

Higher National School of Hydraulic

The Library

Digital Repository of ENSH



المدرسة الوطنية العليا للري

المكتبة

المستودع الرقمي للمدرسة العليا للري



The title (العنوان):

Contribution à la modélisation pluie-débit dans les bassins versants de l'Est de l'Algérie..

The paper document Shelf mark (الشفرة) : 8-0005-22

APA Citation (APA توثيق):

Abdi, Ishak. (2022). Contribution à la modélisation pluie-débit dans les bassins versants de l'Est de l'Algérie. [Thèse de doctorat, ENSH].

The digital repository of the Higher National School for Hydraulics "Digital Repository of ENSH" is a platform for valuing the scientific production of the school's teachers and researchers.

Digital Repository of ENSH aims to limit scientific production, whether published or unpublished (theses, pedagogical publications, periodical articles, books...) and broadcasting it online.

Digital Repository of ENSH is built on the open DSpace software platform and is managed by the Library of the National Higher School for Hydraulics. <http://dspace.ensh.dz/jspui/>

المستودع الرقمي للمدرسة الوطنية العليا للري هو منصة خاصة بتقييم الإنتاج العلمي لأساتذة و باحثي المدرسة.

يهدف المستودع الرقمي للمدرسة إلى حصر الإنتاج العلمي سواء كان منشورا أو غير منشور (أطروحات، مطبوعات، مبداعات، مقالات البوريات، كتب....) و بثه على الخط.

المستودع الرقمي للمدرسة مبني على المنصة المفتوحة DSpace و يتم إدارته من طرف مديرية المكتبة للمدرسة العليا للري.

كل الحقوق محفوظة للمدرسة الوطنية العليا للري.



**THESE DE DOCTORAT ES-SCIENCES
DE L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE**

Présentée par

Monsieur **ABDI Ishak**

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE

En :

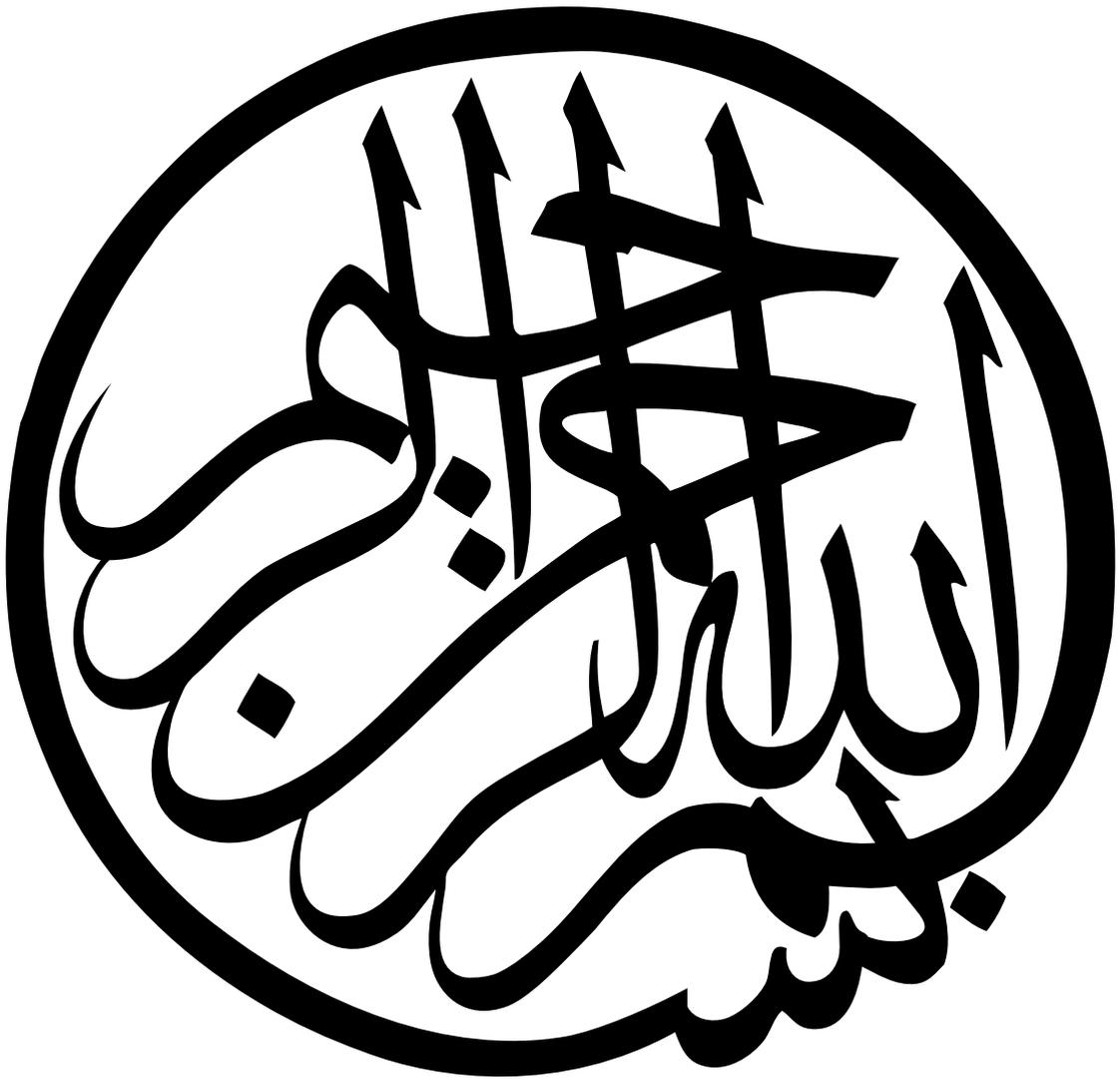
Hydraulique

Sujet de la thèse :

**Contribution à la modélisation pluie-débit dans les
bassins versants de l'Est de l'Algérie**

Devant le jury composé de :

M. RASSOUL Abdelazziz	Professeur, ENSH Blida	Président
M. MEDDI Mohamed	Professeur, ENSH Blida	Directeur de thèse
M ^{me} . SOUAG Doudja	Professeur USTHB	Examinatrice
M. ZEROUAL Ayoub	MCA, ENSH Blida	Examineur
M. BOUTAGHANE Hamouda	MCA, Univ. Annaba	Examineur



Remerciements & Dédicaces

Avant tout, je remercie ALLAH le Tout-Puissant pour toutes ses innombrables bénédictions, ainsi que pour la force et la volonté qu'il m'a donné pour accomplir ce travail.

Ces quelques lignes ne pourront jamais exprimer pleinement mes remerciements et ma gratitude à l'égard de mon directeur de thèse, monsieur Meddi Mohamed, professeur à l'ENSH, pour tout ce qu'il a m'a apporté au long de ma carrière scientifique. Outre son aide et ses conseils avisés, il a conféré à ma créativité une confiance et une liberté totales, dont j'espère être digne. Plus important encore, M. Meddi a été comme un père pour moi, faisant preuve d'empathie et de compassion pendant mes heures les plus sombres, pleines de tourments et d'incertitudes, et m'a inculqué confiance en moi et de la motivation.

J'adresse ma profonde reconnaissance à monsieur Ammari Abdelhadi, Maître de conférences à l'ENSH, qui est l'un des professeurs qui m'a le plus inspiré, et qui demeure mon modèle par sa rigueur et son intégrité scientifique. Il nous a dit dans un cours, "Un bon professeur se reconnaît à sa capacité à former des élèves qui peuvent le surpasser", et ce fut un moment d'une inspiration profonde que je n'oublierai jamais.

Mes sincères remerciements à l'ensemble des membres de ce jury de thèse d'avoir accepté de lire et d'évaluer mon travail.

Je tiens à exprimer ici ma gratitude aux personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à rendre mon parcours doctoral agréable et réussi, en particulier à tout le personnel de l'ENSH.

Je remercie également tout le personnel de l'agence nationale des ressources hydraulique (A.N.R.H) d'Alger et l'office National de la météorologie (O.N.M), pour avoir mis à ma disposition toutes les données pluviométriques, hydrométriques et climatologique utilisée dans cette Thèse.

À chaque fois qu'on achève une étape importante dans notre vie, on fait une pensée pour se rappeler de ces personnes qui ont partagé avec nous tous les bons moments de notre existence, mais surtout les mauvais. Ces personnes qui nous ont aidés sans qu'on leur demande, soutenus sans réserve, aimés sans compter, ces personnes qui ont cru en nous et que grâce à qui notre bonheur et joie reviennent de droit, à qui un malheur en nous, en eux se transforme en pleur. Que le tout puissant nous garde ces personnes très chères à nos cœurs.

Je dédie mon travail, aboutissement de nombreuses années d'études, d'abord et avant tout à la femme qui m'a donné naissance, ma merveilleuse mère, à qui je dois tout pour ses sacrifices, son amour, son aide et son soutien indéfectible.

Je dédie également ce travail à mon père qui m'a soutenu tout au long de ma vie et qui m'a inculqué des valeurs indélébiles, que je porte et brandit fièrement. De même, Je dédie cette thèse à ma petite famille, mes frères, leurs épouses, et mes chers neveux, Ziad, Anès et Mélissa. Votre Sikan vous aime énormément.

Je tiens à dédier cette Thèse, à celle qui a fait de moi un homme meilleur. Elle est ma vie de bohème, qui est devenue mon écosystème, et avec qui je suis moi-même. En sa présence la vie deviens si belle, et j'entends monter mon cœur en décibels.

Je dédie également ce travail aux rares amis sur qui je peux compter et m'aiment pour ma juste valeurs.

Résumé–Abstract–ملخص

Résumé

Au cours de la seconde partie du XXe siècle, l'Algérie a connu un stress hydrique notable, ainsi que des inondations catastrophiques, soulignant l'urgence d'une gestion plus efficace des ressources en eau, notamment par l'utilisation de modèles pluie-débit pour effectuer des simulations et des prévisions. En fait, les consignes d'exploitation des barrages en temps réel dépendent principalement des débits entrants et de la capacité de stockage des réservoirs. La prévision de ces apports à l'aide de modèles est la méthode d'exploitation la plus efficace, permettant ainsi d'anticiper les débits qu'il faudra évacuer du réservoir en question avant que la crue ne se produise.

Cette Thèse de doctorat a pour objet de développer un modèle événementiel capable de reproduire les hydrogrammes de crue dans des conditions climatiques semi-arides, où des données continues ne sont pas disponibles dans tous les bassins régionaux. Pour ce faire, six structures de modèle pluie-débit potentiellement applicables ont été testées et comparées au pas de temps horaire, pour cinq bassins versants du nord de l'Algérie aux caractéristiques géomorphologiques variées.

Deux approches distinctes ont été utilisées pour le développement des modèles. D'une part, cinq modèles de production ont été sélectionnés, en l'occurrence la méthode SCS-CN (M1) associée à trois niveaux de conditions d'humidité antécédentes (AMC) et quatre méthodes dérivées de la méthode SCS-CN (M2, M3, M4 et M5), qui sont basées sur l'incorporation de la quantité d'humidité antécédente (AMA). Ces fonctions productions ont été couplées à la fois à un modèle de séparation des écoulements, à savoir le modèle du filtre digitale, et au modèle de transfert de NASH. D'autre part, une structure de modèle de bassin versant (MBV) du cadre SUPERFLEX a été adaptée pour un pas de temps horaire et pour une modélisation événementielle. Les paramètres de modèles ont été calés à l'aide d'une même procédure d'optimisation multicritère, la méthode 'NSGA-II', qui a été combinée à la méthode TOPSIS pour sélectionner la meilleure solution parmi celles proposées.

Le modèle M1 a été le modèle plus médiocre quant à sa capacité à prédire les volumes de crues pour l'ensemble des bassins versants étudiés, à cause de la relation mathématique discontinue reliant l'humidité antécédente (P_5) aux niveaux d'AMC qui induit des sauts brusques dans les valeurs de CN . Ceci nous a amené à conclure que le concept de l'AMC, tel qu'il est formulé, est inadéquat pour le contexte hydro-climatique semi-aride Algérien. De plus, le modèle MBV a été considéré comme inefficace en raison de ses performances, et il nécessite un raffinement supplémentaire dans l'intégration de l'humidité antécédente avant d'être considéré comme un modèle fiable.

Les modèles SCS-CN modifiés ont produit des résultats satisfaisants. Cependant, excepté le modèle M3, chaque modèle était efficace pour un critère spécifique dans un bassin en particulier. De ce fait, aucun modèle idéal répondant à tous les critères, pour l'ensemble des bassins, n'a pu être identifié. Ainsi, les sorties des modèles M2, M4 et M5 ont été combiné par la méthode de combinaison à moyenne pondérée (WA), ce qui a permis de réduire la faiblesse de chaque modèle et d'affiner les résultats en assurant un équilibre raisonnable entre les critères des performances.

Abstract

During the second part of the 20th century, Algeria experienced notable water stress, as well as catastrophic floods, highlighting the urgency of more efficient water resource management, in particular through the use of rainfall-runoff models to perform simulations and forecasts. In fact, dams' real-time operating instructions depend primarily on reservoir inflows and storage capacity. Forecasting these flows using models is the most efficient operating method, which makes it possible to anticipate which flows must be evacuated from the respective reservoir before a flood occurs.

The objective of this PhD Thesis is to develop an event-based model that can accurately reproduce flood hydrographs in semi-arid climatic conditions where continuous data are not available in all regional basins. To this end, six potentially applicable rainfall-runoff models structures were tested and compared on an hourly time step, for five catchments in northern Algeria with different geomorphological characteristics.

Two distinct approaches were used for the models' development. On the one hand, five production models were selected, namely the SCS-CN method (M1) associated to three levels of antecedent moisture conditions (AMC) and four methods derived from the SCS-CN method (M2, M3, M4, and M5), which are based on the incorporation of antecedent moisture amount (AMA). These production functions were coupled to both a base flow separation model, namely the digital filter model, and the NASH transfer model. On the other hand, a watershed model structure (MBV), from the SUPERFLEX framework, was adapted for an hourly time step and for event-based modeling. The models' parameters were calibrated using the same multi-criteria optimization procedure, the 'NSGA-II' method, which was combined with the TOPSIS method to select the best solution among the proposed alternatives.

Model M1 was the poorest model in terms of its ability to predict flood volumes for all of the studied catchments, due to the discontinuous mathematical relationship linking antecedent moisture (P_5) to AMC levels that induces sudden jumps in CN values. This led us to conclude that the concept of AMC, as formulated, is unsuitable for the Algerian semi-arid hydro-climatic context. Moreover, the MBV was considered inefficient due to its performance, and it needs further refinement in the integration of antecedent moisture before being considered a reliable model. The modified SCS-CN models produced satisfactory results. However, with the exception of the M3 model, each model was efficient for a specific criterion in a particular catchment. As a result, no ideal model fulfilling all criteria, for all basins, has been identified. Thus, the outputs of models M2, M4, and M5 were combined using the weighted average (WA) combination method, which reduced the weakness of each model and refined the results by achieving a reasonable balance between the performance criteria.

المخلص

خلال الجزء الثاني من القرن العشرين ، عانت الجزائر من إجهاد مائي ملحوظ ، فضلاً عن فيضانات كارثية ، مما يبرز الحاجة الملحة إلى إدارة موارد مائية أكثر كفاءة ، لا سيما من خلال استخدام نماذج جريان الأمطار لإجراء عمليات المحاكاة والتنبؤ. في الواقع ، تعتمد تعليمات تشغيل السدود في الوقت الفعلي بشكل أساسي على تدفقات الخزان وسعة التخزين. إن التنبؤ بهذه التدفقات باستخدام النماذج هو أكثر طرق التشغيل كفاءة ، مما يجعل من الممكن توقع التدفقات التي يجب إخلؤها من الخزان المعني قبل حدوث الفيضان.

الهدف من أطروحة الدكتوراه هذه هو تطوير نموذج قائم على الحدث يمكنه إعادة إنتاج المخططات الهيدرولوجرافية للفيضانات بدقة في الظروف المناخية شبه القاحلة ، حيث لا تتوفر البيانات المستمرة في جميع الأحواض الإقليمية. تحقيقاً لهذه الغاية ، تم اختبار ومقارنة ستة نماذج من نماذج المطري- الجريان القابلة للتطبيق على خطوة زمنية كل ساعة ، في خمسة أحواض في شمال الجزائر بخصائص جيومورفولوجية مختلفة.

تم استخدام نهجين متميزين لتطوير النماذج. من ناحية ، تم اختيار خمسة نماذج إنتاج ، وهي طريقة SCS-CN (M1) المرتبطة بثلاثة مستويات من ظروف الرطوبة السابقة (AMC) وأربع طرق مشتقة من طريقة SCS-CN (M2 ، M3 ، M4 ، M5) ، والتي تستند إلى دمج كمية الرطوبة السابقة (AMA). تم ربط وظائف الإنتاج هذه بكل من نموذج فصل التدفق الأساسي ، أي نموذج المرشح الرقمي ، ونموذج النقل NASH. من ناحية أخرى ، تم تكييف هيكل نموذج الأحواض (MBV) ، من إطار SUPERFLEX ، لخطوة زمنية بالساعة وللنمذجة القائمة على الحدث. تمت معايرة معلمات النماذج باستخدام نفس إجراء التحسين متعدد المعايير ، طريقة «NSGA-II» ، والتي تم دمجها مع طريقة TOPSIS لاختيار أفضل حل من بين البدائل المقترحة.

