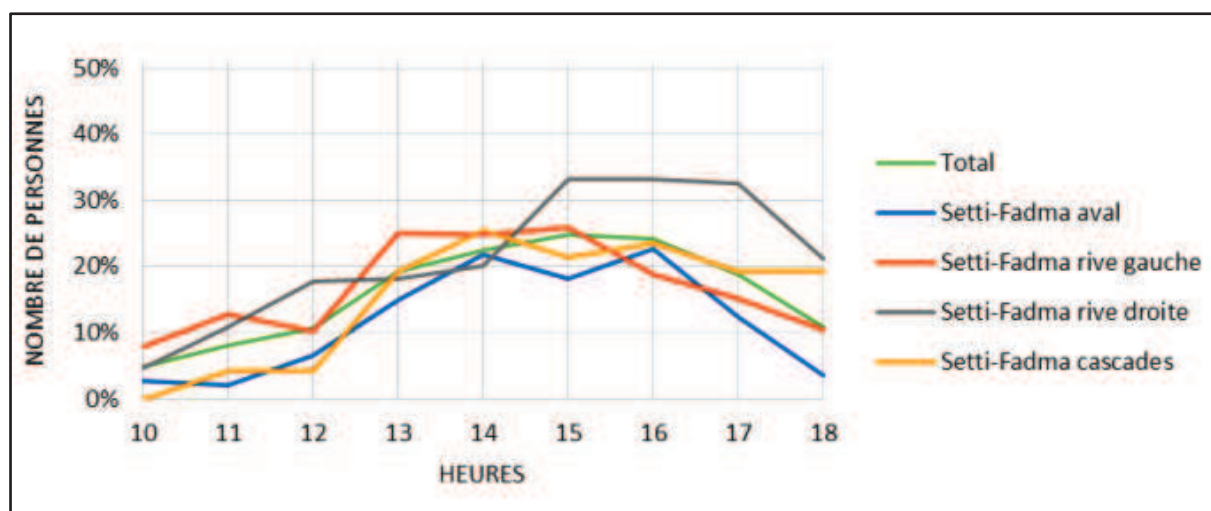
Le deuxième comptage a eu lieu le samedi 26 mars 2016 à Oulmes (Fig. 76). De par son aspect touristique, Oulmes connaît plus de visites qu'Aghbalou. Le nombre des visiteurs en cette période est moins important qu'en été, surtout que la semaine précédant le comptage était bien pluvieuse, ce qui peut potentiellement réduire la fréquentation touristique.



**Figure 76: Occupation des terrasses des restaurants à Oulmes le 26 mars 2016**

➤ Site de Setti Fadma :

Le dernier comptage s'est déroulé les 24 avril 2016 (Fig. 77). À Setti Fadma la dynamique est très différente des autres sites préalablement traités. En effet l'activité, touristique commençait plus tôt qu'à Aghbalou et Oulmes. Même hors saison, le village est plein et les hôtels sont quasiment tous occupés.



**Figure 77: Occupation des terrasses des restaurants à Setti Fadma le 24 avril 2016**

Dans l'ensemble, l'étude de l'occupation des terrasses des restaurants représente une partie très importante, sauf que la donnée collectée peut varier selon les différentes périodes de l'année. En complément de cette fréquentation en terrasses, la circulation des véhicules permet aussi de visualiser l'affluence dans la vallée.

***b. Comptage des véhicules :***

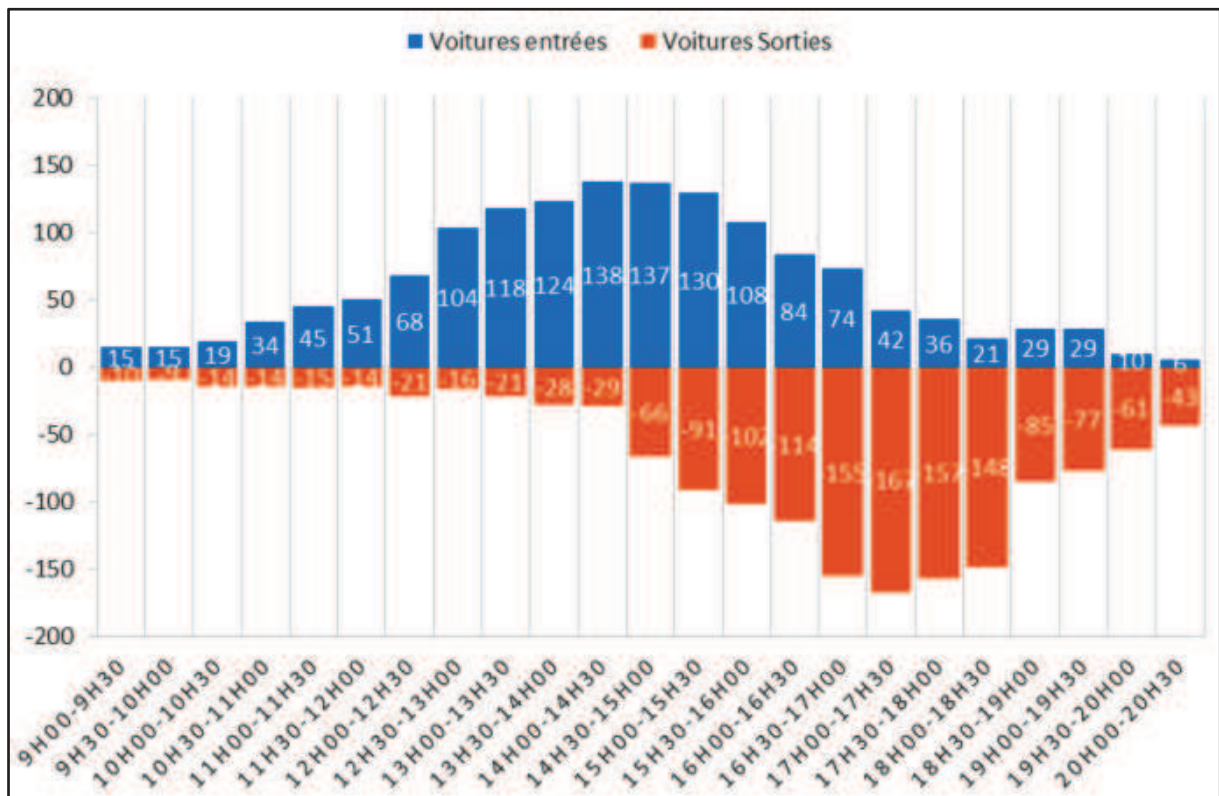
Afin d'optimiser les résultats de la fréquentation de la vallée à l'aide des comptages en terrasses, nous avons effectué un comptage des véhicules. L'Ourika ne compte qu'une seule route faisant objet de passage obligatoire pour tous les visiteurs. Le comptage des véhicules entrants et sortants pendant une journée donnée nous a permis d'avoir une information quantitative sur le nombre de véhicules et par extrapolation sur le nombre de visiteurs.

➤ Premier comptage :

Le premier comptage des véhicules a eu lieu le 27 mars 2016 à l'entrée de la vallée de l'Ourika. La fréquentation était un peu influencée par la météo en cette période.

Le comptage a démarré aux alentours de 9h du matin et s'est arrêté à 20h30 (Fig. 78).



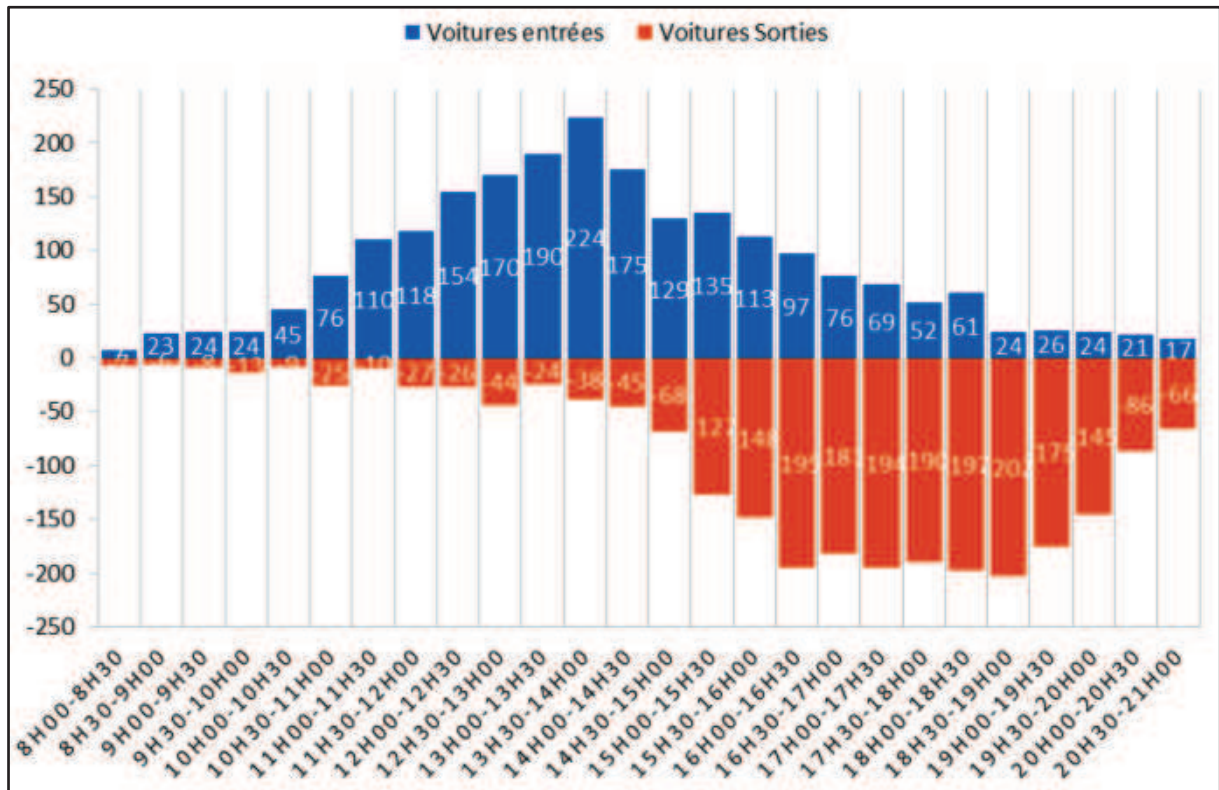


**Figure 78: Circulation des véhicules dans la vallée de l'Ourika le dimanche 27 mars 2016**

D'après le graphe, on peut voir que le nombre des voitures entrantes suit une loi normale avec un maximum enregistré entre 14h et 15h. La sortie des véhicules débute à 14h30 et enregistre son maximum entre 17h et 17h30.