كان نموذج M1 هو النموذج الأكثر فقراً من حيث قدرته على التنبؤ بأحجام الفيضانات لجميع الأحواض المدروسة ، بسبب العلاقة الرياضية المنفصلة التي تربط الرطوبة السابقة (P_5) بمستويات AMC التي تؤدي إلى قفزات مفاجئة في قيم CN. قادنا هذا إلى استنتاج أن مفهوم AMC ، كما تمت صياغته ، غير مناسب للسياق المناخي الجزائري شبه الجاف. علاوة على ذلك ، تم اعتبار MBV غير فعالة بسبب أداؤها وتحتاج إلى مزيد من التحسين في دمج الرطوبة السابقة قبل أن يمكن اعتبارها نموذجاً موثوقاً به. أسفرت نماذج-SCS-CN المعدلة عن نتائج مرضية. ومع ذلك ، باستثناء نموذج M3 ، كان كل نموذج فعال بالنسبة لمعيار معين في الأحواض المعنية. نتيجة لذلك ، لم يتم تحديد أي نموذج مثالي يلبي جميع المعايير لجميع الأحواض. وبالتالي ، تم دمج مخرجات النماذج M2 و M4 و M5 باستخدام طريقة الجمع بين المتوسط المرجح (WA) ، مما قلل من قابلية تعرض كل نموذج وصفل النتائج من خلال تحقيق توازن معقول بين معايير الأداء.

Table des matières

Table des matières

Remerciements & Dédicaces	3
Résumé–Abstract–ملخص	6
Table des matières	10
Liste des abréviations & symboles	13
Introduction générale	18
Structure de la thèse	21
Chapitre 1	23
Introduction	23
1.1 L'hydrologie des bassins versants	24
1.2 La description des crues	25
1.2.1 Définition	25
1.2.2 Types de crues	26
1.3 Les inondations	26
1.3.1 La description des inondations	27
1.3.2 Les inondations à l'échelle mondiale	27
1.3.3 Les inondations en Algérie	31
1.4 La gestion des risques d'inondation	34
1.4.1 Les déterminants du risque d'inondation	35
1.4.2 Le rôle des systèmes de prévision des crues	36
1.4.3 Le processus d'alerte aux inondations	37
1.4.4 La réponse d'urgence	38
1.5 Conclusion	38
Chapitre 2	40
Introduction	40
2.1 Généralité sur la modélisation hydrologique à l'échelle du bassin versant	41
2.1.1 Brève historique du développement des composants des modèles pluie-débit	41
2.1.1.1 les fonctions de productions	42
2.1.1.2 les fonctions d'évapotranspiration	42
2.1.1.3 les fonctions de transfert et de routage	43
2.1.1.4 les fonctions des écoulements souterrains	44
2.1.2 Le Développement des modèles pluie-débit à l'échelle du bassin versant	45
2.2 La classification des modèles pluie-débit	46
2.3 Inventaire des modèles de bassin versant	48
2.4 Le calage et la validation des modèles hydrologiques et incertitudes	50
2.4.1 Le calage	50
2.4.2 La validation	52
2.4.3 Les incertitudes	53
2.5 Les nouveaux développements la modélisation hydrologique de bassin versant	54
2.5.1 Les technologies spatiales et télédétection	54
2.5.2 Les modèles numériques de terrain et systèmes d'information géographique	56
2.5.3 Les traceurs chimiques	56
2.6 Les problèmes des échelles spatiale et temporelle dans la modélisation pluie-débit	57
2.7 Conclusion	60

Chapitre 3	61
Introduction	61
3.1. Présentation de la région d'étude	62
3.2 Constitution de la base de données hydro-climatique	63
3.2.1 La constitution d'un échantillon de bassins versants	63
3.2.2 Ensemble d'événements d'inondation	70
3.2.3 La structure de données pluie-débit	73
3.3 L'échantillonnage des ensembles de données de calage et de validation	74
3.4 Conclusion	77
Chapitre 4	78
Introduction	78
4.1 La mise au point d'un modèle pluie-débit au pas de temps horaire	79
4.2 La séparation des écoulements	80
4.3 La fonction de production	81
4.3.1 La Méthode SCS-CN	81
4.3.2 Les méthodes SCS-CN modifiées	83
4.3.2.1 Le model Mishra et al. (2006)	83
4.3.2.2 Le model de Sahu et al. (2010)	85
4.3.2.3 Le model Singh et al. (2015)	85
4.3.2.4 Le model de (Verma et al. 2017a)	86
4.4 La fonction de transfert	87
4.4.1 Le concept de l'hydrogramme unitaire	87
4.4.2 Le modèle de Nash (HUI de Nash)	90
4.5 Modèle de bassin versant proposé	92
4.6 La méthode d'optimisation	95
4.6.1 Les algorithmes génétiques (AG)	95
4.7 Les critères de performance	100
4.7.1 Les critères volumétriques :	101
4.7.2 Les critères hydrométriques :	102
4.8 Conclusion	103
Chapitre 5	105
Introduction	105
5.1 L'évaluation des performances des modèles testés	106
5.2. La performances volumétriques des modèles	106
5.3. Analyse structurale et paramétriques des modèles	111
5.4. Les performances hydrométriques des modèles	122
5.5 Conclusion	132
Conclusion générale	133
Perspectives de recherche	137
Références bibliographiques	138
Annexes	155
A. Procédure de sélection des crues	156
B. La procédure de la méthode « Order of Preference by Similarity to Ideal Solution » (TOPSIS)	158
C. Illustrations graphiques des hydrogrammes et hyétogrammes de quelques évènements pluie-débit	160

*Liste des abréviations &
symboles*

Liste des abréviations

AG : Algorithmes génétiques

AMA : Quantité d'humidité antécédente

AMC : Conditions d'humidité antécédente

ANRH : L'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

BIAS : Le critère des biais

CN: Curve Number

HA : Module d'humidité

HU : Hydrogramme unitaire

HUI : hydrogramme unitaire instantané

KGE : Critère d'efficacité Kling–Gupta

KGE': Critère d'efficacité Kling–Gupta modifié

M1 : La méthode SCS-CN combinée aux conditions d'humidité antécédente

M2 : Le model Mishra et al. (2006)

M3 : Le model de Sahu et al. (2010)

M4 : Le model Singh et al. (2015)

M5 : Le model de Verma et al. (2017)

MAE : L'erreur absolue moyenne

MARE : L'erreur relative absolue moyenne

MBV: Le modèle de Bassin Versant

MCDM : Méthodes de prise de décision multicritère (En anglais: Multi-Criteria Decision Making Methods)

MNT : Modèle numérique de terrain

NRMSE : Erreur quadratique moyenne normalisée

NSGA-II : Algorithmes génétiques basés sur tri non dominé- II (en anglais, Non-dominated Sorting Genetic Algorithm–II)

ONM : L'office National de la météorologie

PBIAS : Le pourcentage de biais

PPEAK : L'erreur relative moyenne de débit de pointe

R² : Le coefficient de détermination

SCS-CN : Soil Conservation Service – Curve Number

SIG : Système d'informations géographiques

SMA : Procédure de comptabilisation de l'humidité du sol

TOPSIS : La technique pour l'ordre de préférence par similarité à la solution idéale (en anglais, Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution)

WA : Combinaison à moyenne pondérée (en anglais, Weighted Average combination)

WMO : Organisation Météorologique mondiale

Liste des symboles

a_f : Le paramètre du filtre digital (-).

C_e : Coefficient d'écoulement (-).

CN : curve number (-).

F : l'infiltration cumulée excluant l'abstraction initiale (mm).

h_f : la fonction de décalage cumulée du modèle MBV (h^{-1}).

I_a : l'abstraction initiale (mm).

I_{max} : Intensité maximale des pluies (mm/h).

I_{moy} : Intensité moyenne des pluies (mm/h).

K : Le coefficient de stockage dans le modèle de NASH (h).

N : Le nombre de réservoirs en série dans le modèle de NASH (-).

P : Pluie totale (mm).

P_5 : Les pluies antécédentes cumulées de 5 jours (mm).

P_f : la pluie nette issue du modèle MBV (mm).

P_{fl} : Le flux entrant dans le réservoir de routage du modèle MBV.

P_n : La pluie effective qui participe au bilan hydrique (mm).

Q_c : le débit simulé du modèle combiné (m^3/s)

q_t : Le débit d'écoulement rapide de surface aux pas de temps t (m^3/s).

Q_t : Le débit total observé aux pas de temps t (m^3/s).

R : Le ruissellement simulé (mm).

R_{obs} : Le ruissellement observé (mm).

S : La capacité de rétention maximale potentielle (mm).

S_0 : la rétention maximale potentielle dans une condition aride.

S_a : L'humidité seuil du sol (mm).

S_b : La rétention maximale potentielle absolue (mm).

S_f : La capacité initiale du réservoir de routage (mm).

$S_{f,max}$: La capacité maximale du réservoir de routage (mm).

S_i : La capacité initiale du réservoir d'interception (mm).

$S_{i,max}$: La capacité maximale du réservoir d'interception (mm).

S_u : La capacité initiale du réservoir de production (mm).

$S_{u,max}$: La capacité maximale du réservoir de production (mm).

V_0 : L'humidité antécédente (mm).

α : Coefficients d'ajustement du module d'humidité (-).

β : coefficient de proportionnalité (-).

γ : Coefficients d'ajustement du module d'humidité (-).

Γ : La fonction gamma (-).

θ : Paramètre à caler de la fonction de production du modèle MBV (-).

λ : le coefficient d'abstraction initiale (-).

λ' : Coefficient de proportionnalité (-).

$\mu(t)$: L'hydrogramme unitaire instantané (1/h).

Ω : exposant de la fonction de production du modèle MBV (-).

Introduction générale

“La connaissance prend parfois des chemins bien étranges mais jamais au hasard : elle choisit ceux par qui elle aura le plus de chances de passer.” Igor et Grichka Bogdanoff

Introduction générale

L'eau est une ressource vitale qui a préoccupé l'humanité depuis des millénaires compte tenu de son rôle essentiel pour tout développement socio-économique. Elle a été le berceau de nombreuses civilisations mais aussi à l'origine de nombreuses catastrophes et de nombreux conflits et tensions.

Le bassin méditerranéen est un parfait témoignage de l'importance de cette précieuse ressource, ainsi que de ses aléas. L'Algérie est l'un des plus grands pays de la zone méditerranéenne, avec un climat variable en raison de son étendue géographique. Il en découle de ce contexte climatique deux problématiques majeures liées à l'eau. D'une part, le stress hydrique notable dans le pays depuis les années 1970 (Meddi et Hubert 2003; Zeroual et al. 2016, 2019), qui a conduit à la construction de plusieurs barrages pour améliorer la mobilisation des ressources et palier l'irrégularité de la répartition de la pluviométrie sur le territoire, où les zones les moins arrosées possèdent le potentiel agricole le plus grand, en l'occurrence les hauts plateaux. D'autre part, à l'instar des autres pays du bassin méditerranéen (Gaume et al. 2009; Llasat et al. 2010), l'Algérie a connu des inondations catastrophiques au cours de la seconde moitié du XX^{ème} siècle, causant de nombreux décès et d'importants dégâts matériels (Yahiaoui 2012; Meddi et al. 2017). L'inondation du 10-11 novembre 2001 à Bab El Oued, Alger et celle du 01-02 Octobre 2008 à Ghardaïa, restent les inondations les plus dévastatrices de ces dernières décennies. Elles ont fait des milliers de victimes et ont traumatisé l'opinion publique.

Devant ces enjeux cruciaux, qui sont accentués par l'accroissement démographique et le changement climatique, des mesures de protection et de gestion sont devenues une nécessité par l'adoption de stratégies structurelles ou non structurelles basées sur une solide compréhension du phénomène de ruissellement ainsi que des nombreux facteurs qui peuvent l'influencer (Brocca et al. 2011), d'où l'intérêt des gestionnaires pour les modèles pluie-débit en tant qu'outil essentiel pour la prédiction des crues éclair et la prévision en temps réel (Todini 1988). De plus, les consignes d'exploitation des barrages en temps réel dépendent principalement des débits entrants et de la capacité de stockage des réservoirs. La prévision de ces apports à l'aide de modèles est la méthode d'exploitation la plus efficace, permettant ainsi d'anticiper les débits qu'il faudra évacuer du réservoir en question avant que la crue ne se produise.

De nombreuses études en Algérie se sont concentrées sur l'analyse fréquentielles des crues (par exemple, Hebal et Remini 2011; Meddi et al. 2017). En plus des modèles stochastiques, des modèles développés pour d'autres conditions climatiques sont généralement utilisés pour estimer les débits de pointe. Cependant, seules quelques études ont été menées en utilisant des modèles pluie-débit pour appréhender les processus de genèse des crues et caractériser leurs comportements hydrologiques sur de petits pas de temps.

La littérature scientifique contient de nombreux types de modèles, chacun avec sa propre base théorique, sa structure et son niveau de complexité. Cependant, comme la plupart de ces modèles ont été développés pour des conditions hydro-climatiques spécifiques, leur applicabilité à d'autres contextes climatiques ne peut être garantie a priori. La plupart de ces modèles sont basés sur la transformation de l'excès d'infiltration en ruissellement, qui est

acheminé à l'exutoire pour constituer l'hydrogramme simulé. En général, les modèles pluie-débit peuvent être subdivisés en deux catégories principales basées sur la représentation temporelle : les modèles continus et événementiels (Brocca et al. 2011).

Les modèles continus permettent d'évaluer l'humidité du sol au début d'un événement pluvieux (Perrin et al. 2003; Tramblay et al. 2010; Massari et al. 2014b). Cependant, ils nécessitent des séries chronologiques à long terme et ininterrompues de données de précipitations et de débits comme données d'entrée. Cependant, ces données sur des petits pas de temps sont rarement disponibles en Algérie ou même en Afrique du Nord (Hughes 2011; El Khalki et al. 2018b). Par conséquent, dans la modélisation des crues, les modèles événementiels représentent une alternative aux modèles continus en l'absence de ces données (Tramblay et al. 2012). L'approche événementielle est une alternative largement utilisée qui nécessite des données à l'échelle de l'événement (Chahinian et al. 2005; Brocca et al. 2011; Hossain et al. 2019). Cependant, cette approche implique des paramètres supplémentaires pour l'évaluation des conditions initiales d'humidité pour chaque événement pluvieux. En conséquence, le modélisateur a la tâche délicate de choisir un modèle pluie-débit capable de simuler avec précision un large éventail d'événements de crues complexes (Chang et al. 2017; Abdi et Meddi 2020a, b), avec un nombre réduit de paramètres afin d'éviter le sur-paramétrage, qui augmente la complexité des modèles et réduit leur efficacité (Perrin et al. 2003; Beven 2011; Todini 2011).

Sur la base des informations ci-dessus et des contraintes de données, l'approche événementielle a été adoptée dans cette Thèse de doctorat. De plus, l'humidité initiale du sol a été prise en compte dans la modélisation, compte tenu de son influence considérable sur la réponse hydrologique des bassins versants, en particulier pour les crues éclair en zone méditerranéenne comme le soulignent de nombreuses études (par exemple, Brocca et al. 2009; Tramblay et al. 2010; Massari et al. 2014a; El Khalki et al. 2018). Parmi les modèles de pluie-débit événementiels, la méthode SCS-CN (SCS 1972) est fréquemment utilisée dans la région méditerranéenne (par exemple, Longobardi et al. 2003; Brocca et al. 2008, 2011; Soulis et al. 2009; Tramblay et al. 2010; Abdi et Meddi 2015; Brigandì et al. 2017; Zema et al. 2017; El Khalki et al. 2018; Maref et Seddini 2018). L'avantage de la méthode SCS-CN est sa simplicité, sa prévisibilité, sa stabilité, et son applicabilité pour les bassins non jaugés (Ponce et Hawkins 1996; Verma et al. 2017b; Mishra et al. 2018a). Elle repose sur deux paramètres, à savoir le Curve Number (CN), qui est lié à trois niveaux de conditions d'humidité antécédentes (AMC), et les pertes initiales (I_a). Cependant, la méthode originale a fait l'objet de nombreuses critiques quant à ses limites (par exemple, Ponce et Hawkins 1996; Singh 1999; Mishra et Singh 2003; Garen et Moore 2005; Mishra et al. 2006), notamment en ce qui concerne le saut soudain du CN qui se produit avec la variation de l' AMC (Mishra et Singh 2002b; Soulis et al. 2009; Verma et al. 2017b; Mishra et al. 2018a). Pour surmonter les limites de la méthode SCS-CN, de nombreux auteurs ont suggéré, avec différents niveaux de succès, des modifications à la procédure de comptabilisation de l'humidité du sol (SMA) en incorporant les quantités d'humidité antérieures (AMA) (Michel et al. 2005; Geetha et al. 2007; Sahu et al. 2010; Singh et al. 2015; Verma et al. 2017a). La méthode SCS-CN et ses méthodes dérivées sont communément appelées fonctions de production, car elles consistent à produire, pour chaque événement, la pluie nette qui participe réellement à l'écoulement.

Cependant, leur application pour la simulation des hydrogrammes de crues nécessite qu'ils soient associés à d'autres modèles représentant d'autres processus, notamment un modèle de séparation des écoulements de base et un modèle de transfert.

Par ailleurs, une autre approche consiste à adapter la structure de modèles de bassin versant continus, dont les parties production et transfert ne sont pas toujours clairement dissociables, pour un mode de simulation événementiel. Des ajustements sont apportés pour permettre d'effectuer des estimations des états initiaux des modèles par des descripteurs externes, notamment les débits de base et les pluies antécédentes.

Dans cette Thèse, plusieurs structures de modèles, à savoir le modèle SCS-CN, quatre modèles SCS-CN modifiées et un modèle modifié de bassin versant, seront testés et comparées sur un ensemble de 5 bassins versants du nord de l'Algérie dans le but d'identifier le modèle le plus adapté au contexte régional semi-aride. De plus, une analyse de leurs cohérences et de leurs stabilités structurelles sera entreprise. En effet, un modèle pluie-débit efficace et stable est nécessaire pour les gestionnaires de barrages pour simuler les flux entrants dans les barrages de ces zones pour leur permettre des prises de décision rapides et fiables.

Structure de la thèse

Cette thèse de doctorat s'articule sur cinq chapitres principaux. Quelques compléments sont fournis dans les annexes.

Le premier chapitre sert d'introduction à notre travail et à le mettre dans son contexte. Il passe en revue quelques notions hydrologiques de base, telles que le cycle de l'eau et la genèse des crues, puis passe en revue les problématiques liées aux inondations à travers le monde et en Algérie, ainsi que les différentes stratégies de gestion des risques pour faire face à cet aléa.

Le second chapitre rappelle l'état de l'art de la modélisation hydrologique à l'échelle du bassin versant pour justifier nos choix méthodologiques. Il comprend une brève historique du développement de modèles représentant les divers processus du cycle hydrique et les modèles complets de bassin versant, ainsi que les concepts fondamentaux tels que le calage et la validation, ainsi que les incertitudes liés à la modélisation. Il évoque également les difficultés que soulèvent les échelles spatiale et temporelle dans la modélisation pluie-débit.

Le troisième chapitre présente l'échantillon de bassins versants constitué pour ce travail, ainsi que leurs caractéristiques climatiques, morphométriques et géologiques. Il aborde également les traitements effectués pour construire la base de données hydro-climatique des crues et leurs principales caractéristiques. La procédure d'échantillonnage des sous-ensembles de calage et de validation y sera détaillée.

Le quatrième chapitre pose les bases méthodologiques de notre étude. Il présente les différents modèles qui vont être utilisés dans cette thèse pour développer les structures de modèle proposées, ainsi qu'une justification de ces choix méthodologiques. Des réflexions sur la pertinence de ces structures et d'éventuelles modifications y seront discutées. De plus, il aborde la procédure de calage et les algorithmes et les modes d'optimisation. Nous exposons également le choix de critères numériques pour évaluer les modèles à simuler les débits de crues.

Le cinquième chapitre présente une évaluation approfondie des performances volumétriques et hydrométriques des modèles selon des critères de qualité précédemment sélectionnés. Il comporte également un diagnostic approfondi de la cohérence et la stabilité structurelle de ces modèles sous différentes situations climatiques. Cette investigation permet de d'identifier d'éventuelles incohérences structurelles dans le modèle, pouvant apparaître en évaluant le comportement du modèle sous divers valeurs d'humidité antécédente.

Le dernier chapitre (Conclusions) passe en revue les travaux réalisés dans cette thèse, mettant en évidence les principaux résultats et suggérant des pistes de recherche à explorer dans des travaux ultérieurs.

Chapitre 1

La Problématique des Inondations et la Gestion des Risques

— *Well begun is half done* — Aristotle

Les inondations sont des phénomènes complexes qui représentent la source de catastrophes naturelles la plus fréquente du monde. Elles sont responsables de la majorité des dégâts provoqués par l'ensemble de catastrophes naturelles, ce qui a conduit les différentes autorités à accroître la sensibilisation aux risques d'inondation et des crues (Pilon 2002; WMO 2004), en particulier avec le changement climatique, la croissance de l'urbanisation et le changement d'affectation des terres. Les régions méditerranéennes sont sujettes aux risques d'inondation en raison de leur climat local (Gaume et al. 2009; Llasat et al. 2010), c'est également le cas de l'Algérie, qui a connu des inondations catastrophiques au cours de la seconde moitié du XXe siècle.

Introduction

Afin de contextualiser ce travail de recherche, la première partie de ce chapitre (Sections 1.1 et 1.2) présente brièvement le cycle de l'eau et la genèse des crues. Ensuite, nous présentons le phénomène d'inondations et spécialement dans le contexte Algérien. Finalement, Nous citerons les mesures de gestion des risques d'inondations afin d'introduire l'objet et les motivations de l'étude.

1.1 L'hydrologie des bassins versants

L'hydrologie est la science qui étudie le cycle de l'eau, c'est-à-dire le mouvement des masses d'eau dans l'hydrosphère, c'est-à-dire la partie du système terrestre où se trouve l'eau (d'environ 15 km dans l'atmosphère jusqu'à environ 1 km dans la lithosphère). D'après la représentation schématique du cycle de l'eau dans la Figure 1.1 inspirée de Chow et al. (1988), la fameuse phrase de Lavoisier¹ "Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme" peut s'appliquer au cycle de l'eau. En effet, on peut observer qu'à l'échelle mondiale, l'hydrologie se concentre sur les échanges d'eau entre l'atmosphère, la surface terrestre, les cours d'eau, le sous-sol et l'océan. Cependant, afin de contextualiser notre travail, cette définition classique de l'hydrologie est trop large car elle englobe toutes les branches et caractérisations de la discipline qui peuvent se concentrer sur un ou plusieurs compartiments de l'hydrosphère, à travers un large éventail d'échelles spatiales et temporelles. L'hydrologie continentale est généralement définie comme étant l'étude de la partie continentale du cycle de l'eau (à l'exclusion des océans et des mers) d'un point de vue quantitatif. Les principaux processus physiques pris en compte dans l'hydrologie continentale comprennent: les précipitations, l'interception, l'évaporation, la transpiration, l'infiltration, la percolation, le ruissellement (superficiel, hypodermique et souterrain) et l'écoulement dans les cours d'eau.

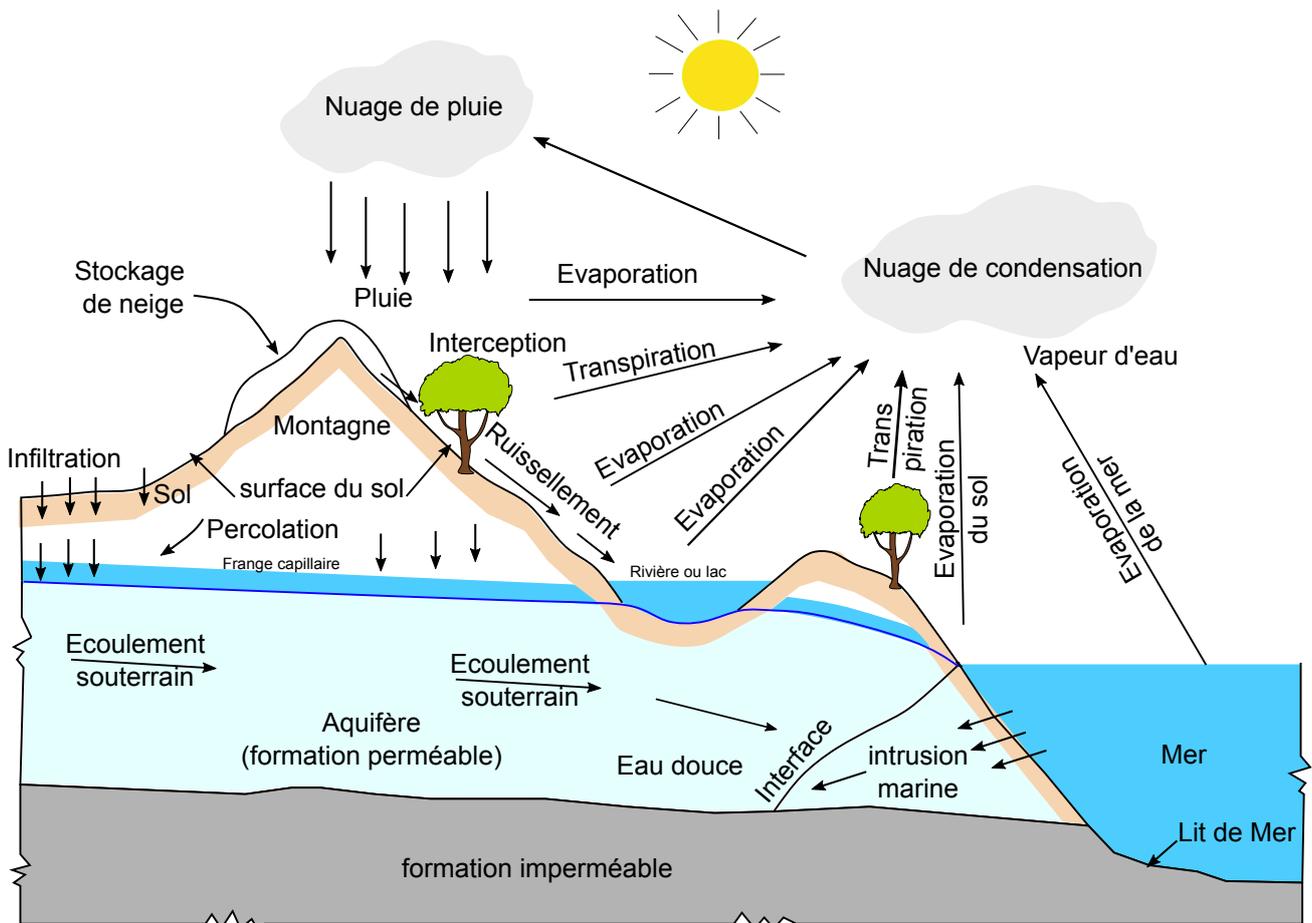


Figure 1.1 Conceptualisation du cycle de l'eau

¹ Antoine Lavoisier (1743-1794) est un chimiste, philosophe et économiste français qui a découvert le phénomène d'oxydation, et participé à la réforme de la nomenclature chimique.

Dans ce contexte, nous pouvons se focaliser sur l'hydrologie des bassins versants qui traite l'intégration des processus hydrologiques et les différents échanges à l'échelle du bassin versant (Laborde 2000). Un bassin versant peut-être défini comme l'ensemble de la zone topographique et géologique qui se déverse dans un cours d'eau à travers un exutoire (Chow et al. 1988). Il peut être considéré comme une surface élémentaire hydrologiquement close où se produisent les processus physiques du cycle de l'eau. Cependant, malgré la définition donnée ci-dessus, un bassin versant est souvent défini uniquement sur une base topographique, par la ligne de partage des eaux qui considéré comme la ligne de crête comme le montre la Figure 1.2.

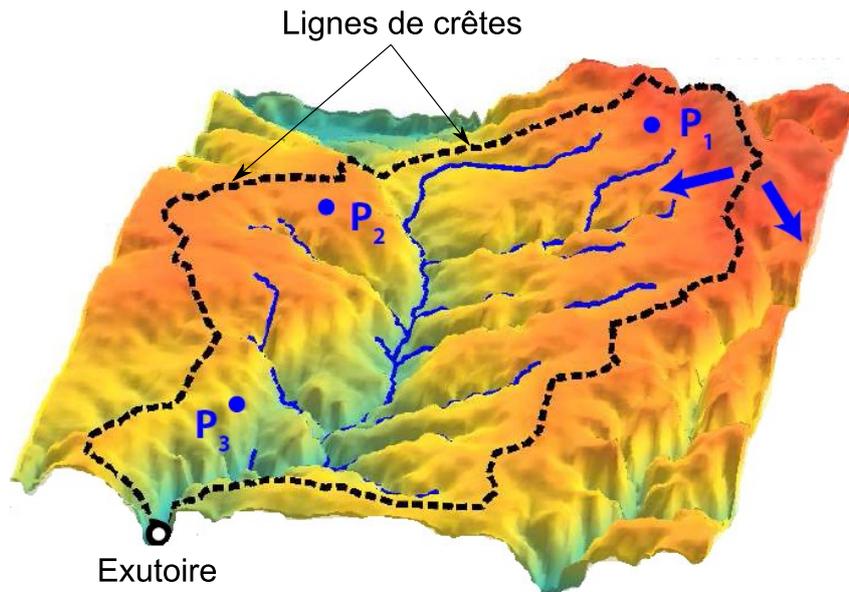


Figure 1.2 Définition du système bassin versant tiré de Le Moine (2008)

À l'instar d'autres disciplines de l'environnement, l'hydrologie des bassins versants s'intéresse à un système complexe avec de phénomènes fortement interdépendants, distribués avec une variation spatio-temporelle.

1.2 La description des crues

1.2.1 Définition

La crue correspond à l'augmentation de la quantité d'eau qui s'écoule dans un système hydraulique (c'est-à-dire, cours d'eau, réservoirs et lacs), avec ou sans débordement des berges (Hingray et al. 2015). Il s'agit d'un phénomène naturel qui devient exceptionnel lorsque les débits du cours d'eau dépassent un certain seuil, pouvant ainsi provoquer une inondation. L'ampleur d'une crue causée par des événements hydrométéorologiques dépend de l'intensité de la pluie, de sa répartition dans l'espace et le temps, de la taille des bassins versants concernés, des caractéristiques du sol, du drainage naturel et artificiel des bassins, et l'état de saturation des sols (Gaume et al. 2009; Bringas 2016). Une crue se définit par différents critères : sa genèse, sa durée, sa fréquence, son débit de pointe et son volume (Salomon 1997).

À des fins pratiques, la crue est représentée graphiquement par un hydrogramme qui est la série chronologie des débits successifs enregistrés à un endroit donné d'une rivière à la suite de précipitations ou de fonte des neiges, et qui permet donc, de synthétiser les données hydrométriques. La Figure 1.3 schématise le processus de genèse des crues du à une précipitation.

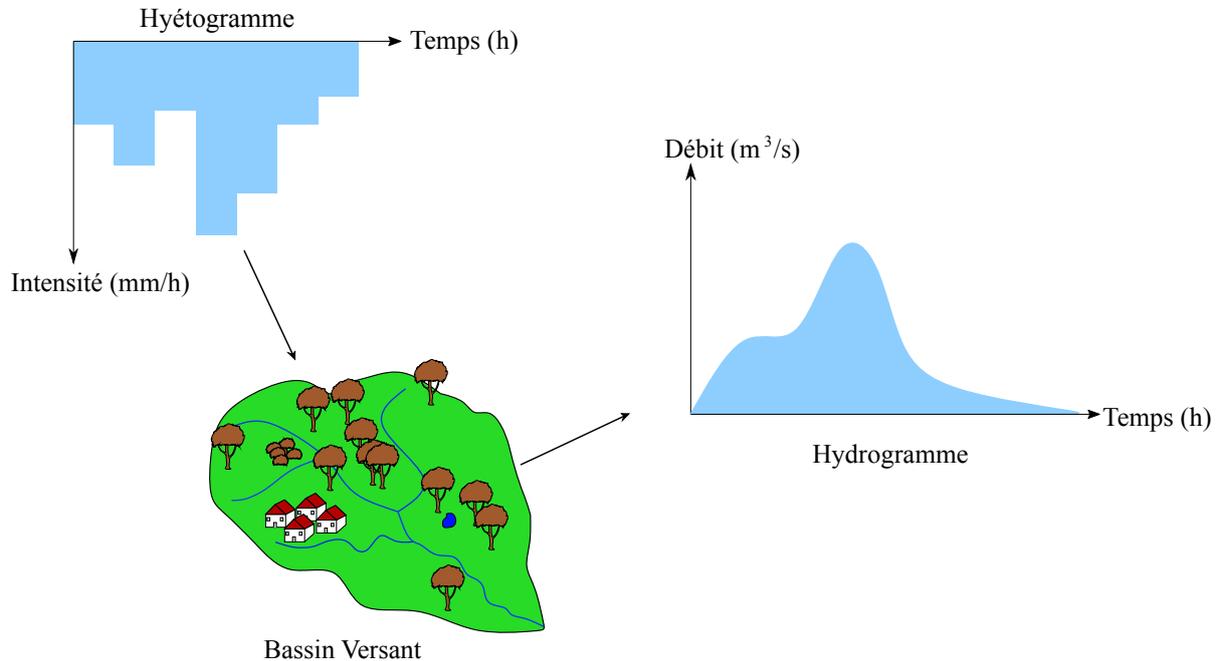


Figure 1.3 Schéma du processus de genèse des crues

1.2.2 Types de crues

En général, deux types de crues peuvent être distingués : les crues fluviales et les crues torrentielles. Les crues fluviales ou dites lentes sont généralement saisonnières, affectant de grands bassins versants où la montée en eau est lente. Tandis que les crues torrentielles ou dites éclaires affectent n'importe quelle partie du réseau hydrographique. Elles sont générées par des pluies à caractère convectif très violentes et localisées; elles sont caractérisées par une évolution très rapide, la montée des eaux étant très brutale (Hubert 2001).