➤ Deuxième comptage :

Le 1<sup>er</sup> mai 2016 a fait objet du deuxième comptage des véhicules. Du fait qu'il s'agit d'un jour férié, le nombre des véhicules entrants à la vallée était plus important (Fig.79).



**Figure 79: Circulation des voitures dans l'Ourika le dimanche 1 mai 2016**

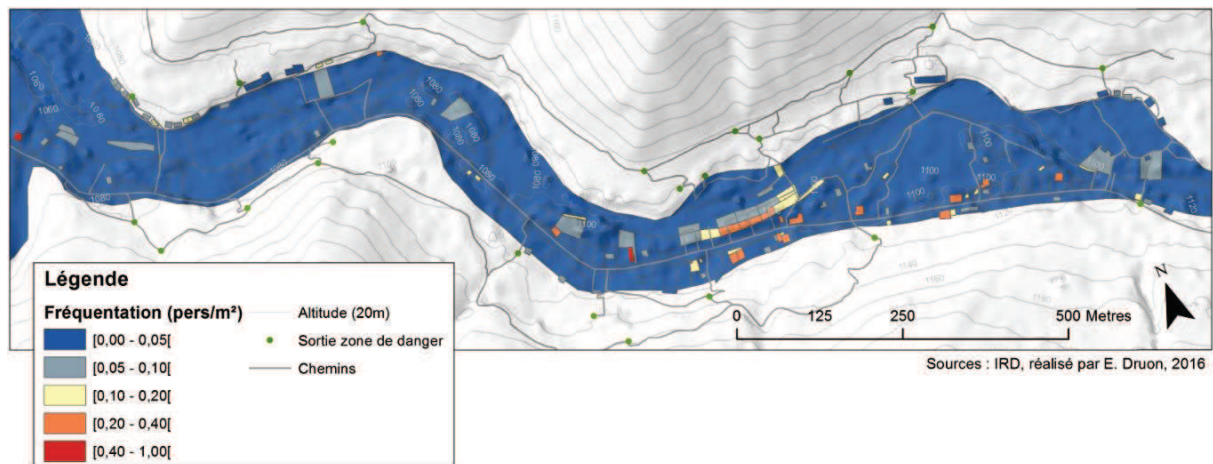
Lors de ce comptage, on enregistre un pic d'entrée entre 13h30 et 14h. Vers le coup de 15h, la sortie des véhicules commence à être importante. Les grands départs sont enregistrés globalement entre 16h et 19h. Cette journée nous donne une petite idée sur la situation de la vallée, qui serait bien pleine en été.

*c. Spatialisation de la fréquentation :*

En se basant sur les données d'occupation du sol et à partir des informations sur la fréquentation, une identification des zones à fréquentation considérable dans la vallée a été possible.

➤ Site d'Aghbalou :

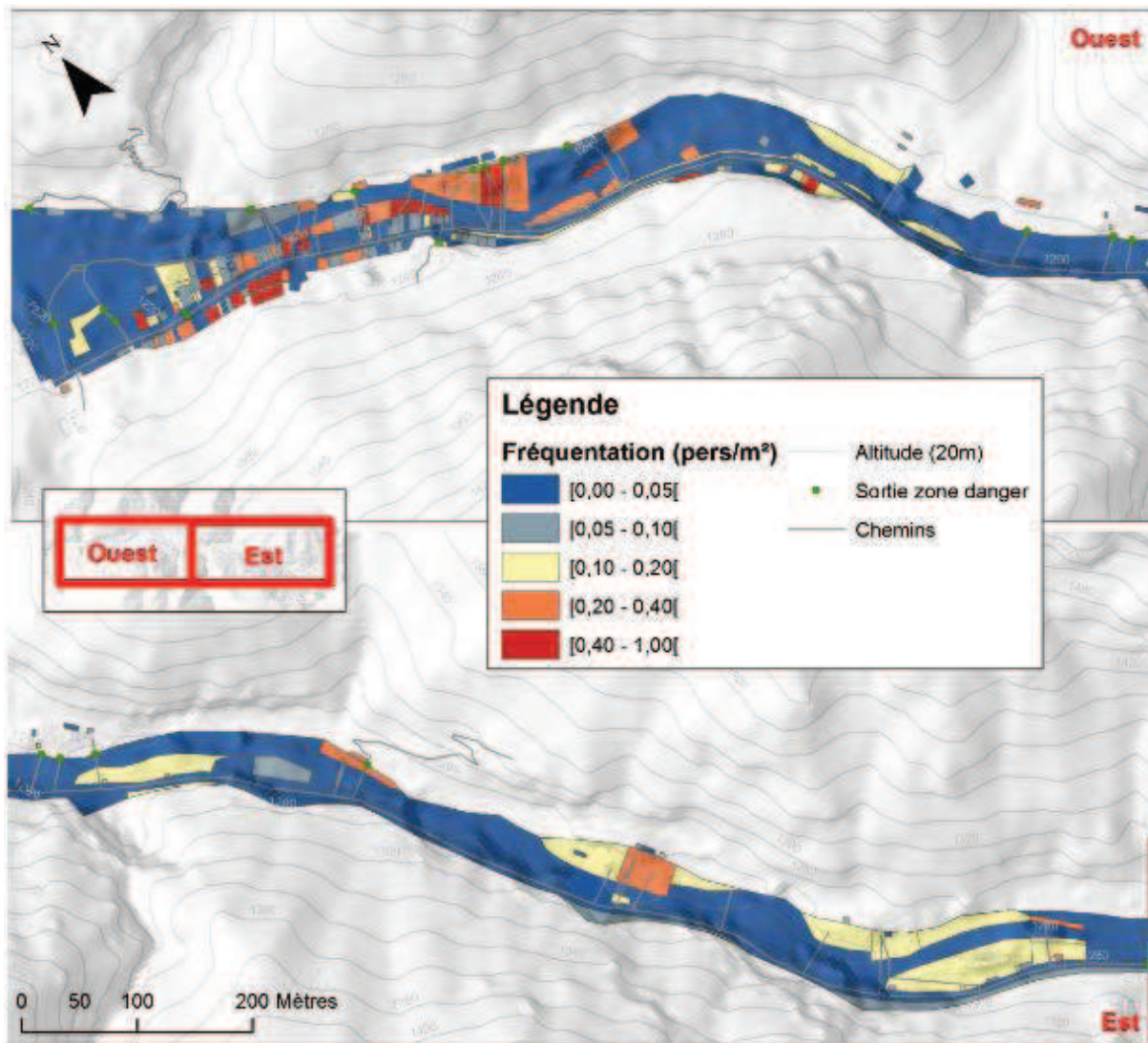
Vu sa localisation à l'entrée de la vallée de l'Ourika. Aghbalou présente une petite zone d'enjeux au niveau des restaurants, sinon le reste du village reste très peu fréquenté (Fig. 80).



**Figure 80: Fréquentation des espaces extérieurs et des bâtiments à Aghbalou**

➤ Site de Oulmes :

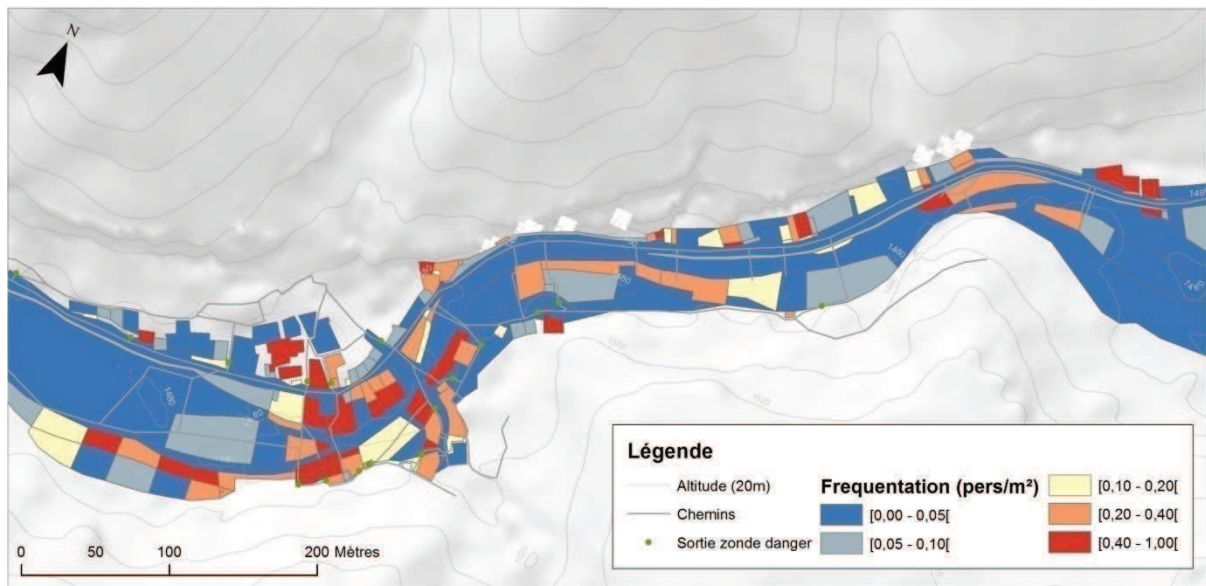
Le village d'Oulmes connaît une présence importante de restaurants et d'hôtels et donc une fréquentation plus importante qu'à Aghbalou (Fig. 81). Il représente donc un point noir surtout qu'une grande partie des enjeux est menacée par les inondations. Tout au long de l'Oued se trouvent des restaurants « les pieds dans l'eau », augmentant ainsi le risque.



**Figure 81: Fréquentation des espaces extérieurs et des bâtiments à Oulmes**

➤ Site de Setti Fadma :

Setti Fadma, ayant pour principale vocation le tourisme, représente la zone pouvant accueillir le plus de monde. En effet la figure 82 témoigne de la fréquentation importante que connaît cette partie de la vallée de l'Ourika.



Sources : IRD, réalisé par E. Druon, 2016

**Figure 82: Fréquentation des espaces extérieurs et des bâtiments à Setti Fadma**

Ces trois cartes donnent une vision globale sur la fréquentation des trois zones étudiées de la vallée de l'Ourika. Il faut tenir en compte la différence entre le jour et la nuit, où la fréquentation est moindre, mais les gens sont concentrés au niveau des habitations et des hôtels qui sont parfois situés en zone inondable.

## II.5. Zones de refuges et plans d'évacuation

### II.5.1. Les zones de refuges :

La proposition de zones de refuge est un enjeu essentiel pour compléter cette étude tout en essayant de minimiser au maximum les pertes en vies en cas de crue. Tout d'abord une localisation des zones de refuges potentiels a été effectuée, suivie de l'évaluation de la qualité de ces derniers ainsi que le calcul de leur capacité d'accueil. Selon [Léone et al. \(2012\)](#), il existe deux types de zones refuges, une verticale (infrastructures) et une horizontale (topographie). Et en littérature, plusieurs critères de hiérarchisation des zones refuges sont pris en considération dont l'altitude, la disponibilité, la capacité d'accueil et la connectivité.

Les zones refuges choisies doivent être loin des zones d'aléa préalablement identifiées. Vu le contexte montagnard, il a été difficile de prendre en considération tous les critères. En effet, étant entourée par des pentes assez fortes, la vallée de l'Ourika est limitée en termes de possibilités d'évacuation.

À part les zones refuges existant dans la vallée, il n'y a que des petits chemins étroits situés hors de la zone exposée ou des toits de bâtiments se trouvant à la frontière de la zone à risque.

Les caractéristiques de ces zones potentielles rendent ardue la quantification de leur capacité, mais cela n'empêche qu'elle reste très limitée. Concernant la connectivité, il n'y a pas de chemin facilement accessible pour se mettre rapidement en sécurité en cas de crue.

Les vergers même encombrés par les arbres et des espaces naturels recouverts de rochers, peuvent aussi faire objet de zones refuge, sauf que le problème des pentes fortes et raides et couvertes de végétations entrave la bonne circulation pour atteindre ces zones. En plus de la difficulté d'accès, s'ajoute aussi le paramètre de la situation par rapport à la rivière. Si jamais en cas d'inondation, les gens se trouvent sur la mauvaise rive, le seul issu de secours est d'emprunter les ponts qui sont dangereux.

### **II.5.2. Les itinéraires d'accès :**

Le seul moyen existant pour traverser l'oued est d'emprunter un pont. En effet de nombreux ponts sont installés tout au long de la vallée de l'Ourika. Il y a ceux qui sont temporaires et d'autres, plus résistants aux crues.

Outre leur utilité pour traverser l'oued, les ponts constituent un obstacle pour la rivière. D'après la population de la vallée, les forts débits de 1995 ont été causés par la création d'embâcles sur un pont en métal en amont de Setti Fadma. Ce dernier aurait lâché créant ainsi une vague meurtrière. Cette hypothèse n'est toujours pas confirmée.

À côté des ponts permettant le passage d'une rive à l'autre, il a fallu identifier les accès dans les zones à risque et déterminer leur qualité pour l'évacuation. Pour ce, une caractérisation des chemins est essentielle.

Le type de chemin, sa nature (béton, terre ...), sa rugosité (pente et encombrement) et sa largeur permettent de mieux prévoir les itinéraires possibles ainsi que de cibler les points à haut risque. En combinant ces facteurs, des vitesses de marche sur différentes voies ont été proposées (Table. 29).

**Tableau 23: Typologie des accès**

| Catégorie | Type de chemin      | Largeur              | Nature              | Rugosité | Vitesse (Km/h) |
|-----------|---------------------|----------------------|---------------------|----------|----------------|
| 1         | Route               | Large (>2 pers)      | Béton/Asphalte      | Basse    | 5              |
| 2         |                     |                      |                     | Moyenne  | 4              |
| 3         | sentier             | Étroit (1-2 pers)    | Béton/Roches/Herbes | Basse    | 4              |
| 4         |                     |                      |                     | Moyenne  | 2.5            |
| 5         |                     |                      |                     | Elevée   | 1              |
| 6         | Point de congestion | Très étroit (1 pers) | Pont/ Escaliers     | Elevée   | 1              |

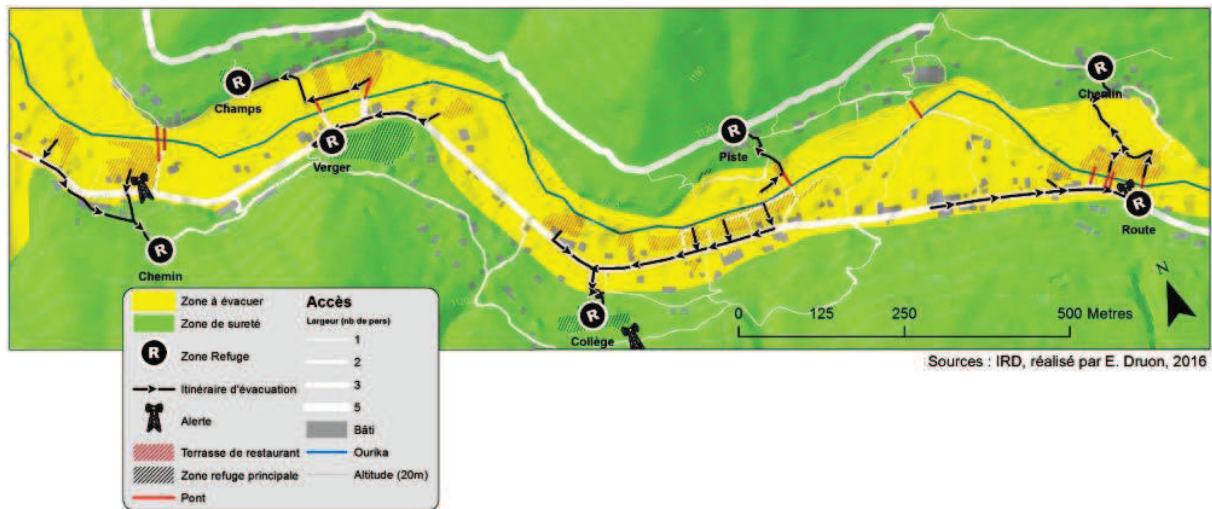
### **II.5.3. Plans d'évacuations :**

Les zones refuges proposées pour les plans d'évacuations sont en grande partie des espaces assez larges pour accueillir le maximum de personnes possible, ainsi que des points se trouvant à la sortie des zones à risque. Les itinéraires adoptés ont été choisis en se basant sur la facilité d'accès et en évitant le plus possible le passage sur les ponts.

La charte graphique définie par l'UMR GRED a été utilisée pour la présentation des résultats obtenus afin de permettre une identification facile de l'emplacement des zones refuges ainsi que les itinéraires d'accès.

#### **a. Site d'Aghbalou :**

Malgré les fortes pentes qui encadrent la zone à risque d'Aghbalou, il existe des espaces relativement plats pouvant accueillir les gens. Un verger, un petit champ ainsi que des zones de refuge en hauteur sur la rive droite de l'oued ont été retenus même s'ils offrent une capacité d'accueil très limitée et ont un accès difficile. En outre, Aghbalou dispose d'un espace sécurisé. Il s'agit du collège-internat qui a une très grande capacité d'accueil, facilement accessible (Fig. 83) et est en mesure de fournir tout le matériel de survie en cas de crue.



**Figure 83: Plan d'évacuation à Aghbalou**

***b. Site de Oulmes :***

Les possibilités sont beaucoup plus réduites à Oulmes. À l'entrée du village, il y a un panneau installé par la JICA qui indique une zone de refuge. Cependant, l'itinéraire proposé ne mène à aucune zone refuge à proprement parler. En outre un peu plus loin sur le même sentier, se trouve un espace assez large, mais qui n'est pas aménagé convenablement.

Un peu plus loin au centre du village d'Oulmes se trouve un escalier qui monte vers une zone refuge potentielle. Il est bien placé, mais ne pouvant pas accueillir un grand nombre de visiteurs. Au niveau de l'autre rive de la rivière, il existe un large terrain où peut se réfugier un grand nombre de personnes, mais il est difficilement accessible (Fig. 84).