1.3 Les inondations

Qu'est-ce qu'une inondation ? Quels en sont les risques ?

A la différence de la crue qui n'est pas toujours synonyme de débordement, l'inondation peut être définie comme une submersion temporaire, par l'eau, de terres qui ne sont pas submergées en temps normal, quelle qu'en soit l'origine. Elles résultent généralement d'une combinaison d'extrêmes météorologiques et hydrologiques, tels que des précipitations et des débits extrêmes. Cependant, elles peuvent également se produire en raison des activités humaines: l'inondation de biens et de terres peut être le résultat d'une croissance et d'un développement imprévu dans les plaines inondables, ou de la rupture d'un barrage ou du dépassement d'un remblai qui ne protège pas les aménagements prévus (souvent confondues avec les crues, les inondations en sont la conséquence).

1.3.1 La description des inondations

Les descriptions et les catégorisations des inondations varient et sont basées sur une combinaison de sources, causes et impacts. Sur la base de ces combinaisons, les inondations peuvent généralement être caractérisées en inondations fluviales, inondations pluviales, inondations côtières, inondations souterraines ou défaillance de systèmes d'eau artificielle (par exemple, rupture d'un barrage) (Petersen 2001; Jha et al. 2012). En fonction de la vitesse du début des inondations, les inondations sont souvent décrites comme des inondations soudaines, des inondations urbaines, des inondations semi-permanentes et des inondations à lente montée. Toutes les inondations susmentionnées peuvent avoir de graves répercussions sur les zones urbaines, et donc être classées comme inondations urbaines. Il est important de comprendre à la fois la cause et la vitesse d'apparition de chaque type pour comprendre leurs effets possibles sur les zones urbaines et comment atténuer leurs impacts. Le Tableau 1.1 résume les types et les causes des inondations.

1.3.2 Les inondations à l'échelle mondiale

Parmi les différents types de désastres naturels, les inondations sont le principal type qui affecte le monde, que ce soit par la fréquence d'occurrence ou par le nombre de sinistrés selon le rapport du CRED–UNISDR² (2018) comme l'indique la figure 1.4. En effet, le rapport indique sur une échelle mondiale, une moyenne de 37 inondations catastrophiques par an lors de la période 1900-2013. Ces inondations affectent près de 31 millions de sinistrés et causent en moyenne plus de 60 000 décès par ans. L'Asie étant le continent ayant le plus grand nombre de victimes et de sinistrés. Ces chiffres alarmants indiquent le caractère dévastateur des inondations, qui sont susceptible de provoquer des pertes de vie humaine, le déplacement de populations, d'avoir un impact sur la santé humaine, les biens et les réseaux et l'environnement. De ce fait, les inondations peuvent être considérées comme étant l'un des facteurs limitant le développement des capacités de la société humaine, en particulier dans les pays pauvres et en développement où la capacité d'alerte et l'expérience de gestion du risque sont encore limitées (Petersen 2001).

De plus, l'amplitude et la fréquence des inondations peuvent être aggravées par plusieurs facteurs tels que la surexploitation inappropriée des ressources naturelles et le changement climatique (Zhang et al. 2007; Ngo 2014). En effet, des études contemporaines indiquent l'impact du changement climatique sur les événements pluvieux extrêmes (Par exemple, Guhathakurta et al. 2011; Wang et al. 2013; Yilmaz et al. 2014).

Cette problématique constitue un véritable défi pour les générations futures, qui consiste à minimiser l'impact du changement climatique et son impact sur les événements extrêmes, qui est devenu une urgence mondiale comme le souligne l'accord de Paris³.

² Center for Research on the Epidemiology of Disasters–United Nations Office for Disaster Risk Reduction : Centre de recherche sur l'épidémiologie des catastrophes–Bureau des Nations Unies pour la réduction des risques de catastrophe.

³ L'accord de Paris est le premier accord mondial sur le climat et le réchauffement climatique. Il fait suite aux négociations qui se sont tenues lors de la Conférence de Paris de 2015 sur les changements climatiques (COP21) de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques

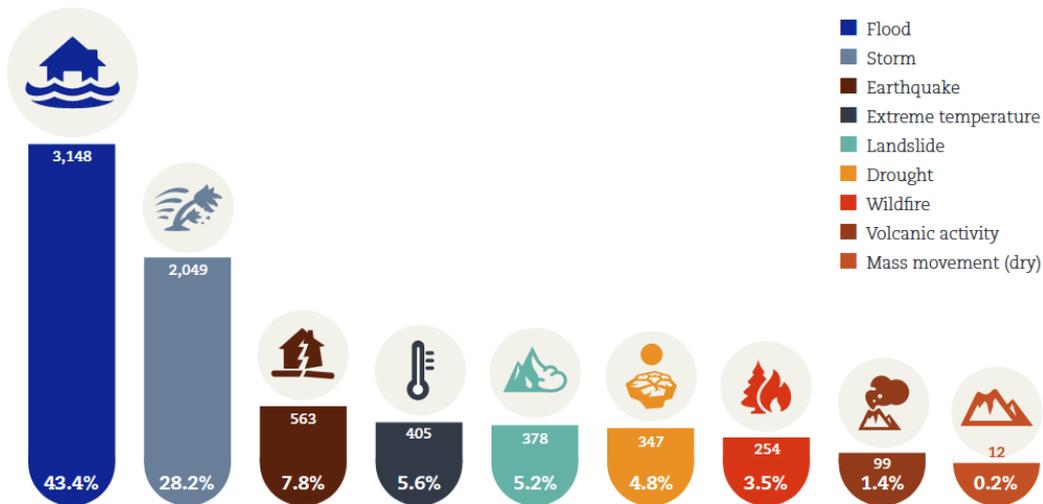
1. La problématique des inondations et la gestion des risques

Tableau 1.1 Types et causes des inondations d'après Jha et al. (2012)

Type d'inondation	Causes		Temps de début	Durée
	Naturelles	Anthropique		
Inondation urbaine	Fluviale Côtière Eclaire Pluviale Eau souterraine	Saturation de la capacité de drainage et des eaux usées. Manque de perméabilité dû à une concrétisation accrue. Système de drainage défectueux et manque de gestion.	Varie selon la cause	De quelques heures à quelques jours
Inondation pluviale ou superficielle	Orages convectifs, fortes pluies, rupture de l'embâcle, éclatement d'un lac glaciaire, tremblements de terre entraînant des glissements de terrain	Changements d'utilisation des sols, urbanisation. Augmentation du ruissellement de surface	Varie	Varie selon les conditions préalables
Inondation côtière (tsunamis, ondes de tempête)	Tremblements de terre Sous-marin volcanique éruptions Affaissement, érosion côtière	Développement des zones côtières Destruction de la flore naturelle côtière	Varie mais généralement assez rapide	Habituellement, un temps court mais prend parfois beaucoup de temps à reculer
Inondation par eau souterraine	Niveau élevé de la nappe phréatique combiné à de fortes précipitations Effet intégré	Développement dans les zones basses; interférence avec les aquifères naturels	Habituellement lent	Durée plus longue
Inondation éclair	Peut-être causée par des systèmes fluviaux, pluviaux ou côtiers; orages convectifs;	Rupture catastrophique des structures de rétention d'eau Infrastructures de drainage inadéquates	Rapide	Habituellement court, souvent quelques heures seulement
Inondation semi-permanente	Élévation du niveau de la mer, affaissement des terres	Surcharge de drainage, défaillance des systèmes, développement urbain inapproprié Mauvaise gestion des eaux souterraines	Habituellement lent	Longue durée ou permanente

D'autres phénomènes sont souvent associés aux inondations. Il s'agit principalement des coulées de débris (transport d'eau et de débris), des glissements de terrain (autour d'un cours d'eau ou sur son tracé lors d'un débordement des berges) et des phénomènes d'érosion torrentielle (à l'intérieur et autour des torrents de montagne). Les conséquences de tels phénomènes sont souvent aussi graves que les conséquences directes des inondations mais font généralement l'objet d'études et d'analyses particulières (Hingray et al. 2015).

a) Numbers of disasters per type 1998-2017



b) Number of people affected per disaster type 1998-2017

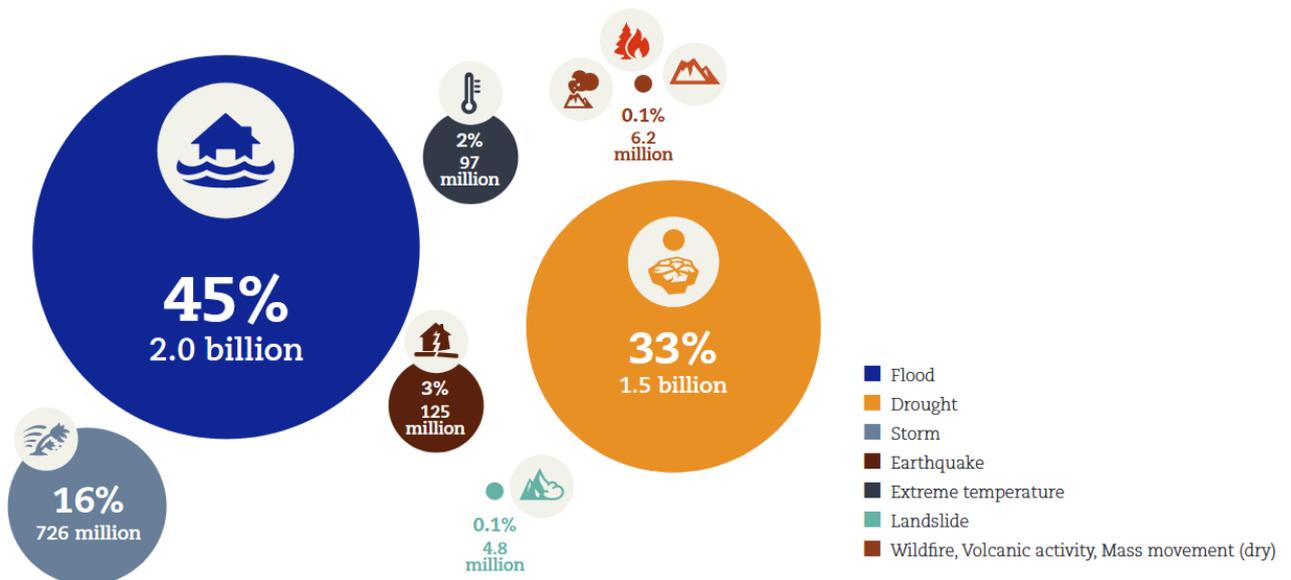


Figure 1.4 Les statistiques des principaux désastres dans le monde durant la période 1998–2017; a) par type de désastre et b) par nombre de sinistrés (Source : CRED–UNISDR 2018).

En outre, Dilley et al. (2005) ont évalué les risques de mortalité et de pertes économiques dus aux inondations en calculant des coefficients de vulnérabilité à partir des données brutes des pertes globales totales extraites de l'EM-DAT⁴ pour la période 1981–2000. Les résultats obtenus ont été représenté graphiquement sur la Figure 1.5. Les zones à haut risque de mortalité dû à l'exposition de la population aux inondations (indiquées en rouge dans la Figure 1.5.a) comprennent de vastes zones du Midwest des États-Unis, de l'Amérique centrale, de l'Amérique du Sud côtière, de l'Europe, de l'Afrique de l'Est et du nord, de l'Inde et du Bangladesh, de la Chine, de la péninsule coréenne, de l'Asie du Sud-Est, de l'Indonésie et des Philippines (Smith et Smith 2013). De plus, Une grande partie de l'Asie, des parties de l'Amérique centrale et du Sud et l'Afrique du nord semblent à haut risque en termes de mortalité et de perte économique (Figures 1.5 a et b).

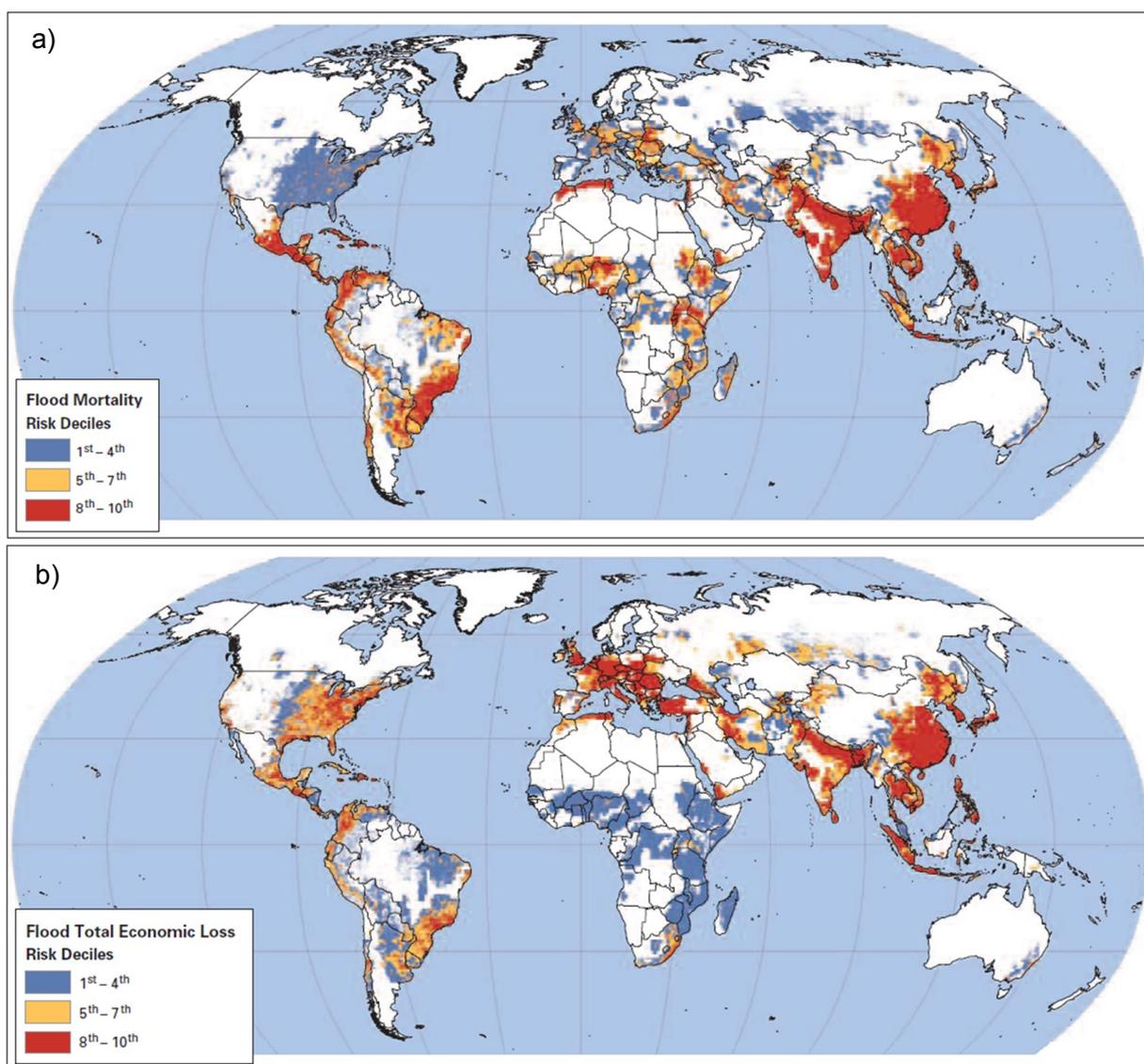
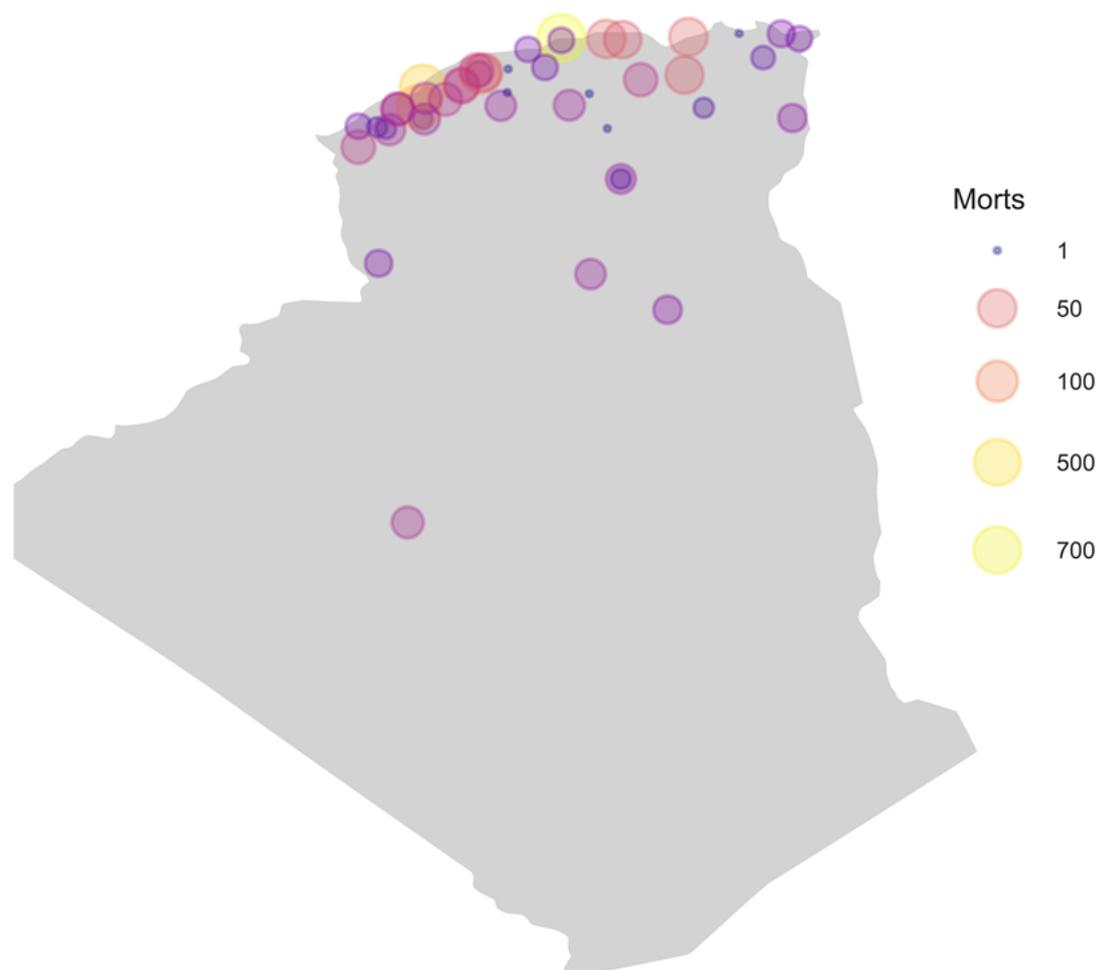