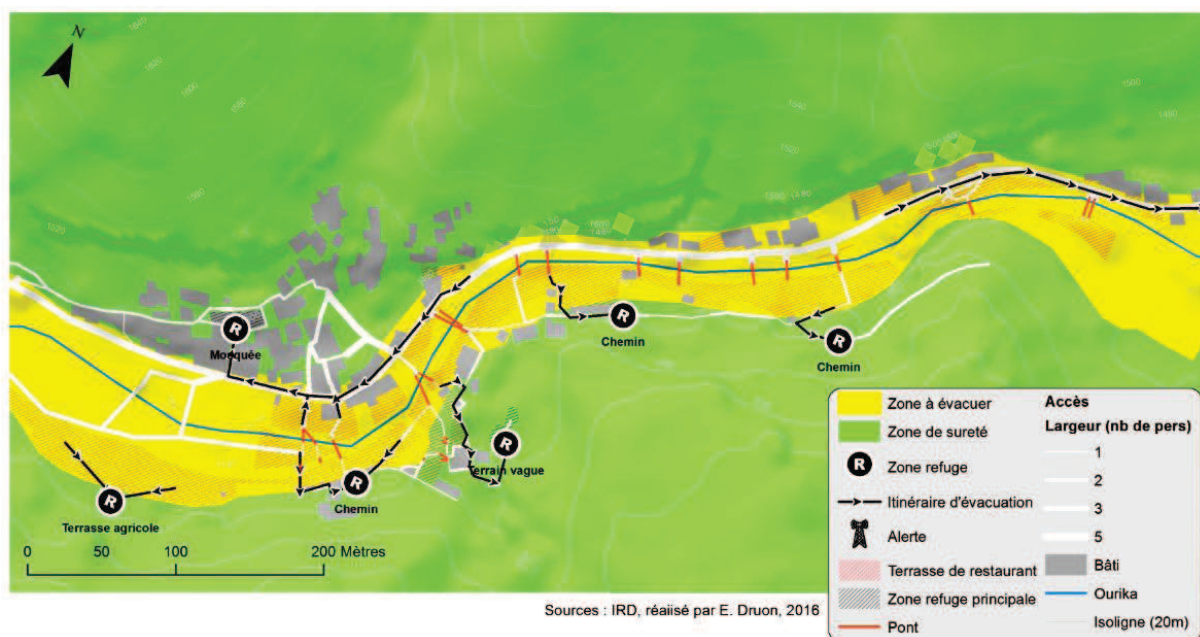


Sources : IRD, réalisé par E. Druon, 2016

**Figure 84: Plan d'évacuation à Oulmes**

*c. Site de Setti Fadma :*

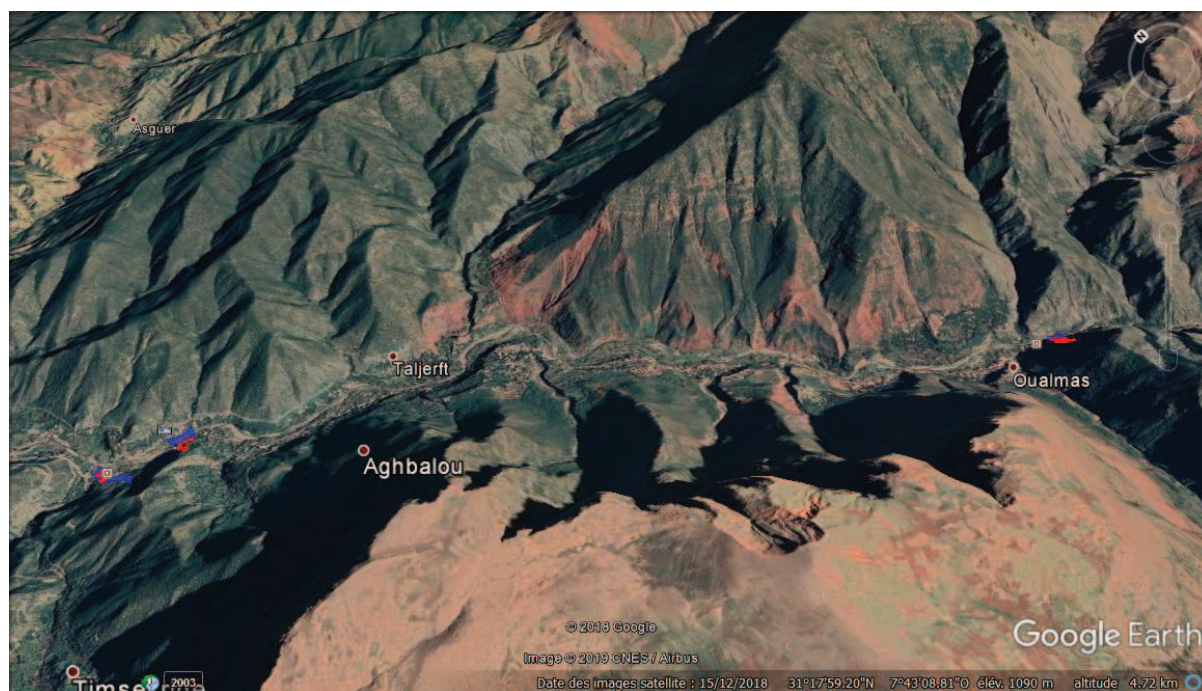
Setti Fadma dispose d'une infrastructure imposante pouvant servir de zone de refuge en cas de crue. Il s'agit de la mosquée. Par ailleurs, les autres zones refuges proposées seraient inadaptées. Avec la croissance incontrôlable du tourisme dans la région, les terrains vagues ciblés initialement dans les plans d'évacuation peuvent au cours du temps se transformer en hôtels (Fig. 85).



**Figure 85: Plan d'évacuation à Setti Fadma**

#### II.5.4. Validation des plans d'évacuation :

Pour une potentielle utilisation des plans d'évacuations proposées, une validation préalable est obligatoire, permettant ainsi la confirmation de ces derniers. Dans ce cadre, un exercice sur terrain a été effectué avec des étudiants du Master « GCRN » de l'Université Paul Valéry de Montpellier, qui ignorent complètement le contexte de la vallée de l'Ourika. Cet exercice nous a permis de tracer les itinéraires empruntés en cas d'alerte par les étudiants avec et sans plans d'évacuations. Cet exercice s'est effectué sur 3 zones vulnérables de la vallée (Fig. 86).



**Figure 86: les sites d'expérimentation des plans d'évacuation.**

L'exercice sur terrain consiste à effectuer une évacuation rapide en cas d'alerte. Cette évacuation concerne deux groupes de touristes, un groupe ayant le plan d'évacuation, proposé comme repère à suivre et un groupe n'ayant aucun repère dans la vallée.

Au niveau du premier site (Fig. 87), le repérage des zones de refuges était beaucoup plus facile pour le groupe qui a suivi le plan proposé ; tandis que l'autre groupe a pris évidemment plus de temps pour atteindre les zones potentielles de refuge.



**Figure 87: Validation du plan d'évacuation dans la région d'Aghbalou.**

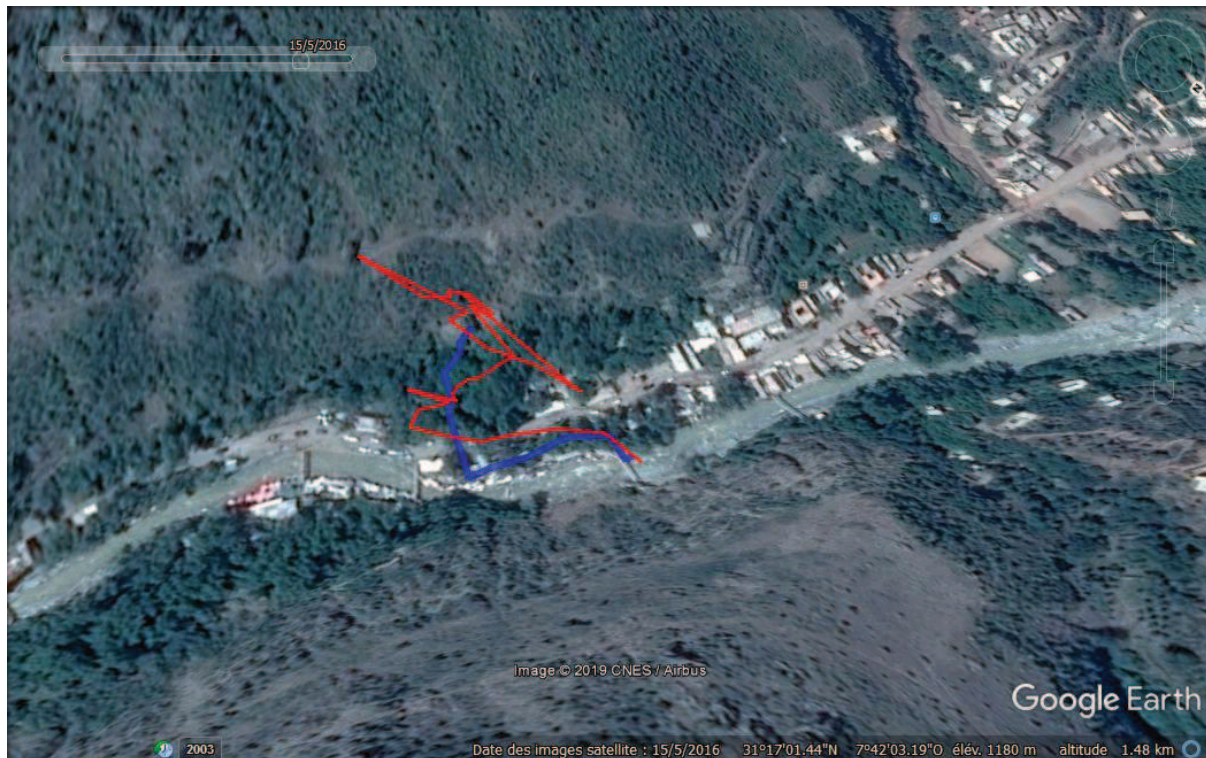
L'évacuation au niveau du deuxième site (Fig. 88) s'est déroulée dans de bonnes conditions. Les deux groupes situés sur les deux rives du cours d'eau, ont pu se mettre en sécurité facilement, mais avec une différence de temps considérable. Le groupe ayant suivi le plan d'évacuation s'est bien sûr retrouvé à l'abri plus rapidement.



**Figure 88: Validation du plan d'évacuation dans la région d'Oulmes.**

Concernant le 3ème site (Fig. 89), le groupe dépourvu de plan d'évacuation a aussi eu du mal à se mettre en zone sûr dans les délais optimaux. La vallée trop étroite à ce niveau ainsi que la présence de grandes montagnes rendent l'accessibilité aux zones sécurisées délicate.

Le groupe ayant suivi les parcours proposés ont pu atteindre les zones de refuge dans des délais convenables. Il est à noter toutefois que cet exercice a été mené par des étudiants, donc d'âge plutôt jeune par rapport à la population fréquentant la vallée. Ainsi, les difficultés rencontrées pourraient être majorées pour des personnes à mobilité réduite ou d'un âge plus avancé.



**Figure 89: Validation du plan d'évacuation dans la région de Setti Fadma.**

Après évaluation des résultats de la validation des plans d'évacuation, il s'est avéré qu'afin de garantir la sécurité des gens connaissant ou ignorant la vallée, il est impératif de mettre à disposition les plans d'évacuations proposées, qui permettent un repérage facile et une accessibilité rapide aux zones de refuges. Ceci réduirait les pertes humaines en cas de forte crue.

### **III. Conclusion sur l'approche hydro-géomorphologique et le diagnostic territorial:**

Basée sur une méthodologie peu onéreuse, cette spatialisation des risques d'inondation dans la vallée de l'Ourika offre un cadre pertinent pour la réduction des risques de catastrophe dans cette vallée touristique. Les indices de risque ont montré que le site de Setti Fadma est le plus vulnérable (Bennani *et al.*, 2019b). En raison de l'étroitesse des rives du fleuve, ses bâtiments et ses infrastructures sont trop exposés, notamment ceux récemment construits et destinés au tourisme local et international. Dans la région d'Aghbalou, le lit de l'oued est plus large ce qui abaisse les hauteurs d'eau et diminue donc le risque global. Certains restaurateurs ont pourtant choisi de s'installer trop près de l'oued, s'exposant encore plus. À Oulmes, le degré de risque varie en fonction du bord de la route sur lequel on se place. Sur la rive droite, direction Marrakech, tous les bâtiments ont un indice de risque élevé et la route elle-même est menacée. Dans toute la vallée, les abris ne sont pas suffisants, de mauvaise qualité et difficiles d'accès.

Beaucoup de ponts sont faits à la main avec les matériaux disponibles et ne résistent pas à des débits importants. Pour la mise en œuvre d'un plan d'évacuation, il faut supposer la destruction totale de ces ponts par les flux et l'impossibilité de traverser le fleuve. Pour cela, certains lieux sûrs peuvent servir d'abris en cas de grande inondation, comme un bâtiment académique à Aghbalou et une grande mosquée à Setti Fadma. Nous avons également proposé des itinéraires d'évacuation potentiels sur des terrasses surélevées qui pourraient être préparés et rendus accessibles. En effet, la situation actuelle est que la population ne pourra généralement pas se mettre rapidement en sécurité en cas d'alerte. Les pentes des rives sont souvent trop raides et une bonne capacité physique est nécessaire pour rester en sécurité. La création de nouveaux sites de refuge, l'ajout d'autres routes d'évacuation et la construction de ponts solides sont donc une nécessité absolue ainsi qu'une communication efficace sur les risques d'inondation.

# Conclusion générale :

Les bassins versants de l'Ourika et de la Rheraya, présentent un environnement favorable au déclenchement de crues violentes et soudaines. Ces bassins sont en effet caractérisés par des substratums peu perméables, un faible couvert végétal, des réseaux hydrographiques assez denses, des pentes fortes, une exposition aux flux perturbés et des précipitations intenses, grâce notamment à des altitudes importantes. Ces conditions font de ces bassins versants des terrains propices aux écoulements torrentiels à fort débits et à grande vitesse par rapport à la normale. Des événements de crues sont de plus en plus dangereux et leurs impacts sont considérables, que ça soit sur les voies de communication, les terrains agricoles ou sur les bâtiments. C'est ce constat alarmant qui nous a motivés pour traiter ce sujet, dans lequel nous avons préalablement effectué une étude bibliographique sur les bassins versants de l'Ourika et de la Rheraya, ainsi qu'une étude des caractéristiques des crues de ces bassins. L'analyse fréquentielle de ces crues nous a permis d'estimer les débits de pointe potentiels selon différentes périodes de retour. Nous avons également effectué une modélisation hydraulique afin d'estimer les hauteurs d'eau lors des crues et spatialiser leurs étendues. Ceci à l'aide de différentes résolutions de Modèles numériques de Terrain. Cet exercice a abouti à une cartographie des zones sujettes aux inondations dans lesquelles des mesures d'atténuation et de protection doivent être appliquées. Les résultats de cette modélisation témoignent de la valeur ajoutée du MNT Pléiades à haute résolution qui s'adapte bien à ce genre d'étude par rapport au MNT Aster (30 m) qui est certes facilement obtenu, mais qui n'est pas adapté à des types de bassins versants accidentés. Il a sous-estimé en effet le risque d'inondation. Adopter le MNT Pléiades (4 m) pour ce genre d'étude permettra aux décideurs d'avoir des données de meilleure précision, optimisant ainsi les interventions qui seraient mieux ciblées. En outre de nouveaux produits de télédétection satellitaires sont désormais disponibles et permettent d'améliorer grandement les possibilités par rapport aux études précédemment réalisées.

En deuxième lieu, l'application de l'approche géo-morpho-climatique à la cartographie du risque d'inondation dans le bassin versant de la Rheraya, a permis de mettre en évidence les zones à haut risque. Cette approche qui repose sur l'analyse de sept paramètres dont la l'accumulation de débit, l'intensité des précipitations, la géologie, l'utilisation des sols, les pentes, les altitudes et la distance du réseau de drainage, est appliquée pour la première fois sur un bassin versant au Maroc. Les résultats obtenus ont validé ceux de la modélisation

hydraulique, confirmant ainsi que les hauteurs d'eau estimées sont redoutables et constituent un danger réel.

Par ailleurs, pour le diagnostic territorial, bien que l'approche adoptée pour l'identification des zones vulnérables et des enjeux exposés de la vallée de l'Ourika, ne nécessite pas d'importantes données de base, elle a nécessité, outre l'expertise requise, un travail d'investigation sur le terrain et des enquêtes auprès des riverains et des témoins des inondations historiques. C'est, par ailleurs, une approche qui peut être envisageable dans d'autres bassins versants. La spatialisation des risques d'inondations dans cette vallée de l'Ourika a permis la localisation des zones à haut risque d'inondation en cas de crue, l'identification des zones potentielles de refuges et la proposition des plans d'évacuation. Ceci au niveau de trois sites de la vallée : Aghbalou, Oulmes et Setti Fadma. Un exercice de validation de ces plans d'évacuation a été effectué afin de confirmer leur fiabilité.

Toutes les approches adoptées peuvent être étendues à d'autres bassins versants ou à des zones de plus grande envergure, à condition de disposer de l'expertise nécessaire. Cela peut conduire à des applications très concrètes et opérationnelles, telles que des plans d'évacuation. De plus, l'indice de vulnérabilité multicritères développé pourrait être utilisé ailleurs. Pour la pratique, l'évaluation de la vulnérabilité aux inondations serait une condition préalable à une meilleure anticipation et à une meilleure planification de la gestion des risques. À cette fin, les politiques nationales marocaines en matière de gestion des risques d'inondation sont organisées à différentes échelles: une échelle nationale, représentée par un comité national de surveillance et de coordination; une échelle locale représentée par des comités de surveillance locaux; et des postes de commandement avancés. Au niveau national, le comité de coordination assure le suivi des bulletins météorologiques et l'identification des zones à risque. Il propose des mesures préventives et assure la coordination de l'action des différents départements ministériels et responsables territoriaux. Enfin, le poste de commandement avancé assure l'identification des dommages, la supervision des populations touchées, la mobilisation de moyens matériels et logistiques ainsi que le maintien d'un haut niveau de vigilance. Le Comité national de surveillance et de coordination indique, certes, que la vallée de l'Ourika est l'une des zones les plus vulnérables, mais la vulnérabilité des bâtiments et des activités à proximité du cours d'eau n'est pas prise en compte. Cette étude comble cette lacune non seulement par le diagnostic et les enquêtes sur la fréquentation et l'utilisation du terrain, mais également par la quantification de la vulnérabilité des bâtiments. Par ailleurs, la vallée de l'Ourika disposant déjà d'un système d'alerte, qui consiste à émettre des sirènes en cas



d'inondation imminente, cette étude le renforce par le diagnostic et la proposition d'un plan d'évacuation.

Finalement, nous considérons que les résultats obtenus ouvrent plusieurs perspectives de recherche notamment :

- Appliquer une modélisation hydraulique détaillée sur la totalité des bassins versants en amont de Marrakech, ainsi qu'aux différents bassins versant du Maroc, en utilisant des Modèles Numérique de Terrains (MNT) à très haute résolution. Ceci afin d'avoir plus de précision sur les hauteurs d'eau des fortes crues.
- Développer et élargir l'approche Géo-morpho-climatique qui est une approche « à faible cout », et aux spécificités locales, et l'appliquer sur d'autres bassins versants afin de mieux juger la vulnérabilité des sites à forte fréquentation humaine et mieux localiser les zones à risque.
- Adopter l'approche du diagnostic territorial et la vulnérabilité spatiale dans d'autres bassins versants, compte tenu de la facilité de sa mise en œuvre et le fait qu'elle repose plus sur l'analyse du milieu physique et l'occupation du sol. Cela peut conduire à des applications concrètes et opérationnelles. De plus, l'indice de vulnérabilité multicritères développé pourrait être utilisé dans d'autres bassins quel que soit l'environnement climatique.
- Renforcer la veille hydro-météorologique par des modèles de prévision et approfondir l'analyse des phénomènes orageux et leurs réponses hydrologiques sur la montagne marocaine ; surtout que différents rapports sur les changements climatiques y prévoient une augmentation des évènements extrêmes. Les crues torrentielles de l'été 2019 sur le Haut et l'Anti Atlas en seraient une manifestation.

## Références bibliographiques :

- Ahattab J, Serhir N, Lakhel EK (2015) Vers l'élaboration d'un système d'aide à la décision pour le choix des méthodes d'estimation des débits max des crues: réadaptation aux données hydrologiques récentes. *La Houille Blanche* pp. 63-70.
- Aït Hssaine A., (2014), Eléments sur l'hydrologie de la partie atlasique de l'oued Guir (Maroc sud-oriental) et sur l'inondation catastrophique du 10 octobre 2008. *Géographie Physique et Environnement*, Vol. 8.
- Akaike H (1974) A new look at the statistical model identification. *IEEE Trans. on Automatic Control* 19: 716–723.
- Ambroise B., (1998). Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré: processus et facteurs. *Rev. Sci. Eau*, 11(4): 471-496.
- Apel H., Thielen A., Merz B., Bloschl G. (2006) A probabilistic modelling system for assessing flood risks. *Natural Hazards* 38: 79-100.
- Argence, S., Lambert, D., Richard, E., Chaboureau, J. P., and Söhne, N.: Impact of initial conditions uncertainties on the predictability of heavy rainfall in the Mediterranean: A case study, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 134, 1775–1788, 2008.
- Arduino G, Reggiani P, Todini E (2005) Recent advances in flood forecasting and flood risk assessment. *Hydrology and Earth System Sciences* 9 (4): 280-284.
- Arnoldus H.M.J. (1977). Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. *FAO Soils Bulletin*. 34: 39-51.
- Bagnardi M., Gonzalez P.J., Hooper A. (2016). High-resolution digital elevation model from tri-stereo Pléiades-1 satellite imagery for lava flow volume estimates at Fogo Volcano. *Geophysical Research Letters* 43 (12): 6267-6275.
- Ballais J.L., Chave S., Dupont N., Masson E., et Penven M.J. (2011). La méthode hydrogéomorphologique de détermination des zones inondables. *Géographie Physique et Environnement*.
- Becerra, S. (2012). Vulnérabilité, risques et environnement : l'itinéraire chaotique d'un paradigme sociologique contemporain. *Vertigo* - la revue électronique en sciences de l'environnement, disponible à l'adresse : <http://vertigo.revues.org/11988>.
- Benito G. & Machado M. J. (2012). Floods in the Iberian Peninsula. Chapter In book: *Changes of Flood Risk in Europe*; Edition: IAHS Special Publication 10 ; Chapter: 21 ; Publisher: IAHS Press and CRC Press/Balkema,; Editors: Kundzewicz Z.W.; 12 p.
- Bennani, O., Ait Brahim, Y., Saidi, M.E., Fnguire, F. (2016). Variability of surface water resources and extreme flows under climate change conditions in arid and Mediterranean area: case of Tensift watershed, Morocco. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 9 (4): 165-174.
- Bennani O., Trambly Y., Saidi M. E., Gascoin S., Leone F., (2019a). Flood hazard mapping using two digital elevation models: Application in a semi-arid environment of Morocco. *European Scientific Journal*, vol.15, No.33, 338-359. Doi:10.19044/esj.2019.v15n33p338