Figure 1.5 Répartition mondiale du risque d'inondation par: a) mortalités, b) pertes économiques totales (source : Dilley et al. 2005)

⁴ Emergency Events Database: La base de données internationale sur les catastrophes du Centre de recherche sur l'épidémiologie des catastrophes

1.3.3 Les inondations en Algérie

Les régions méditerranéennes sont sujettes aux risques d'inondation en raison de leur climat local (Gaume et al. 2009; Llasat et al. 2010), c'est le cas de l'Algérie, qui a connu des inondations catastrophiques au cours de la seconde moitié du XXe siècle. Ces inondations ont fait un grand nombre de morts et d'immenses dégâts matériels, constituant un réel frein pour le développement économique et social (Yahiaoui 2012; Meddi et al. 2017; Abdi et Meddi 2020a). Toutefois, malgré le fait que les inondations sont très récurrentes en Algérie, il est à remarquer l'absence d'une base de données Algérienne officielle qui rassemble les informations relatives aux inondations historiques⁵. Néanmoins, une compilation, non exhaustive, des inondations historiques majeures survenue en Algérie a été établie sur la base de plusieurs publications scientifiques, revues de presses, sites web, des thèses de doctorat et des communications dans des colloques nationaux et internationaux (Par exemple, Salah 2004; Yahiaoui 2012; Meddi et al. 2017; Sardou et al. 2018). Cette compilation est donnée dans le Tableau 1.2 et illustrée graphiquement dans la Figure 1.6



Figures 1.6 Carte des inondations majeures historiques survenues en Algérie.

⁵ Bien que des informations soient disponibles au niveau des services compétents, nous faisons allusion à une base de données Algérienne officielle en accès libre au grand public.

Tableau 1.2 Les inondations majeures historiques survenues en Algérie.

Date	Site	Nombre de victimes et dégâts	Type
15 Décembre 1881	Mohammadia (Mascara)	250 morts et Les voies ferrées furent coupées et les ponts enlevés.	Rupture de barrage
10 Novembre 1900	Mascaara	10 morts et 22 sites affectés	Inondation éclair
08 Janvier 1904	Relizane	15 morts et 39 sites affectés	Inondation éclair
26 Novembre 1927	Mostaganem	382 morts et 35 sites affectés	Inondation éclair
27 Février 1936	Ain el Turck	1 mort et 14 sites affectés	Inondation Côtière
11 Septembre 1941	Tlemcen	17 morts et 12 sites affectés	Inondation éclair
31 Octobre 1948	Ouled Tlélât	16 morts et 7 sites affectés	Inondation éclair
06 Octobre 1966	Chlef	63 morts et 34 sites affectés	Inondation éclair
11 Décembre 1967	Ouled Fares	19 morts et 12 sites affectés	Inondation éclair
11 Mai 1968	Ouled Tlélât	12 morts et 8 sites affectés	Inondation éclair
12 Octobre 1971	Azzazga (Tizi Ouzou)	40 morts et certaines habitations détruites	Inondation éclair
28 au 31 Mars 1974	Tizi Ouzou	52 morts 4570 maison détruite 130 villages isolés, plus de 18000 sinistrés. Dégât évalué à 27 millions de DZD	Inondation éclair
01 Septembre 1980	El Eulma (Sétif)	44morts, 50 Blessés 365 famille sinistrée	Inondation éclair
22 Aout 1983	Birrine (Djelfa)	10 morts, 10 blessés, 200 habitations détruites et 1200 têtes de bétail emportés par les eaux	Inondation éclair
03 Février 1984	Jijel	20 morts, 500 têtes de bétail emportés et dégât évalué à 50 Millions DZD	Inondation éclair
	Constantine	1140 familles sinistrées et 200 ha de cultures détruites	Inondation éclair
	Skikda	8000 habitations envahies par les eaux	Inondation éclair
	Guelma	3 disparus, 157 familles sinistrées, 2 ponts détruits.	Inondation éclair
	Khenchla	777 familles sinistrées	Inondation éclair
	Oum el Bouaghi	144 maisons détruites et 429 familles sinistrées	Inondation éclair
05 Juillet 1987	Batna	02 morts, des dizaines de familles sinistrées et des dégâts matériels	Inondation éclair
01 Septembre 1989	Biskra	02 morts, 35 blessés, plus de 400 palmiers et cultures détruites	Inondation éclair
20 Octobre 1993	Oued R'hiou	22 morts, 20 blessés et plusieurs disparus, des dizaines de famille sinistrée, d'important dégât matériel	Inondation éclair

1. La problématique des inondations et la gestion des risques

23 au 24 Septembre 1994	B.B.Arréridj	17 morts et 1 000 sinistrés, dont 370 commerçants ruinés. Les pertes ont été évaluées à 25 milliards de centimes.	Inondation éclairée	
02 Octobre 1994	Lardjem	11 morts et 7 sites affectés	Inondation éclairée	
23 Septembre 1994	B.B.Arréridj	27 morts, 84 blessés et 941 familles sinistrées	Inondation éclairée	
	Msila		Inondation éclairée	
	Djelfa		Inondation éclairée	
	Médéa		Inondation éclairée	
	Bouira		Inondation éclairée	
	Ain Defla		Inondation éclairée	
29 au 02 Octobre 1994	Tiaret	dégât matériel évalué à 270 millions DZD	Inondation éclairée	
	Ghardaïa		Inondation éclairée	
	Laghouat		dégât matériel évalué à 5 millions DZD	Inondation éclairée
	Biskra		8 morts, 22 familles sinistrées et routes endommagées	Inondation éclairée
	Mascara		02 morts et important dégât matériel	Inondation éclairée
	Tissemsilt		09 morts	Inondation éclairée
14 Janvier 1999	Sidi bel Abbes	02 morts	Inondation éclairée	
14 Janvier 1999	Adrar	12 morts et plusieurs disparus, 174 habitations en Toub détruite à Timimoun, Tssabit, Reggane et Adrar	Inondation éclairée	
03 Juin 1991	Ghardaïa	09 morts et pertes en cheptel et palmerais, destruction partielle de la digue d'El Atteuf et important dommages aux infrastructures voisinant oued Mzab	Inondation éclairée	
24 Octobre 2000	Sidi Bel Abbes	11 morts et 32 sites affectés	Inondation éclairée	
10 Novembre 2001	Oum Drou	40 morts et 25 sites affectés	Inondation éclairée	
10 au 11 Novembre 2001	Bab El Oued (Alger)	772 morts, 115 disparus et des dégâts matériels estimés à 24 milliards DZD.	Inondation éclairée	
01 et 02 Octobre 2008	Ghardaïa	34 morts, des dizaines de blessés et de sinistrés, des centaines de maisons ont été détruites, de nombreuses routes ont été coupées et les liaisons téléphoniques ont été très perturbées. Les dégâts matériels ont été estimés à environ 2500 millions DZD, dont 2000 millions DZD pour les infrastructures.	Inondation éclairée	

L'inondation enregistrée le 10–11 Novembre 2001 à Bab El Oued, Alger et l'inondation enregistrée le 01–02 Octobre 2008, à Ghardaïa, demeurent les plus dévastatrices enregistrées ces dernières années (Figure 1.7). Elles ont causé des milliers de morts et ont traumatisé l'opinion publique (Abdi et Meddi 2020b). En conséquence, plusieurs dispositions ont été prises pour endiguer et faire face à ces catastrophes naturelles, des études complètes sont lancées pour permettre de déterminer les risques liés aux mouvements des terres, l'écoulement des eaux, de dégager des solutions permettant de canaliser et/ou retenir les eaux de pluies en cas de fortes précipitations (Djellouli et Saci 2003).



Figure 1.7 Des photos qui témoignent des ravages des inondations : a) et b) de Bab El Oued (Alger) et c) et d) de oued Mzab (Ghardaïa)

1.4 La gestion des risques d'inondation

La gestion des risques est une activité fondamentale axée sur l'évaluation des dispositifs visant à réduire mais pas nécessairement à éliminer le risque global, car dans certains cas, le risque ne peut pas être entièrement éliminé (Pilon 2002; Schanze 2006). Toutefois, les stratégies de gestion des risques d'inondation sont connues pour avoir échoué dans le passé, en raison de négligence de la perception publique des risques d'inondation et des informations sur les risques d'inondation comme l'a souligné Bradford et al. (2012). En effet, la manière dont le public perçoit le risque est complexe et fortement influencée par des facteurs situationnels et cognitifs.

Dans un sens large, la gestion des risques d'inondation comprend la planification des activités visant à réduire le risque d'inondation. Cette planification peut être orientée vers une optimisation ou une amélioration des systèmes existants dans le but de se préparer à une inondation et de minimiser ses impacts négatifs ou de mettre en place un système nouveau ou modifié. Le système en question n'est pas nécessairement un système structurel. En effet, l'installation d'un système d'alerte précoce basé sur des prévisions météorologiques et hydrologiques pourrait également réduire les risques d'inondation à différents niveaux (Schumann 2011).

1.4.1 Les déterminants du risque d'inondation

Le risque d'inondation est généralement défini comme une fonction de l'aléa – la probabilité d'un événement d'inondation; l'exposition – la population et les biens soumis aux inondations; et la vulnérabilité – la capacité d'une société à faire face à l'événement (Dilley et al. 2005; Koks et al. 2015). La gestion des risques d'inondation couvre les actions avant, pendant et après l'inondation (Bringas 2016). Plate (2002) distingue trois parties dans les évaluations des risques d'inondation comme l'indique la Figure 1.8.

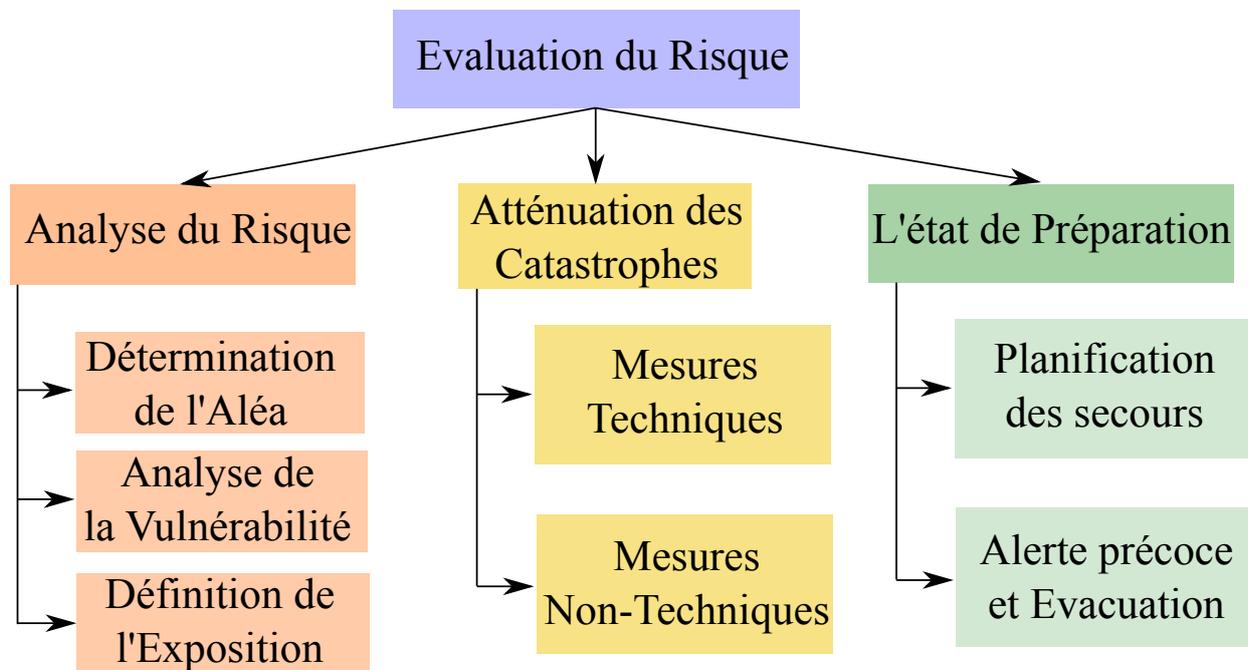


Figure 1.8 Planification de projet dans le cadre de la gestion des risques adaptée de Plate (2002)

Du fait de son importance primordiale, La gestion des risques d'inondation a suscité l'intérêt politique de plusieurs nations, notamment ceux de l'Union européenne (EU) où il est devenu un point de l'agenda politique en raison des graves inondations en Europe au tournant du siècle. En 2007, l'EU a publié une directive européenne sur les inondations (Commission Européenne 2007), visant l'évaluation et la gestion du risque d'inondation dans le but de réduire leurs conséquences néfastes. De même, le gouvernement Algérien a mis en place un

dispositif pour la prévention des risques majeurs et la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable⁶.

1.4.2 Le rôle des systèmes de prévision des crues

La prévision des crues est un élément nécessaire pour toute stratégie de gestion des crues, étant donné qu'aucune mesure de prévention ou de protection ne peut être totalement efficace. Un système de prévision des crues fournit l'environnement opérationnel dans lequel les modèles de prévision des crues peuvent être utilisés. Ces modèles dépendent des prévisions hydrologiques et météorologiques (Schumann 2011).

En effet, les informations hydrologiques jouent un rôle majeur dans la gestion des risques d'inondation et la prévision des crues (Plate 2009). Elles permettent de spécifier les mesures d'atténuation des catastrophes en fonction de leur efficacité et des risques restants. Toutefois, l'information hydrologique ne sera jamais complète en raison de la complexité des systèmes et phénomènes étudiés. Cependant, le risque d'inondation change dans le temps d'une manière incertaine, par conséquent, une actualisation de l'information doit se faire de façon périodique.

Selon Braud et al. (2018), une chaîne de prévision des crues à l'exutoire d'un bassin versant contient plusieurs modules comme suit :

- Un module qui fournit une estimation des précipitations observées et futures (modèle climatique)
- Un modèle hydrologique qui transforme les entrées pluviométrique en débit à l'exutoire du bassin versant après calage (les modèles pluie-débits seront abordé en détail dans le Chapitre 2).
- Une application en temps réel, où le modèle hydrologique est alimenté par les précipitations historiques et prévues pour simuler les débits sur une échéance. Ces simulations peuvent être régulièrement mises à jour, permettant ainsi d'affiner la prévision.
- Ces simulations sont analysées et le service de prévision des crues afin de déterminer s'il est nécessaire d'émettre une alerte, par exemple, si les prévisions envisagent un dépassement de seuils d'alerte prédéfinis.

Des efforts dans ce sens ont été faits au cours des dernières décennies où des systèmes de prévision des crues sont opérationnels dans plusieurs pays, dont certains sont cités dans le Tableau 1.3. Ces systèmes ont prouvé à maintes reprises leur utilité dans la gestion des risques des inondations et ont pris forme après des ravages dus aux inondations.