- Bennani O., Druon E., Leone F., Trambly Y., Saidi M. E., (2019b) "A spatial and integrated flood risk diagnosis: Relevance for disaster prevention at Ourika valley (High Atlas-Morocco)", *Disaster Prevention and Management*; Vol. 28 No. 5, pp. 548-564. <https://doi.org/10.1108/DPM-12-2018-0379>
- Bevacqua, E., Maraun, D., Hobæk Haff, I., Widmann, M., and Vrac, M. (2017) Multivariate statistical modelling of compound events via pair-copula constructions: analysis of floods in Ravenna (Italy), *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 2701–2723, <https://doi.org/10.5194/hess-21-2701-2017>.
- Black, Andrew R., Burns, J. C.(2002). Re-assessing the flood risk in Scotland. *Sci. Total Environ.* 294 (1): 169–184.
- Bobée B. Et Ashkar F., (1991). The gamma family and derived distributions applied in Hydrology. Water Resources Publications, Littleton, Colo., Yevjevitch (Ed.): 217 p.
- Bonacci, O., Ljubenkovic, I., Roje-Bonacci, T. (2006). Karst flash floods: an example from the Dinaric karst (Croatia). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 6 (2): 195–203. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-6-195-2006> (ISSN 1684–9981).
- Boumenni, H., Bachnou, A., Alaa, N.E. (2017). The rainfall-runoff model GR4J optimization of parameter by genetic algorithms and gauss-newton method: application for the watershed Ourika (High Atlas, Morocco). *Arabian Journal of GeoSciences* 10:343. DOI : 10.1007/s12517-017-3086-x.
- Brunner G.W. (2016). HEC-RES River Analysis System - User's Manual Version 5.0. US Army Corps of Engineers. Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (HEC) pp. 962.
- Chaponnière A., (2005). Fonctionnement hydrologique d'un bassin versant montagneux semi-aride : cas du bassin versant du Rehraya (Haut Atlas marocain). Paris (FRA) ; Toulouse : INA-PG ; CESBIO, 268 p. multigr. Th. : Hydrol. et Télédétection, INA-PG : Paris.
- Cheggour A., (2008). Mesures de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales dans un bassin versant montagneux semi-aride et spatialisé par des SIG: application au bassin versant de la Rhéraya, Haut Atlas Maroc.
- Chung, H.C.P., Adeyeye, K. (2018). Structural flood damage and the efficacy of property-level flood protection. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 36(5): 471-499. DOI: 10.1108/IJBPA-09-2017-0040.
- Correia F.N., Da Graça Saraiva M., Da Silva, F.N., Ramos I. (1999). Floodplain management in urban developing areas. Part I. Urban Growth Scenarios and land-use controls. *Water Resources Management* 13(1): 1–21.
- Dawod G., Al-Ghamdi K.A. (2017). Reliability of Recent Global Digital Elevation Models for Geomatics Applications in Egypt and Saudi Arabia. *Journal of Geographic Information System* 9 (6): 685-698. DOI: 10.4236/jgis.2017.96043.
- Defossez, S., Vinet, F., Leone, F. (2017). Assessing Vulnerability to Flooding: Progress and Limitations. In Freddy Vinet Editor: *Floods*, vol. 1: Risk Knowledge, ISTE Press & Elsevier, pp. 241-257, <https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-268-7.50014-6>.
- Demek, Jaromr, (1972). Manual of detailed geomorphological mapping. Academia.

- De Micheaux P.L., Drouilhet R., Liquet B. (2011) Présentation du logiciel R. In: Le logiciel R. Statistique et probabilités appliquées. Springer, Paris.
- Dewan, Ashraf M., Monirul Islam M., Kumamoto T., Nishigaki M.(2007). Evaluating flood hazard for land-use planning in greater Dhaka of Bangladesh using remote sensing and GIS techniques. *Water Resour. Manag.* 21 (9): 1601–1612. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-006-9116-1> (ISSN 09204741).
- Di Baldassarre G., Montanari A., Lins H., Koutsoyiannis D., Brandimarte L., Blöschl G. (2010a). Flood fatalities in Africa: From diagnosis to mitigation. *Geophysical Research Letters* 37 (22): 2-6.
- Di Baldassarre G., Schumann G., Bates P.D., Freer J.E., Beven K.J. (2010b). Flood-plain mapping: a critical discussion of deterministic and probabilistic approaches. *Hydrological Sciences Journal* 55 (3): 364-376.
- Direction Provinciale de l’Agriculture de Marrakech (1999). Rapport interne sur les dégâts des crues dans la province du Haouz: Constats et interventions. Journées d’étude sur les réformes des infrastructures hydro-agricoles suite aux crues de la province du Haouz de Marrakech. 26 p.
- Domakinis C., Oikonomidis D., Voudouris K., Astaras T. (2014). Using geographic information systems (GIS) and remote sensing to map flood extent and to assess flood hazard in Erythrotamos river basin (Evros, Greece). *Proc. of 10th International Congress of the Hellenic Geographical Society, Thessaloniki*, 689-709.
- Douglas I., Kurshid A., Maghenda M., McDonnell Y., McLean L., Campbell J. (2008). Unjust waters: climate change, flooding and the urban poor in Africa, *Environ. Urban.* 20: 187–205.
- Dresch J. (1941). Jeunes et montagnes, *Revue géograph. Maroc*,1-2: 53-55.
- Ducrocq V. (2006). Crues rapides dans le midi de la France, *Dossier Pour la Science*, 51: 82-85.
- Dutta D., Herath S., Musiaka K. (2006). An application of a flood risk analysis system for impact analysis of a flood control plan in a river basin. *Hydrological Processes*, 20 (6): 1365-1384.
- El Adlouni S., Bobée B., Ouarda T.B.M.J. (2008). On the tails of extreme event distributions in hydrology. *Journal of Hydrology*, 355: 16-33.
- El Alaoui El Fels A., Saidi M.E.M. (2014). Simulation et spatialisation du risque d’inondation dans une vallée anthropisée. Le cas de la vallée de l’Ourika (Haut Atlas, Maroc). *European Scientific Journal*, 10 (17): 210-223.
- El Alaoui EL Fels, A., Alaa, N., Bachnou, A., Rachidi, S. (2018). Flood frequency analysis and generation of flood hazard indicator maps in a semi-arid environment, case of Ourika watershed (western High Atlas, Morocco) . *Journal of African Earth Sciences*, 141: 94-106. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2018.02.004
- El Khalki Y., Benyoucef A.(2005). Crues et inondations de l'oued el Handak : genèse, impact et propositions d'aménagement (Atlas de Beni Mellal). *Études de Géographie Physique*, XXXII: 47-61.

- El Khalki E., Trambly Y., Saidi M. E.M., Bouvier C., Hanich L., Benrhanem M., Alaouri M. (2018). Comparison of modeling approaches for flood forecasting in the High Atlas Mountains of Morocco. *Arabian Journal of Geosciences*, 11, pp. 410. doi: 10.1007/s12517-018-3752-7
- Farquharson F.A.K., Meigh J.R., Sutcliffe J.V. (1992) Regional flood frequency analysis in arid and semi-arid areas. *J Hydrol* 138:487–501.
- Fekete A. (2009). Validation of a social vulnerability index in context to river-floods in Germany. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9: 393-403, DOI: 10.5194/nhess-9-393-2009.
- Fernández D.S., Lutz M.A., (2010). Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Eng. Geol.* 111: 90–98. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.12.006> (ISSN 00137952)
- Forquor G., Maathuis B. (2012). Comparison of SRTM and ASTER derived digital elevation models over two regions in Ghana – Implications for Hydrological and Environmental modeling. *Studies on Environmental and Applied Geomorphology* 9: 219-240.
- Forte F., Pennetta L., Strobl R.O.(2005). Historic records and GIS applications for flood risk analysis in the Salento peninsula (southern Italy). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 5 (6): 833–844. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-5-833-2005> (ISSN 1561–8633, 1561–8633)
- Fujisada H., Bailey G.B., Kelly G.G., Hara S., Abrams M.J. (2005). ASTER DEM Performance. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing* 43: 2707-2714.
- Gaume E., Livet M., Desbordes M., Villeneuve J.P. (2004). Hydrological analysis of the river Aude, France, flash flood on 12 and 13 November 1999. *Journal of Hydrology*, 286: 135-154.
- Gaume E., Bain V., Bernardara P., Newinger O., Barbuc M., Bateman A., Blaskovicov L., Blöschl G., Borga M., Dumitrescu A., Daliakopoulos I., Garcia J., Irimescu A., Kohnova S., Koutroulis A., Marchi L., Matreata S., Medina V., Preciso E., Sempere Torres D., Stancalie G., Szolgay J., Tsanis I., Velasco D., Viglione A. (2009). A collation of data on European flash floods. *Journal of Hydrology* 367: 70–78.
- Gleyzes M.A., Perret L., Kubik P. (2012). PLEIADES system architecture and main performances. *International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences* pp. 537-542.
- Haan, Charles T., Barfield, Billy J., Hayes, Candler J.(1994). *Design hydrology and sedimentology for small catchments*. Elsevier.
- Hirabayashi Y., Mahendran R., Koirala S., Konoshima L., Yamazaki D., Watanabe S., Kim H., Kanae S. (2013). Global flood risk under climate change. *Nature Climate Change*. 3: 816-821.
- Hooijer A., Klijn F., Pedroli G.B.M., Van Os A.G. (2004). Towards sustainable flood risk management in the Rhine and Meuse river basins: Synopsis of the findings of IRMA-SPONGE. *River Research and Applications*, 20: 343–357.
- Horritt M.S., Bates P.D. (2002). Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. *Journal of Hydrology* 268: 87–99.

- Huan, Huan, Wang, Jinsheng, Teng, Yanguo, (2012). Assessment and validation of groundwater vulnerability to nitrate based on a modified drastic model: a case study in Jilin city of northeast China. *Sci. Total Environ.* 440, 14–23
- Jonkman, S.N. (2005). Global perspectives on loss of human life caused by floods. *Natural Hazards*, 34: 151-175.
- Jung H.C., Jasinski M.F. (2015). Sensitivity of a floodplain hydrodynamic model to satellite-based DEM scale and accuracy: case study – The Atchafalaya Basin. *Remote sensing* 7: 7938-7958.
- Kääb A. (2002). Monitoring high-mountain terrain deformation from repeated air – and spaceborne optical data: Examples using digital aerial imagery and Aster data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57: 39-52.
- Karrouchi M., Touhami M.O., Oujidi M., Chourak M. (2016). Cartographie des zones à risque d'inondation dans la région Tanger-Tétouan : Cas du bassin versant de Martil (Nord du Maroc). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 14 (4): 1019-1035.
- Karmaoui A., Balica S.F., Messouli M. (2016). Analysis of applicability of flood vulnerability index in PreSaharan region, a pilot study to assess flood in Southern Morocco. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.*, DOI: 10.5194/nhess-2016-96.
- Katz M., Sarvary I., Frejd T., Hahn-Hägerdal B., Gorwa-Grauslund M.F. (2002). An improved stereoselective reduction of a bicyclic diketone by *Saccharomyces cerevisiae* combining process optimization and strain engineering. *Appl Microbiol Biotechnol* 59(6):641-8
- Kazakis N., Kougiaris I., Patsialis T. (2015). Assessment of flood hazard areas at a regional scale using an index-based approach and Analytical Hierarchy Process: Application in Rhodope-Evros region, Greece. *Science of the Total Environment* 538: 555-563.
- Knebl M.R., Yang Z.L., Hutchison K., Maidment D.R. (2005). Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/ RAS: A case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. *Journal of Environmental Management* 75 (4): 325-336.
- Kosiorowski, D., Rydlewski, J.P. & Snarska, M. (2019) Detecting a structural change in functional time series using local Wilcoxon statistic. *Statistical Papers*, Volume 60, Issue 5, pp 1677–1698. <https://doi.org/10.1007/s00362-017-0891-y>.
- Kourgialas, Nektarios N., Karatzas, George P.(2011). Flood management and a GIS modelling method to assess flood-hazard areas: a case study. *Hydrol. Sci. J.* 56 (2), 212–225. <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2011.555836> (ISSN 0262-6667)
- Kowalzig J. (2008). Climate, poverty, and justice: What the Poznań UN climate conference needs to deliver for a fair and effective global deal. *Oxfam Policy and Practice. Climate Change and Resilience*, 4(3): 117-148.
- Kreibich H., Thielen A.H., Petrow T.H., Müller M., Merz, B. (2005). Flood loss reduction of private households due to building precautionary measures – lessons learned from the Elbe flood in August 2002. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5: 117-126.

- Lacroix P., Berthier E., Maquerhua E.T. (2015). Earthquake-driven acceleration of slow-moving landslides in the Colca valley, Peru, detected from Pléiades images. *Remote Sensing of Environment* 165: 148-158.
- Lasri M., Obda K., Taous A., Amyay M., Reynard E.(2011). L'agglomération de Fès et sa périphérie face au risque d'inondation. Résultats préliminaires. In: Actes du colloque "Aménagement périurbain: processus, enjeux, risques et perspectives", 17-18 février 2010, 189-206.
- Leone F., Asté J.P., Leroi E. (1996). Vulnerability assessment of elements exposed to mass-movement : Working toward a better risk perception. Senneset K. (ed.): *Landslides*, Ed. Balkema, Rotterdam, pp. 263-269.
- Liu Y.B., Gebremeskel S., De Smedt F., Hoffmann L., Pfister L.(2003). A diffusive transport approach for flow routing in GIS-based flood modeling. *J. Hydrol.* 283 (1–4): 91–106. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00242-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00242-7) (ISSN 00221694).
- Llasat M.C., Llasat-Botija M., Petrucci O., Pasqua A. A., Rosselló J., Vinet F., Boissier L. (2013). Towards a database on societal impact of Mediterranean floods within the framework of the HYMEX project. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13: 1337-1350, DOI: 10.5194/nhess-13-1337-2013.
- Marti R., Gascoin S., Berthier E., De Pinel M., Houet T., Laffly D. (2016). Mapping snow depth in open alpine terrain from stereo satellite imagery. *Cryosphere* 10 (4): 1361-1380.
- Mavhura E., Collins A., Paradzayi Bongo P. (2017). Flood vulnerability and relocation readiness in Zimbabwe. *Disaster Prevention and Management.* 26(1): 41-54, DOI: 10.1108/DPM-05-2016-0101.
- Mccright A.M., Dunlap R.E. (2003). Defeating Kyoto: the conservative movement's impact on U.S. climate change policy. *Social Problems.* 50(3): 348-373.
- Mckenzie N.J., Ryan P.J. (1999). Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma*, 89(1-2): 67-94.
- Meja-Navarro, Mario, Wohl, Ellen E., Oaks, Sherry D.(1994). Geological hazards, vulnerability, and risk assessment using GIS: model for Glenwood Springs, Colorado. *Geomorphology* 10 (1–4): 331–354. [http://dx.doi.org/10.1016/0169-555X\(94\)90024-8](http://dx.doi.org/10.1016/0169-555X(94)90024-8) (ISSN 0169555X)
- Merheb M., Roger M., Chadi A., Colin F., Perrin C., Baghdadi N. (2016). Hydrological response characteristics of Mediterranean catchments at different time scales: a meta-analysis. *Hydrological Sciences Journal*, 61(14): 2520-2539, DOI: 10.1080/02626667.2016.1140174.
- Merz B., Kreibich H., Schwarze R., Thielen A. (2010). Review article Assessment of economic flood damage. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10 (8): 1697-1724.
- Middleton N.J., Sternberg T. (2013). Climate hazards in drylands: Reviews. 126: 48-57.
- Milly P.C.D., Wetherald R.T., Dunne K.A., Delworth T.L. (2002). Increasing risk of great floods in a changing climate. *Nature.* 415: 514-517.

- Musa Z.N., Popescu I., Mynett A. (2015). A review of applications of satellite SAR, optical, altimetry and DEM data for surface water modelling, mapping and parameter estimation. *Hydrology and Earth System Sciences* 19: 3755-3769.
- Nardi F., Vivoni E.R., Grimaldi S. (2006). Investigating a floodplain scaling relation using a hydrogeomorphic delineation method. *Water Resources Research*, 42(9). <http://dx.doi.org/10.1029/2005WR004155>.
- Nasiri H., Yusof M.J.M., Ali T.A.M. (2016). An overview to flood vulnerability assessment methods. *Sustainable Water Resources Management* 2: 331-336.
- Noman N.S., Nelson E.J., Zundel A.K. (2001). Review of automated floodplain delineation from digital terrain models. *Journal of Water Resources Planning and Management* 127 (6): 394–402.
- Oikonomidis D., Dimogianni S., Kazakis N., Voudouris K..(2015). A GIS/remote sensing based methodology for groundwater potentiality assessment in Tirnavos area, Greece. *J. Hydrol.* 525: 197–208
- Ouma, Yashon, Tateishi, Ryutaro, (2014). Urban flood vulnerability and risk mapping using integrated multi-parametric AHP and GIS: methodological overview and case study assessment. *Water* 6 (6): 1515–1545. <http://dx.doi.org/10.3390/w6061515> (ISSN 2073-4441)
- Papaoiannou G., Loukas A., Vasiliades L., Aronica G.T. (2016). Flood inundation mapping sensitivity to riverine spatial resolution and modeling approach. *Natural Hazards* 83: 117-132.
- Patel D.P., Ramirez J.A., Srivastava P.K., Bray M., Han D. (2017). Assessment of flood inundation mapping of Surat city by coupled 1D/2D hydrodynamic modeling: a case application of the new HEC-RAS 5. *Natural Hazards* 89: 93-130.
- Patro S., Chatterjee C., Mohanty S., Snigh R. Et Raghuwanshi N.S. (2009). Flood inundation modeling using MIKE FLOOD and remote sensing data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 37 (1): 107-118.
- Pereira-Cardenal S.J., Riegels N.D., Berry P.A.M., Smith R.G., Yakovlev A., Siegfried T.U., Bauer-Gottwein P. (2011). Real-time remote sensing driven river basin modeling using radar altimetry. *Hydrology and Earth System Sciences* 15: 241–254.
- Pérez-Morales A., Gil-Guirado S., Olcina-Cantos J. (2015). Housing bubbles and the increase of flood exposure. Failures in flood risk management on the Spanish south-eastern coast (1975–2013). *Journal of Flood Risk Management*; Volume 11, Issue S1, S302-S313. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12207>.
- Pistocchi A., Mazzoli P. (2002). Use of HEC-RAS and HEC-HMS models with ArcView for hydrologic risk management. *Proceedings IEMSS* pp. 305-310.
- Provitolo. D. (2007). Vulnérabilité aux inondations méditerranéennes en milieu urbain : une nouvelle démarche géographique . *Annales de géographie* 1(653): 23-40. DOI 10.3917/ag.653.0023