À titre d'exemple, le système européen de prévision des inondations (EFAS) a été développé par le JRC-ISPRA⁷, sous l'autorité de la Commission européenne. Il a été lancé après les crues de l'Elbe⁸ et du Danube⁹ en 2002, dont l'objectif était de disposer d'un outil commun au

⁶ <https://www.interieur.gov.dz/index.php/fr/dossiers/466-gestion-de-risques-majeurs.html>

⁷ The Joint Research Centre : le centre commun de recherche européen situé à Ispra en Italie

⁸ Un fleuve d'Europe centrale qui prend sa source en Tchéquie, après un parcours situé en majeure partie en Allemagne, se jette dans la mer du Nord.

niveau européen afin d'améliorer l'anticipation des crues, notamment pour les fleuves transfrontaliers et ainsi contourner l'hétérogénéité des outils nationaux de prévision des crues (Braud et al. 2018). Cette chaîne de prévision hydrométéorologique est basée sur le modèle hydrologique LISFLOOD (Thielen et al. 2009), fonctionnant avec les prévisions météorologiques du Centre Européen et du Centre Météorologique Allemand. L'étude menée sur l'événement de septembre 2002 dans le Gard (Younis et al. 2008) a mis en évidence plusieurs zones avec un maximum niveau de risque sur échéance de 36h.

Tableau 1.3 Exemples de systèmes de prévision des crues à l'échelle nationale ou régionale

Pays ou région	Abréviation	Système	Référence
Australie	AIFS	Australian Integrated Forecast System - flood forecasting component	(Elliott et al. 2005)
Bangladesh		National Flood Forecasting and Response System	http://www.ffwc.gov.bd (Paudyal 2002)
Amérique Centrale	CAFFG	Central America Flash Flood Guidance system	(Sperflage et al. 2004)
Chine	NISFCDR	National Information System for Flood Control and Drought Relief	(Sun et al. 2012)
Finlande	WSFS	Watershed Simulation and Forecasting System	(Vehviläinen et Huttunen 2001)
Norvège		National Flood Forecasting Service	https://www.varsom.no/en (Krøgli et al. 2018)
Royaume Unis	NFFS/FEWS	National Flood Forecasting System (England & Wales) and FEWS (Scotland)	(Werner et al. 2009)
Etats Unis	AHPS	Advanced Hydrological Prediction Service	https://www.nws.noaa.gov/oh/ahps (McEnery et al. 2005)
Europe	EFAS	the European Flood Awareness System	https://www.efas.eu (Thielen et al. 2009)
France	SCHAPI	Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations	https://www.vigicrues.gouv.fr (Viatgé et al. 2019)
Malaisie	NaFFWS	National Flood Forecasting and Warning System	(Azad et al. 2020)

1.4.3 Le processus d'alerte aux inondations

Une alerte est considérée réussite si elle lance une action qui empêche une inondation qui aurait autrement pu se produire en l'absence de cette alerte; par exemple en déclenchant la fermeture d'une barrière contre les marées, ou l'installation d'une défense temporaire (cf. section 1.4.4).

Selon Sene (2008), la tâche d'alerte aux inondations peut se résumer à fournir des réponses appropriées aux cinq questions suivantes :

- Quelle sera la hauteur de l'inondation et quand?
- Où l'eau ira-t-elle à la lame prévue?

⁹ Le deuxième cours d'eau d'Europe par la longueur et le plus long de l'Union européenne. Il prend sa source en Allemagne et se jette dans la mer Noire, aux environs de la frontière entre la Roumanie et l'Ukraine.

- Qui sera affecté par les inondations?
- De quelles informations et conseils les personnes affectées par les inondations ont-elles besoin pour réagir efficacement?
- Comment informer au mieux les personnes affectées par les inondations ?

L'une des premières réussites des systèmes d'alerte précoce est celle du Bangladesh (World Meteorological Organization 2006). Le système mis en place a conduit à une réduction significative du nombre de victimes des cyclones tropicaux, des ondes de tempête, des marées et des inondations fluviales. De même, les systèmes de prévision et d'alerte des inondations ont également permis de réduire considérablement le nombre de victimes en Chine ces dernières années (Sene 2008; Sun et al. 2012).

1.4.4 La réponse d'urgence

La réponse d'urgence est le processus de réponse à un événement d'inondation, idéalement sur la base d'une alerte d'inondation reçue. Dans de nombreux pays, il existe une séparation des responsabilités entre le service d'alerte et de prévision des inondations et les intervenants d'urgence tels que les forces de l'ordre (police, gendarmerie et armée), la protection civile (pompiers) et les autorités locales. Cependant, l'organisation d'un service d'alerte aux crues peut varier considérablement d'un pays à un autre ; allant de pays avec des alertes émises par le service météorologique à des autorités côtières et locales dans d'autres (Schanze 2006; Sene 2008). En outre, des systèmes développés par le secteur privé fonctionnent également dans certains pays, avec des applications allant des systèmes d'alerte communautaires aux systèmes exploités par les propriétaires d'infrastructures majeures telles que les chemins de fer et les projets hydroélectriques (Sene 2008). Lors d'une inondation, des mesures citoyennes peuvent être entreprises pour réduire les dommages causés par les inondations (Par exemple, l'utilisation de sacs de sable, panneaux anti inondations...etc.).

En Algérie, des plans d'organisation de la réponse de sécurité civile (ORSEC) sont prévus par la loi Algérienne¹⁰ afin de prévoir une intervention rapide et un déploiement efficace des secours, à l'instar d'autres pays. Toutefois, à maintes reprises, des échecs de ces plans ont été observés dans le monde (Bradford et al. 2012; Hadeid 2018), en raison de la nature soudaine et étendue des dégâts occasionnés par les inondations. Par conséquent, les décideurs doivent prendre des mesures pour aborder la gestion des risques de catastrophe grâce à des systèmes fiables de prévision des inondations pour répondre aux événements catastrophiques dus aux conditions météorologiques (Brocca et al. 2013).

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, après la définition des quelques concepts fondamentaux de l'hydrologie, nous nous sommes focalisés sur la problématique des inondations qui constitue un véritable fléau pour l'humanité et pour l'Algérie en particulier. En effet, les statistiques et les chiffres relatifs aux dégâts matériels et pertes humaines qui ont été rapportés témoignent de la dangerosité de cet aléa sur tous les plans (social, économique, santé...etc.).

¹⁰ Loi n° 04-20 du 13 Dhou El Kaada 1425 correspondant au 25 décembre 2004 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable.

Par conséquent, les techniques de gestion des risques des inondations ont été abordées en soulignant leur intérêt dans la réduction des impacts des inondations vu que ces dernières sont inévitables. En effet, Des réussites des systèmes de prévisions de crues ont été observées dans plusieurs régions dans le monde. De ce fait, ils constituent des outils incontournables permettant d'anticiper, avec différents degrés de succès, les risques d'inondation en lançant des alertes précoces et permettant ainsi la préparation des réponses d'urgences appropriés.

Les systèmes de prévision des inondations se composent de plusieurs modules dont ceux hydrologiques, et plus précisément les modèles pluie-débit, qui constituent le noyau des systèmes de prévision en simulant les débits à l'exutoire.

Ce chapitre vise à contextualiser le travail effectué dans la thèse qui cible les modèles pluie-débit. Le chapitre suivant sera consacré à l'état de l'art des modèles pluie-débit, leurs structures, leurs besoins en données, leurs types et leurs hypothèses...etc.

Chapitre 2

L'Etat de l'Art de la Modélisation Pluie-Débit à l'Echelle du Bassin Versant

— *Toute notre connaissance a son origine dans nos perceptions* — Léonard de Vinci

Notre compréhension des systèmes environnementaux et de ressources en eau est loin d'être complète en raison de leur complexité et les différentes interactions intrinsèques entre les processus. La modélisation mathématique de l'hydrologie des bassins versants est utilisée pour résoudre un large éventail de problèmes liés à ces systèmes (Singh et Woolhiser 2002). En effet, compte tenu l'importance croissante de la gestion des bassins versants au cours des dernières décennies et de la prise de conscience de l'impact des activités humaines sur l'environnement, il est nécessaire de renforcer la surveillance et la gestion des situations critiques telles que les inondations, qui nécessiteront toutes l'élaboration de modèles spécifiques de prévision en temps réel (Todini 1988; Singh 1997; Brocca et al. 2011).

Introduction

Ce chapitre présente un aperçu de l'état de l'art sur la modélisation hydrologique à l'échelle du bassin versant, une brève historique du développement des modèles de processus et celui des modèles de bassin versant ainsi que les concepts fondamentaux telle que le calage et la validation. De plus, les nouveaux développements des modèles hydrologiques de bassin versant. Ensuite, les problèmes d'échelles temporelles et spatiales seront abordés.

2.1 Généralité sur la modélisation hydrologique à l'échelle du bassin versant

Qu'est-ce que c'est qu'un modèle ? Pourquoi a-t-on besoin de ces modèles ?

Un modèle peut être défini comme étant une représentation mathématique simplifiée d'un phénomène physique complexe. À chaque étape de la modélisation des formulations mathématiques sont employées afin de représenter les phénomènes induits dans le processus hydrologique (Moradkhani et Sorooshian 2009). De ce fait, il s'agit d'une approximation d'un système réel (Xu 2002).

D'après Singh et Frevert (2005), les modèles mathématiques des bassins versants simulent les processus naturels de l'écoulement de l'eau, des sédiments, des produits chimiques, des nutriments et des organismes microbiens dans les bassins versants, et quantifient l'impact des activités humaines sur ces processus. En effet, les modèles mathématiques de l'hydrologie des bassins versants (également appelé modèles pluie-débit) sont utilisés dans un large éventail de domaines allant de la gestion des bassins versants à la conception technique. Ils sont utilisés dans la planification, la conception et l'exploitation de projets, pour conserver les ressources en eau et en sol et pour protéger leur qualité (Todini 1988; Singh et Woolhiser 2002; Singh et Frevert 2005; Donigian et Imhoff 2006; Le Moine et al. 2007).

Il y a plusieurs raisons pour lesquelles la modélisation hydrologique est utilisée. La raison principale résulte des limites des techniques permettant de mesurer ce que nous souhaiterions savoir sur les systèmes hydrologiques complexes. En fait, nous n'avons qu'une gamme limitée de mesures dans l'espace et dans le temps. De ce fait, Les modèles sont utilisés pour extrapoler les connaissances du système hydrologique à l'extrême, et des tentatives sont faites pour modéliser les effets à long terme des changements causés par l'homme sur l'environnement (Bergström 1991; Beven 2011; Gupta et al. 2014).

2.1.1 Brève historique du développement des composants des modèles pluie-débit

Les modèles pluie-débit ont été initialement utilisés en réponse à trois types de problèmes d'ingénierie; la conception des systèmes d'égouts urbains, des systèmes de drainage et des déversoirs (Todini 1988). Dans tous ces problèmes, l'intérêt s'est porté sur le débit de dimensionnement. En fait, la plupart des ingénieurs, au cours de la dernière partie du 19^{ème} siècle et au début du 20^{ème}, ont utilisé des formules empiriques, dérivées pour des cas particuliers et appliquées à d'autres cas en supposant que les conditions étaient assez similaires.

D'après Singh et Woolhiser (2002), l'origine de la modélisation mathématique remonte à la seconde moitié du 19^{ème} siècle lorsque Mulvany (1850) a développé la méthode rationnelle, qui est le modèle précurseur qui a été généralement connu, pour répondre au besoin de conception des systèmes d'égouts, auxquels elle fut et demeure largement appliquée (Kuichling 1889). La méthode rationnelle utilise le concept du temps de concentration pour estimer le débit de pointe, où l'écoulement peut être assimilé à un processus purement cinématique (Todini 2011), de sorte que le débit maximal induit d'une intensité de pluie donnée se produit lorsque la durée des précipitations est supérieure ou égale au temps de concentration. Des années plus tard, Sherman (1932) a introduit le concept de l'hydrogramme unitaire en se basant sur le principe de superposition des effets; il a permis la prédiction

complète de l'hydrogramme de crue pour des précipitations effectives à intervalles constants. L'introduction de l'hydrogramme unitaire marquera le début d'une ère notable dans la modélisation pluie-débit (O'Connell 1991). Toutefois, certaines difficultés demeuraient telle que la séparation du ruissellement de surface du débit de base, le calcul des précipitations effectives et la dérivation de l'hydrogramme unitaire (Todini 2007).

Des efforts furent déployés en parallèle pour surmonter ces difficultés et pour améliorer l'efficacité des composants des modèles pluie-débit. Autrement dit, les principaux mécanismes du cycle de l'eau telle que l'infiltration, l'écoulement souterrain et hypodermique, l'évapotranspiration et le routage, ont fait l'objet d'études approfondies.

2.1.1.1 les fonctions de productions

Parmi les premières tentatives de développer une théorie de l'infiltration, a été celle par Green et Ampt (1911), qui en simplifiant des principes physiques, ont dérivé une formule qui demeure populaire pour le calcul du taux de la capacité d'infiltration. Quelques années plus tard, Kostiaikov (1932) a développé une approche empirique pour l'estimation du taux de capacité d'infiltration. A peu près au même moment, Horton (1933) a développé une théorie d'infiltration et a contribué au développement des techniques de séparation des écoulements. Ces travaux ont donné naissance à un concept, qui a été largement repris par beaucoup de chercheurs (Par exemple, Pearce 1976; Verma 1982; Woolhiser et al. 1996; Van de Giesen et al. 2000), et qui a été introduit par Kirkby et Chorley (1967) sous le terme de "ruissellement Hortonien". En conséquence, Horton (1939, 1940) a développé une formule semi-empirique pour l'estimation du taux de la capacité d'infiltration, et a tenté de lui attribuer une signification physique. Quelques années plus tard, Philip (1957) a développé une formulation pour l'estimation du taux de la capacité d'infiltration, basée sur le concept de la sorptivité, et qui exprime en fait la solution de l'équation de Richards (1931) sous diverses hypothèses simplificatrices (Sadeghi et al. 2012; Hingray et al. 2015). Ces méthodes ont été utilisées pour le calcul de la pluie effective à partir du taux de la capacité d'infiltration. Ces approches sont communément appelées « fonctions de productions ».

Parallèlement aux travaux cités ci-dessus, la méthode "Soil Conservation Service–Curve Number (SCS–CN)" (SCS 1972) qui a été développée par l'USDA¹¹, et rebaptisée par la suite en "Natural Resources Conservation Service (NRCS)", permet l'estimation de la pluie effective (ou pluie nette) tout en considérant les pertes initiales (Hawkins et al. 1985). La méthode SCS-CN est très populaire et très utilisée de nos jours (Par exemple, Woodward et al. 2003; Shi et al. 2009; Soulis et al. 2009; Abdi et Meddi 2015). En outre, elle a suscité l'intérêt de plusieurs chercheurs, et a été sujette à plusieurs critiques et modifications (Par exemple, Mishra et Singh 2002; Michel et al. 2005; Mishra et al. 2006; Geetha et al. 2007; Verma et al. 2017; Abdi et Meddi 2020). La méthode SCS–CN sera abordée avec plus de détail dans le Chapitre 4.

2.1.1.2 les fonctions d'évapotranspiration

Les premiers travaux décrivant l'évaporation des lacs ont été réalisés par Richardson (1930) et Cummings (1936). Ils sont basés sur le rapport de Bowen qui représente le ratio des flux

¹¹ United States Department of Agriculture: Département de l'Agriculture des États-Unis.

d'énergies entre deux milieux humides sous forme de chaleur sensible et latente. En revanche, d'autres travaux ont été consacrés à l'évapotranspiration potentielle, qui est une composante très importante dans la modélisation pluie-débit. Penman (1948) et Thornthwaite (1948) ont été les pionniers dans le développement des modèles d'évapotranspiration. Par la suite, des modèles plus élaborés ont été développés tels que les modèles de : Penman–Monteith (1965), Priestley–Taylor (1972), Turc (1961) et Oudin et al. (2005). Ces modèles font partie intégrante de plusieurs modèles actuellement en service que ce soit pour la simulation ou la prévision.

2.1.1.3 les fonctions de transfert et de routage

Concernant les écoulements, deux catégories de travaux se sont parallèlement développées ; D'un côté, sur les méthodes de ruissellement, communément appelés "fonctions de transfert", qui ont pour objet de transformer les eaux souterraines, de subsurface et de surface produites dans les différentes parties du bassin versant en hydrogramme à l'exutoire du bassin. D'un autre côté, concernant les méthodes d'acheminement des débits, communément appelé les "fonctions de routage", et qui sont destinées à estimer la façon dont les débits se propagent dans les cours d'eau, les lacs et les barrages et en particulier l'évolution de la forme de l'hydrogramme de l'amont vers l'aval.

Pour les fonctions de transfert, l'approche de l'hydrogramme unitaire pour la prévision du débit fluvial est devenue l'un des outils les plus puissants de l'hydrologie appliquée. Selon Todini (2007), le concept de l'hydrogramme unitaire a introduit la notion de théorie des systèmes, et a ensuite été interprété comme la réponse d'un système stationnaire linéaire, causatif et dynamique. Il a cependant conservé un caractère empirique et aucune base théorique générale n'a été élaborée pour la méthode. De ce fait, des efforts furent employés pour explorer la théorie des systèmes linéaires, qui a conduit à la théorie de l'hydrogramme unitaire instantané de Nash (1957) et par la suite à la théorie de l'hydrogramme unitaire généralisée de Dooge (1959).