- Quiroga A., Marzocchi V., Rintoul I. (2016). Influence of wood treatments on mechanical properties of wood-cement composites and of populus euroamericana wood fibers. *Composites part B Engineering*. 84: 25-32.
- Rao A.R., Hamed K.H. (2001). *Flood frequency analysis*. CRC Press, New York.
- Rifai N., Khattabi A., Rhazi L. (2014). Modélisation des crues des rivières pour la gestion intégrée du risque d'inondation : cas du bassin versant de Tahaddart (nord-ouest du Maroc). *Revue des sciences de l'eau*, 27(1): 57–69. DOI: 10.7202/1021982ar, doi: 10.1029/2018WR022577.
- Roy E., Rousselle J., Lacroix J. (2003). Flood Damage Reduction Program (FDRP) in Quebec: Case Study of the Chaudière River. *Natural Hazards*, 28: 387–405.
- Rufat S., Tate E., Burton C.G., Maroof A.S. (2015). Social vulnerability to floods: Review of case studies and implications for measurement. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 14(4): 470-486. DOI: 10.1016/j.ijdr.2015.09.013
- Ruin I., Creutin J.D., Anquetin S., Lutoff C. (2008). Human exposure to flash floods – Relation between flood parameters and human vulnerability during a storm of September 2002 in Southern France. *Journal of Hydrology*, 361(1–2): 199-213. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2008.07.044
- Saidi M.E.M., Daoudi L., Aresmouk M., Blali A. (2003). Rôle du milieu physique dans l'amplification des crues en milieu montagnard: exemple de la crue du 17 août 1995 dans la vallée de l'Ourika (Haut-Atlas, Maroc). *Sécheresse* 14 (2): 1–8.
- Saidi M. E.M., Agoussine M., Daoudi L.(2006). Effet de la morphologie et de l'exposition sur les ressources en eau superficielle de part et d'autre du Haut Atlas (Maroc) ; exemple des bassins versants de l'Ourika et du Marghène. *Bulletin de l'Institut Scientifique, section Sciences de la Terre n°28*, Rabat p. 41 -49.
- Saidi M.E.M., Daoudi L., Aresmouk M.E., Fniguire F., Boukrin S. (2010). The Ourika floods (High Atlas, Morocco), extreme events in semi-arid mountain context. *Comunicações Geológicas* 97: 113-128.
- Saidi M.E.M., Boukrin S., Fniguire F., Ramromi A. (2012). Les écoulements superficiels sur le Haut Atlas de Marrakech, cas des débits extrêmes. *Larhyss Journal*, 10: 75-90.
- Sarhadi A., Soltani S., Modarres R. (2012). Probabilistic flood inundation mapping of ungauged rivers: Linking GIS techniques and frequency analysis. *Journal of Hydrology* 458: 68-86.
- Saaty, Thomas L.(1990). *How to make a decision: the analytic hierarchy process* (ISSN 03772217).
- Schumann A.H., Funke R., Schultz G.A.(2000). Application of a geographic information system for conceptual rainfall–runoff modeling. *J. Hydrol.* 240 (1–2): 45–61. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00312-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00312-7) (ISSN 00221694).
- Schumann U., Huntrieser H. (2007). The global lightning-induced nitrogen oxides source, *Atmos. Chem. Phys.*, 7: 3823-3907, <https://doi.org/10.5194/acp-7-3823-2007>.

- Schwartz G. (1978). Estimating the dimension of a model. *The Annals of Statistics* 6: 461–464.
- Scorpio V., Crema S., Marra F., Righini M., Ciccacese G., Borga M., Cavalli M., Corsini A., Marchi L., Surian N., Comiti F., (2018). Basin-scale analysis of the geomorphic effectiveness of flash floods: A study in the northern Apennines (Italy). *Science of The Total Environment*, Volumes 640–641, pages 337-351, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.252>.
- Shean D.E., Alexandrov O., Moratto Z.M., Smith B.E., Joughin I.R., Porter C., Morin P. (2016). An automated, open-source pipeline for mass production of digital elevation models (DEMs) from very-high-resolution commercial stereo satellite imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 161: 101-117.
- Simona N., Cedric L. (2007). Gestion durable des zones inondables dans le Delta du Danube (Roumanie). Dans : Ires Journées Scientifiques Inter-Réseaux de l'AUF, Gestion Intégrée des Eaux et des Sols. Ressources, Aménagements et Risques en Milieux Ruraux et Urbains, 6- 9 novembre 2007, Hanoi, Vietnam, 10 p.
- Stedinger J.R., Vogel R.M., Foufoula-Georgiou E. (1993). Frequency Analysis of Extreme Events. *Handbook of Hydrology*.
- Tate E.C., Maidment D.R., Olivera F., Anderson D.J. (2002). Creating a Terrain Model for Floodplain Mapping. *Journal of Hydrologic Engineering* 7 (2): 100-108.
- Tehrany, Mahyat S., Pradhan, Biswajeet, Jebur, Neamah M.(2013). Spatial prediction of flood susceptible areas using rule based decision tree (DT) and a novel ensemble bivariate and multivariate statistical models in GIS. *J. Hydrol.* 504: 69–79. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.09.034> (ISSN 00221694).
- Teng J., Jakeman A.J., Vaze J., Croke B.F.W., Dutta D., Kim S. (2017). Flood inundation modeling: a review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental modeling & software* pp. 201-216.
- Theilen-Willige B., Charif A., El Ouahidi A., Chaibi M., Ayt Ougougdal M., AitMalek H. (2015). Flash Floods in the Guelmim Area/Southwest Morocco–Use of Remote Sensing and GIS-Tools for the Detection of Flooding-Prone Areas. *Geosciences*, 5(2): 203-221; doi:10.3390/geosciences5020203.
- Timbadiya P., Patel P., Porey P. (2014). A 1D–2D coupled hydrodynamic model for river flood prediction in a coastal Urban floodplain. *Journal of Hydrologic Engineering* 20.
- Tramblay Y., St-Hilaire A., Ouarda T. (2008). Frequency analysis of maximum annual suspended sediment concentrations in North America. *Hydrological Sciences Journal* 11: 236-252.
- Tramblay Y., Bouaicha R., Brocca L., Dorigo W., Bouvier C., Camici S., Servat E. (2012). Estimation of antecedent wetness conditions for flood modelling in Northern Morocco. *Hydrology and Earth System Sciences* 16: 4375-4386.
- Tramblay Y., Amoussou E., Dorigo W., Mahé G. (2014). Flood risk under future climate in data sparse regions: linking extreme value models and flood generating processes. *Journal of Hydrology*, 519: 549-558, <http://dx.doi.org/DOI:10.1016/j.jhydrol.2014.07.052>.

- Tramblay, Y., Mimeau, L., Neppel, L., Vinet, F., and Sauquet, E. (2019). Detection and attribution of flood trends in Mediterranean basins, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23, 4419–4431, <https://doi.org/10.5194/hess-23-4419-2019>.
- Tsitroulis I., Voudouris K., Vasileiou A., Mattas C., Sapountzis M., Maris F. (2016). Flood hazard assessment and delimitation of the likely flood hazard zones of the upper part in Gallikos river basin. *Bulletin of the geological society of greece*. 50(2).
- UNISDR(2015). International Strategy for Disaster Reduction (ISDR): Making Development Sustainable: The Future of Disaster Risk Management, Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction, Geneva, Switzerland, last access: 05 november 2019, available at: <https://www.unisdr.org/we/inform/publications/42809>.
- Vincendon B., Ducrocq V., Saulnier G.M., Bouilloud L., Chancibault K., Habets F., Noilhan J. (2010). Benefit of coupling the ISBA land surface model with a TOPMODEL hydrological model version dedicated to Mediterranean flash-floods. *Journal of Hydrology*, 394(1–2): 256-266. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.04.012.
- Vinet F., Lumbroso D., Defossez S., Boissier L. (2011). A comparative analysis of the loss of life during two recent floods in France: the sea surge caused by the storm Xynthia and the flash flood in Var. *Natural Hazards*, 61(3): 1179-1201.
- Vinet, F., Boissier, L. & Defossez, S. (2011). La mortalité comme expression de la vulnérabilité humaine face aux catastrophes naturelles : deux inondations récentes en France (Xynthia, var, 2010). [Vertigo] La revue électronique en sciences de l'environnement, 11 (2), 21 p., DOI : 10.4000/vertigo.11074.
- Vinet F., Saidi M.E.M., Douvinet J., Fehri N., Nasrallah, W., Menad W., Mellas S. (2016). Urbanization and land use as a driver of flood risk. The Mediterranean Region under Climate Change. A Scientific Update. IRD editions, Marseille pp. 563-575.
- Voudouris K. (2017). Engineering Hydrogeology. Tziolas Publ. (in Greek).
- Wang, Yamei, Li, Zhongwu, Tang, Zhenghong, Zeng, Guangming, (2011). A GIS-based spatial multi-criteria approach for flood risk assessment in the Dongting Lake Region, Hunan, Central China. *Water Resour. Manag.* 25 (13): 3465–3484. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-011-9866-2> (ISSN 09204741)
- Werren G., Reynard E., El Khalki Y.(2012). Cartographie des phénomènes en vue de la réalisation de la carte indicative des dangers hydrologiques dans la ville de Beni Mellal, Maroc. In: Actes du colloque “La montagne marocaine: géomorphologie, environnement et développement”, 5-6 mai 2010.
- Werren G., Reynard E., Lane S.N., Balin D. (2015). Flood hazard assessment and mapping in semi-arid piedmont areas: a case study in Beni Mellal, Morocco. *Natural Hazards* 81: 481-511.
- Yamaguchi Y., Kahle A., Tsu H., Kawakami T., Pniel M. (1998). Overview of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). *IEEE Geoscience and Remote Sensing* 36: 1062- 1071.
- Yésou H., Chastanet P., Maxant J., Huber C., Clandillon S., Battiston S., Proy C., De Fraipont P. (2015). Contribution de l'imagerie Pléiades a la cartographie rapide des dégâts suite à des catastrophes majeures: Retour d'expériences après deux ans d'actions de cartographie rapide

localisées en Asie, en Afrique, en Europe et aux caraïbes. *Revue Française de photogrammétrie et de Télédétection* 209: 81-88.

Zkhiri W., Trambly Y., Hanich L., Berjamy B. (2016). Regional flood frequency analysis in the High Atlas mountainous catchments of Morocco. *Natural Hazards* 83 (2): 953-967.

Zoglat A., El Adlouni S., Badaoui F., Amar A. (2014). Managing hydrological risks with extreme modeling: application of peaks over threshold model to the Loukkos watershed, Morocco. *Journal of Hydrologic Engineering* 19.

Zurich Insurance Company Ltd, Targa-AIDE (2015). Morocco floods of 2014: what we can learn from Guelmim and Sidi Ifni. Zurich.