En revanche, l'intérêt s'est porté sur une approche plus physique du phénomène, notamment par la simplification des équations de Saint-Venant. Keulegan (1944) a étudié théoriquement l'écoulement de surface avec un apport spatialement varié sur un plan en pente, suggérant la simplification des équations à ce que l'on appelle maintenant la forme d'onde cinématique (Singh et Woolhiser 2002), et qui a été testé expérimentalement par Izzard (1944). Ce concept a été utilisé dans des modèles pluie-débit à l'échelle de bassin versant. En outre, Hayami (1951) a conceptuellement dérivé l'hydrogramme unitaire instantané à partir des équation de l'onde diffusive.

Concernant le routage des crues, Les modèles sont classés en modèles hydrauliques et hydrologiques. Les modèles hydrauliques nécessitent des mesures à la fois de la profondeur d'écoulement et du débit à l'aide d'un jaugeage élaboré du cours d'eau. Ces modèles, basés sur les équations de continuité et de mouvement, sont plus compliqués et difficiles à utiliser, mais ils reflètent plus précisément les conditions d'acheminement des crues. Les modèles hydrologiques, par contre, ne nécessitent que des mesures de débit, car les paramètres du modèle sont supposés capturer les caractéristiques globales de propagation des crues (Easa 2015a, b).

Parmi les premiers modèles hydrologiques, la méthode de Muskingum, demeure très populaire depuis qu'elle a été développée par McCarthy (1938), consiste en une forme globale de l'équation de continuité avec une relation linéaire « stockage-débit » du bief considéré (Chow 1959; Singh et McCann 1980). Elle est largement utilisée dans les modèles fonctionnels en raison de sa simplicité. Cependant, elle a été sujette à des investigations et à des modifications par plusieurs auteurs (Par exemple, Gill 1977, 1978; Ponce 1979). Par la suite, Cunge (1969) a réalisé que la méthode Muskingum et le modèle d'onde cinématique partageaient la même base théorique. De ce fait, il a proposé la méthode Muskingum-Cunge qui améliore la méthode classique de Muskingum en liant la aux propriétés de l'équation d'onde diffusive. De cette manière, Cunge (1969) a pu relier les paramètres de routage de la méthode aux caractéristiques géométriques et hydrauliques du tronçon considéré (Hingray et al. 2015). Plus récemment, Perumal et Price (2013) ont proposé une méthode à base physique de la méthode Muskingum à paramètres variables (VPMM) développée à partir des équations complètes de Saint-Venant qui régissent la propagation unidimensionnelle des ondes de crue dans les canaux. En outre, des travaux de recherche qui prennent en considération le débit latéral dans le routage ont été menés par certains auteurs à l'instar de Yadav et al. (2015) et Zhang et al. (2016).

Les modèles hydrauliques consistent à la résolution mathématique de l'équation de Saint-Venant ou de ces approximations tels que l'équation de l'onde cinématique et de l'onde diffusive par diverses méthodes numériques (Moramarco et al. 2008; Roohi et al. 2020). La grande limitation de ces méthodes consistent en leurs besoins restrictifs (par exemple, les méthodes sont applicables pour des canaux prismatiques).

2.1.1.4 les fonctions des écoulements souterrains

La phase souterraine du cycle hydrologique constitue une composante essentielle pour l'appréhension de la genèse du ruissellement. Plusieurs auteurs se sont, de ce fait, intéressés à l'étude de l'écoulement souterrain conduisant au développement de techniques de séparation des hydrogrammes ainsi qu'à des techniques de quantification hydrodynamiques.

L'essence de la séparation des hydrogrammes est traditionnellement considérée comme une justification déconstructive de l'écoulement en tant que processus à deux ou à plusieurs composants (Mei et Anagnostou 2015). Le schéma le plus couramment utilisé est le scénario à deux composantes qui considère l'écoulement fluvial consistant en un écoulement direct (c'est-à-dire un écoulement rapide de surface ou hypodermique) et un débit de base (c'est-à-dire un écoulement provenant du stockage des eaux souterraines ou d'une autre source retardée) (Tallaksen 1995). L'écoulement direct est en général formé par les précipitations de surface, le ruissellement de surface (c'est-à-dire l'excès d'infiltration ou l'excès de saturation), l'écoulement hypodermique (c'est-à-dire l'écoulement souterrain peu profond) et l'écoulement rapide des eaux souterraines, tandis que le débit de base est l'écoulement relativement stable entre les orages et comprend les contributions des eaux souterraines (Mei et Anagnostou 2015).

Hursh et Brater (1941) ont été les premiers à quantifier le rôle des écoulements souterrains au sens strict dans un bassin versant. Plus tard, Hoover et Hursh (1943) ont montré que la

profondeur du sol, la topographie et les caractéristiques hydrologiques associées à différentes altitudes influençaient le débit maximal (Weiler et al. 2006).

Plusieurs techniques de séparation du débit de base ont été développées, qui sont classées en différents types en fonction de critères sélectionnés, tels que la méthode basée sur les traceurs, la méthode graphique, la méthode de filtrage, le filtre numérique et l'analyse de la récession (Tallaksen 1995; Eckhardt 2005; Mei et Anagnostou 2015; Dahak et Boutaghane 2019).

Parmi les différentes méthodes, la méthode à base de traceurs donne les résultats les plus réalistes; cependant, elle est laborieuse et coûteuse; son application est donc limitée à un petit nombre d'événements. La méthode graphique est la plus intuitive (Chow et al. 1988), mais elle est basée sur des hypothèses empiriques. Une autre technique est la méthode de filtrage qui est généralement désignée pour les enregistrements de données à long terme, à échelle de temps quotidienne.

2.1.2 Le Développement des modèles pluie-débit à l'échelle du bassin versant

Un modèle de bassin versant simule des processus hydrologiques dans une approche plus holistique par rapport à de nombreux autres modèles qui se concentrent principalement sur des processus individuels ou des processus multiples à une échelle relativement petite. La seconde moitié du 20^{ème} siècle a connu une révolution numérique qui a rendu possible l'intégration de modèles de différentes composantes du cycle hydrologique et la simulation de pratiquement tout le bassin versant (Singh et Frevert 2002; Singh et Woolhiser 2002). La nécessité de tels modèles découle des exigences suivantes: (1) étendre l'utilisation du modèle à de longs enregistrements continus en évitant la complexité du ruissellement pluvial et de la séparation du débit de base; (2) appliquer le modèle à des bassins versants complexes avec une grande variété de sols, de végétation, de pentes, ...etc. : et (3) étendre le modèle plus ou moins sans calage à d'autres bassins versants similaires (Todini 1988). De ce fait, une combinaison des différents sous-modèles est établit afin de représenter le comportement des différentes composantes du cycle hydrologique. Le modèle du bassin versant de Stanford (SWM) a été l'un des premiers programmes de ce type, développé par Crawford et Linsley (1966) pour remplacer les calculs manuels fastidieux effectués par les hydrologues de l'époque, pour prédire le débit, compte tenu des précipitations observées (et d'autres variables météorologiques) à des échelles de temps courtes par rapport à la pratique conventionnelle (Donigian et Imhoff 2006). Parallèlement, d'autres modèles moins complets ont été développés tel que le modèle de Dawdy et O'Donnell (1965). De même, les modèle réservoir développés par Sugawara (1969, 1974) permettent d'effectuer une approche semi-distribuées capable de prendre en compte la variabilité spatiale des processus hydrologiques au sein du bassin versant. En effet, une prolifération de modèles hydrologiques des bassins versants a eu lieu depuis le développement de ces premiers modèles, avec un intérêt particulier pour les modèles à base physique (Singh et Woolhiser 2002) qui permettent de décrire d'une manière plus précise les composantes du cycle hydrologique. Parmi ces modèles figurent le modèle Système Hydrologique Européen (SHE) (Abbott et al. 1986a, b) et le modèle TOPMODEL (Beven et Kirkby 1979), qui ont connu certaines améliorations et des extensions ultérieurement (Singh et Frevert 2005).

2.2 La classification des modèles pluie-débit

La littérature scientifique regorge d'une multitude de modèles hydrologiques de bassin versant qui diffèrent selon leurs approches mathématiques, conceptions et objectifs. De ce fait, les classifications de modèles que l'on peut trouver sont nombreuses comme l'ont souligné plusieurs auteurs (Par exemple, Refsgaard et Knudsen 1996; Perrin 2000; Oudin 2004;...etc.). Par exemple, Clarke (1973) a divisé les modèles hydrologiques en modèles stochastiques et modèles déterministes, et qui peuvent également être divisés en modèles conceptuels et modèles empiriques. Tandis que Chow et al. (1988) ont divisé les modèles hydrologiques en deux catégories: les modèles physiques et les modèles abstraits.

Le choix des différentes classes de modèles est basé sur des critères subjectifs pour chaque auteur. Becker et Serban (1990), dans le rapport de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) traitant des modèles hydrologiques pour la conception et le fonctionnement des systèmes de ressources en eau, ont proposé une classification basée sur les critères suivants : (1) l'objet de l'application du modèle; (2) le type de système à modéliser; (3) le processus hydrologique ou variable connexe (critère, composant) à prendre en considération; (4) le degré de causalité du processus; (5) la discrétisation nécessaire dans le temps et dans l'espace. Cependant, Singh (1995) a proposé de classer les modèles hydrologiques sur la base de : (1) la description du processus; (2) l'échelle temporelle; (3) l'échelle spatiale; (4) les techniques de solution; (5) l'utilisation des terres; et (6) l'utilisation du modèle. Plus récemment, Daniel et al. (2011) ont noté que les principales caractéristiques permettant de distinguer les approches de modélisation à l'échelle des bassins versants comprennent la nature du modèle mathématique sous-jacent, le degré d'abstraction des modèles et la description du processus hydrologique et la représentation spatiale. Sur la base de ces informations, une classification a été proposée dans la Figure 2.1.

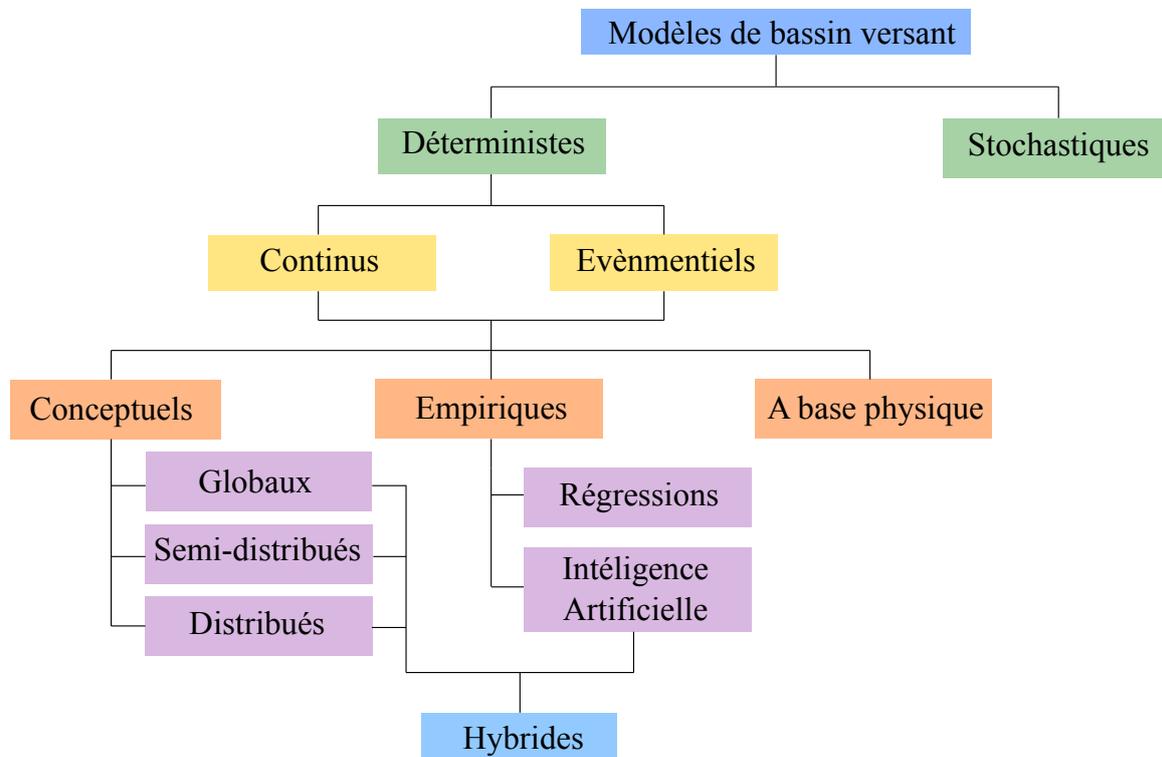


Figure 2.1 Classification des modèles pluie-débit et leurs interactions

Le premier niveau de classification s'intéresse aux techniques impliquées dans le processus de modélisation, où on peut distinguer les modèles déterministes et les modèles stochastiques. Les modèles déterministes ne tiennent pas compte du caractère aléatoire; une entrée donnée produit toujours la même sortie grâce à des relations mathématiques bien établies. Les modèles stochastiques ont des sorties qui sont au moins partiellement aléatoires; la plupart des entrées ou paramètres sont des variables aléatoires représentés par des distributions statistiques (Lee et al. 2001). On pourrait dire que les modèles déterministes font des prévisions tandis que les modèles stochastiques font des prédictions (Chow et al. 1988).

Les modèles déterministes peuvent être subdivisés en trois catégories sur la base du degré d'abstraction : modèles à base physique, modèles conceptuelles et modèles empiriques. Les modèles empiriques consistent en des fonctions mathématiques utilisées pour ajuster les données disponibles. Ces modèles couvrent une gamme de complexité, des modèles de régression simples aux modèles basés sur l'hydro-informatique, appelés modèles à boîte noire, qui utilisent des méthodes d'intelligence artificielle telle que les réseaux de neurones artificiels (RNA), la logique floue, les algorithmes génétiques (AG) et recuit simulé...etc.

Les modèles conceptuels sont une représentation (conceptualisation) mathématique simplifiée d'un système complexe à l'aide d'un certain nombre de réservoirs interconnectés utilisés pour représenter différents composants du processus hydrologique par recharge et épuisement. Un grand nombre de modèles conceptuels a été proposé dans la littérature scientifique, incluant le modèle Sacramento (Burnash et al. 1973), le modèle HBV, (Bergström 1991, 1992, 1995), le modèle réservoir (Tank model) (Sugawara 1969, 1974), le modèle Xinanjiang (Zhao et Liu 1995), et les modèles de la famille GR (Perrin et al. 2001, 2003; Mouelhi 2003),...etc.

Les modèles à base physique représentent différents processus hydrologiques à travers des équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. Des méthodes numériques sont généralement utilisées pour résoudre les équations aux dérivées partielles régissant ces modèles comme les équations de Saint-Venant pour l'écoulement de surface, l'équation de Richards pour l'écoulement de zone non saturée, l'équation de Penman-Monteith pour l'évapotranspiration et l'équation de Boussinesq pour l'écoulement souterrain (Daniel et al. 2011). Les modèles physiques sont capables de prendre en compte la variabilité spatiale de l'utilisation des terres, de la pente, du sol et du climat pour faire face aux processus hydrologiques dans le bassin versant semi-ou entièrement distribués dans la nature (Jaiswal et al. 2020). Toutefois, les besoins en données et calculs sont énormes pour ces modèles.

Les modèles de bassins versants peuvent en outre être classés sur une base spatiale en tant que modèles globaux, semi-distribués ou distribués. L'approche globale considère un bassin versant comme une unité unique pour les calculs où les paramètres et les variables du bassin versant sont moyennés sur cette unité. Cependant, les modèles semi-distribués et distribués tiennent compte de la variabilité spatiale des processus hydrologiques, des apports, des conditions aux limites et des caractéristiques des bassins versants.

Les modèles de bassins versants peuvent être subdivisés en deux catégories principales basées sur la représentation temporelle: les modèles continus et les modèles événementiels (Brocca et al. 2008, 2011). Les modèles continus sont capable d'évaluer l'humidité du sol au début d'un

événement pluvieux (Tramblay et al. 2010; Massari et al. 2014b). Cependant, ils nécessitent des séries chronologiques ininterrompues et à long terme pour constituer les données d'entrée; cela constitue la limitation majeure de leur application dans certaines régions où ces données ne sont pas disponibles, en plus du fait que la prise en compte des étiages et des crues implique plus de processus hydrologiques et nécessitent ainsi plus de paramètres. Les modèles événementiels sont plus souvent utilisés que les modèles continus pour les applications en temps réel, en particulier où les approches continues ne sont pas applicables en raison de manque de données (Chahinian et al. 2005; Berthet et al. 2009). Ils nécessitent des données à l'échelle des événements, ce qui simplifie leur calage. Cependant, les modèles événementiels impliquent des paramètres supplémentaires pour évaluer les conditions d'humidité initiales de chaque événement (Chang et al. 2017).

Les récentes évolutions en informatique ont permis l'introduction de la modélisation hybride afin d'améliorer les inconvénients des techniques de modélisation susmentionnées. En effet, les modèles hybrides ont été développés pour combiner les atouts des modèles fondés sur des données et des modèles conceptuels et offrent des possibilités de traiter des problèmes associés à un manque de compréhension physique du processus hydrologique complexe (Nourani et al. 2014; Maysara et al. 2020). Par exemple, Song et al. (2012) ont développé un modèle hybride basé sur le couplage du modèle Xinanjiang et RNA, dont les résultats étaient prometteurs dans une modélisation événementielle. Humphrey et al. (2016) ont intégré les sorties d'un modèle conceptuel dans un modèle RNA bayésien ce qui a amélioré la prévision mensuelle du débit.

2.3 Inventaire des modèles de bassin versant

Au cours de ces 40 dernières années, la révolution numérique et l'augmentation fulgurante de la puissance des ordinateurs ont conduit à un progrès important de l'hydrologie des bassins versants à un rythme sans précédent. En effet, de nombreux modèles mathématiques ont été développés non seulement pour la simulation de l'hydrologie des bassins versants, mais aussi pour leurs applications dans d'autres domaines, comme la gestion de l'environnement et des écosystèmes. De plus, le développement de nouveaux modèles ou l'amélioration de modèles existants se poursuit aujourd'hui.

En 1991, L'USBR¹² a préparé un inventaire de 64 modèles hydrologiques de bassin versant montrant le niveau des activités de modélisation au cours des dernières décennies (Singh et Frevert 2005; Gasmelseid 2010). De même, de nombreux modèles ont été reportés par Burton (1993) et Singh (1995). Singh et Woolhiser (2002) ont fournis également un inventaire des modèles hydrologiques de bassins versant qui sont couramment utilisés pour des fins pratiques. Une liste non exhaustive des modèles les plus populaires est présentée dans le Tableau 2.1.

Le grand nombre des modèles hydrologiques s'explique par l'intérêt de la communauté scientifique et des services techniques à appréhender d'avantage les processus hydrologiques et à améliorer la qualité des résultats.

¹² United States Bureau of Reclamation : C'est un organisme relevant du département de l'Intérieur des États-Unis qui supervise la gestion des ressources en eau.

Tableau 2.1 : Echantillon de quelques modèles populaires

Nom du modèle/sigle	Auteurs	Remarques
Stanford watershed Model (SWM)	Crawford et Linsley (1966)	Modèle de simulation de processus hydrologiques, hydrauliques et de qualité de l'eau, continu.
Hydrologic Engineering Center—Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)	Feldman (2000)	Modèle de simulation, évènementiel, à base physique et/ou conceptuel, semi-distribué.
Le modèle réservoir (Tank model)	Sugawara (1969, 1974)	Modèle de simulation, conceptuel, semi-distribué ou global, continu.
Le model de Xinanjiang	Zhao et Liu (1995)	Modèle de simulation, conceptuel, global, continu.
Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning model (HBV)	(Bergström 1991, 1992, 1995)	Modèle de simulation, conceptuel, global, continu.
Système Hydrologique Européen (SHE)	(Abbott et al. 1986a, b)	Modèle de simulation, à base physique, distribué, continu
Topography based Hydrological Model (TOPMODEL)	(Beven et Kirkby 1979)	Modèle de simulation, à base physique, distribué, continu
Soil Water Assessment Tool (SWAT)	(Arnold et al. 1998)	Modèle de simulation, conceptuel, distribué, continu
Variable Infiltration Capacity model (VIC)	(Liang 1994) (Liang et al. 2003)	Modèle de simulation, semi-distribué, à base physique, continu.
Distributed Hydrological Model (HYDROTEL)	(Fortin et al. 1995)	Modèle de simulation, distribué, à base physique, continu.
National Weather service-River Forecast System (NWS-RFS)	(Burnash et al. 1973)	Modèle de prévision, conceptuel, global, continu.
Waterloo Flood System (WATFLOOD)	(Kouwen 1988)	Modèle de simulation, semi-distribué, continu.
Le modèle CEQUEAU	(Morin et al. 1975)	Modèle de simulation, distribué, continu.
Le modèle IHACRES	(Jakeman et Hornberger 1993) (Ye et al. 1997)	Modèle de simulation, conceptuel, global, continu.
Le modèle GR4J	(Perrin et al. 2001, 2003)	Modèle de simulation, conceptuel, global, journalier, continu.
Le modèle MORDOR	(Paquet 2004)	Modèle de Prévision, conceptuel, global, continu.
Simplified Hydrology (SIMHYD) model	(Chiew et al. 2002)	Modèle de simulation, conceptuel, global, journalier, continu.
University of British Columbia (UBC) model	(Quick et Pipes 1977)	Modèle de simulation, conceptuel, global, continu.
Le modèle ARNO	(Todini 1996)	Modèle de simulation, semi-distribué, continu.
Topographic Kinematic Approximation and Integration (TOPKAPI) model	(Todini 1995)	Modèle de simulation, distribué, à base physique, continu.

Le modèle HEC-HMS est considéré comme un modèle standard pour le secteur privé dans des projets de dimensionnement d'ouvrage d'assainissement ou de protection contre les inondations en raison de la simplicité et la convivialité de son interface. Cependant, chaque pays dispose de modèles populaires qui ont été testés et validés pour les conditions climatiques et hydrologiques du pays, et sont actuellement utilisés pour des fins pratiques telle que la simulation et la prévision. En effet, les modèles UBC, WATFLOOD, CEQUEAU et HYDROTEL sont très populaires au Canada, les modèles TOPMODEL et SHE sont largement acceptés et utilisés dans plusieurs pays européens, le modèle HBV est le modèle de référence pour la simulation dans les pays scandinaves, le modèle GR4J est très largement utilisé en France, les modèles ARNO et TOPKAPI sont populaire en Italie et le modèle Xinanjiang est le modèle de référence en Chine.

D'après Singh et Woolhiser (2002), aucun effort global n'a été mené pour comparer la plupart des principaux modèles hydrologique de bassin versant à l'exception de trois études parrainées par l'OMM. Cependant, des efforts ont été faits pour comparer les modèles de certains processus de composants. De plus, les développeurs de certains modèles ont comparé leurs modèles avec un ou quelques autres modèles. Par conséquent, pour le moment, aucun modèle ne peut être considéré comme un modèle standard dans le monde.

2.4 Le calage et la validation des modèles hydrologiques et incertitudes

2.4.1 Le calage

En terme général, les modèles hydrologiques, aussi sophistiqués et spatialement explicites, sont définis par des variables d'états qui définissent les dynamiques du système, et également de paramètres caractérisant le système lui-même. Par conséquent, le résultat de la simulation du modèle hydrologique est principalement déterminé par la qualité des paramètres du modèle (Moradkhani et Sorooshian 2009).

Le calage est un processus itératif dans lequel les paramètres du modèle sont ajustés de sorte que la réponse dynamique du modèle représente, aussi fidèlement que possible, la réponse cible observée (par exemple, l'hydrogramme observé) du bassin versant. Les performances du modèle pendant le calage dépendent de la quantité et de la qualité des données d'entrée et d'observation disponibles et aussi de la structure du modèle utilisé (Singh 1988; Gnouma 2006). Les paramètres de modèle peuvent être classés en tant que paramètres physiques et paramètres de processus. Les paramètres physiques représentent les caractéristiques physiques qui peuvent être mesurées directement à partir du bassin versant, comme la superficie du bassin versant et la nature du sol. Les paramètres de processus sont les caractéristiques physiques qui ne peuvent pas être mesurées à partir du bassin versant et qui doivent être étalonnées (Perrin 2000; Le Moine 2008).

Les méthodes de calage des paramètres du modèle peuvent être classées comme méthodes manuelles et automatiques. Le calage manuel est une procédure itérative effectuée par un hydrologue expert, impliquant des analyses complexes basées sur les connaissances pour faire correspondre les processus hydrologiques perçus dans le bassin versant avec leurs équivalents conceptuels représentés dans la structure du modèle (Yilmaz et al. 2010). Les méthodes automatisées de calage reposent sur une structure de modèle a priori, un algorithme d'optimisation et une ou plusieurs mesures mathématiques des performances du modèle

(souvent appelées fonctions objectives) pour estimer les paramètres du modèle (Madsen 2000; Duan et al. 2006; Fowler et al. 2018; Althoff et al. 2022). Les avantages de l'approche automatisée reposent dans le fait que ces méthodes utilisent des mesures objectives, plutôt que visuelles et subjectives, pour l'évaluation des performances, et exploitent la puissance des ordinateurs pour rechercher efficacement et systématiquement l'espace réalisable de paramètres du modèle. Cependant, les algorithmes de calage automatique peuvent, s'ils ne sont pas correctement conçus, renvoyer des valeurs des paramètres du modèle qui sont jugés irréalistes sur le plan hydrologique (Madsen 2000; Moussa et Chahinian 2009; Yilmaz et al. 2010; Seong et al. 2015; Tigkas et al. 2016). Par conséquent, l'utilisation d'un algorithme d'optimisation puissant devient une exigence majeure pour assurer la recherche d'ensembles de paramètres qui correspondent le mieux aux données (Duan et al. 2006).

Les algorithmes d'optimisation explorent de manière itérative la surface de réponse (une surface cartographiée par les valeurs de fonction objective dans l'espace des paramètres) pour trouver le jeu de paramètres optimal. De nombreuses méthodes sont disponibles dans la littérature scientifique pour déterminer les paramètres optimaux telle que les méthodes de recherche directe et les méthodes à gradient (Sorooshian et al. 1983; Yilmaz et al. 2010; Reed et al. 2013).

Les méthodes à gradient impliquent l'évaluation de la première et/ou la deuxième dérivée de la fonction objective par rapport à chaque paramètre de modèle. Les méthodes de type Newton, telles que la famille d'algorithmes Gauss-Newton, sont des exemples d'algorithmes de dérivées secondes (Yilmaz et al. 2010; Cerdà et al. 2016; Yang et al. 2018). Les méthodes de recherche directe utilisent uniquement les valeurs de la fonction objective sans calculer les dérivées de la surface de réponse par rapport à chaque paramètre. Les méthodes de recherche directe les plus populaires sont la méthode Simplex (Nelder et Mead 1965), la méthode Pattern Search Method (Hooke et Jeeves 1961) et la méthode de Rosenbrock (Rosenbrock 1960). Cependant, les deux catégories susmentionnées, dont certaines sont analytiquement exigeantes, dépendent fortement des valeurs initiales des paramètres et sont susceptibles d'être piégés dans des optima locaux autour du premier minimum relatif atteint (Blasone et al. 2006; Goswami et O'CONNOR 2007). Par conséquent, pour surmonter cette contrainte majeure, des méthodes d'optimisation globale ont été développées. Dans cette approche, les algorithmes de recherche directe sont lancés séquentiellement à partir de chaque point d'un grand échantillon de points dans l'espace des paramètres réalisables, chacun visant à atteindre l'optimum, réduisant ainsi le risque de converger vers un optima local (Duan et al. 1993, 2006; Reed et al. 2013). Des exemples d'algorithmes d'optimisation globale appliqués au calage des modèles de bassin versant comprennent la méthode de recherche aléatoire, la méthode de recherche aléatoire adaptative, la méthode de recherche aléatoire adaptative couplée à des méthodes de recherche locale directe, la méthode de recherche aléatoire contrôlée, le recuit simulé, la méthode simplex à multi-démarrages, la méthode d'essaim de particules et les algorithmes génétiques...Etc. (Franchini 1996; Yilmaz et al. 2010; Yang et al. 2018).

Toutefois, malgré la sophistication des techniques employées, l'identification d'un unique ensemble de paramètre reste assez délicate. En effet, Beven et Binley (1992) ont introduit le concept de « l'équifinalité » des paramètres, qui est la constatation que différents jeux de

paramètres peuvent produire des valeurs très similaires de la fonction objective, même pour la même structure de modèle, et que chacune de ces valeurs de fonction objective peut très bien être considérée comme acceptable dans la limite de précision impliquée.

En outre, le calage peut considérer une seule fonction objective à optimiser ou considérer plusieurs fonctions objectives (optimisation multi-objective) (Moussa et Chahinian 2009). Dans les problèmes d'optimisations multi-objectives, la solution ne sera pas, en général, un ensemble unique de paramètres mais consistera en ce que l'on appelle l'ensemble de solutions (front) de Pareto, selon différents compromis entre les différentes fonctions objectives. Cependant, le problème est généralement transformé en un problème d'optimisation mono-objectif en définissant un scalaire qui agrège les différentes fonctions objectives impliquées (Balascio et al. 1998; Madsen 2000; Chahinian et al. 2005; Moussa et Chahinian 2009; Reed et al. 2013; Yusuf et al. 2021).

2.4.2 La validation

Après le calage, la vérification de la reproductibilité des résultats par le modèle et la représentativité des paramètres calés doit être entamée. L'étape de validation a pour but de tester les performances du modèle calé en utilisant un échantillon de données qui n'a pas été utilisé lors du calage. En effet, le fait de considérer les résultats issus du calage comme étant un critère de performance prédictive d'un modèle constitue une erreur fondamentale car, souvent on observe une dégradation des performances lorsqu'on utilise un échantillon de données indépendantes (Refsgaard et Knudsen 1996; Refsgaard 1997; Perrin et al. 2007; Saadi et al. 2019).

La communauté scientifique s'est intéressée aux différentes stratégies pour le calage et la validation des modèles. L'un des principaux contributeur est Klemeš (1986) qui a proposé le schéma suivant comprenant quatre types de tests correspondant à différentes situations en ce qui concerne la disponibilité des données pour le calage et le fait de savoir si les conditions du bassin versant sont stationnaires ou si l'impact d'un certain type d'intervention doit être simulé (Varado 2004; Gnouma 2006) :

- Le test sur échantillon fractionné (split-sample test) est le test classique, applicable aux cas où les données sont suffisantes pour l'étalonnage et où les conditions du bassin versant sont stationnaires (Arsenault et al. 2018). Il consiste à diviser l'échantillon en deux périodes plus ou moins égales. Ensuite, l'une est utilisée pour la calibration et la seconde pour la validation. Le modèle est jugé acceptable s'il a des performances acceptables lors des deux périodes.
- Le test différentiel sur échantillon fractionné (Differential split-sample test) permet d'évaluer la performance du modèle face à des conditions climatiques ou géographiques différentes que celles utilisées lors du calage (Refsgaard et Storm 1996; Motavita et al. 2019). Le test peut avoir plusieurs variantes selon la nature spécifique de l'étude de modélisation, et consiste à utiliser deux périodes de données avec des conditions hydrologiques indépendantes et différentes. Si, par exemple, pour une simulation de l'effet d'un changement climatique, le test doit avoir la forme suivante : Deux périodes avec des valeurs différentes des variables climatiques d'intérêt doivent être identifiées dans l'enregistrement historique, par exemple, l'une avec des précipitations moyennes élevées et

l'autre avec des précipitations moyennes faibles. En général, le modèle doit démontrer une capacité à fonctionner dans le cadre du régime de transition requis (Klemeš 1986; Motavita et al. 2019).

- Le test proxy-bassin (proxy-basin test) est un test qui permet de vérifier la transposabilité géographique d'un modèle et peut également être utilisé lorsqu'il n'y a pas suffisamment de données pour un calage du bassin versant en question (Donmez et al. 2021). Si, par exemple, l'écoulement doit être prédit dans un bassin versant Z non jaugé, deux bassins jaugés X et Y dans la région doivent être sélectionnés. Le modèle doit être calé sur le bassin X et validé sur le bassin Y et vice versa. Si les deux résultats de validation sont acceptables et similaires, le modèle peut avoir un niveau de crédibilité de sa capacité à simuler correctement l'écoulement dans le bassin versant Z (Klemeš 1983).
- Le différentiel sur échantillon fractionné proxy-bassin (proxy-bassin differential split-sample test) est une combinaison des deux tests précédents (Refsgaard 1997). Il est appliqué dans les cas où le modèle est supposé être transposable à la fois géographiquement et climatiquement (ou en fonction de l'utilisation des terres). De plus, il traite des cas où il n'y a pas de données disponibles pour le calage et où le modèle est orienté vers la prédiction des conditions non stationnaires. Un exemple de cas nécessitant un tel test est la simulation des conditions hydrologiques pour une période future avec un changement de climat et pour un bassin versant, où aucune donnée de calage n'est disponible (Varado 2004).

Selon Refsgaard (1997), les types de tests proposés par Klemeš (1986) sont très généraux et doivent être traduits en tests spécifiques dans chaque cas en fonction de la disponibilité des données, du régime hydrologique et du but de l'étude de modélisation.

2.4.3 Les incertitudes

Les modèles hydrologiques sont des approximations imparfaites d'un système physique complexe, de ce fait, il faut s'attendre à ce que plusieurs sources d'erreur, d'imprécision et d'incertitude peuvent affecter les résultats de la simulation (Shrestha et Solomatine 2008). Walker et al. (2003) ont catégorisé la nature de l'incertitude en incertitude épistémique, due à une connaissance imparfaite, et en incertitude stochastique, due à la variabilité inhérente telle que la variabilité climatique. La Figure 2.2 explique la notion d'incertitude d'un modèle.

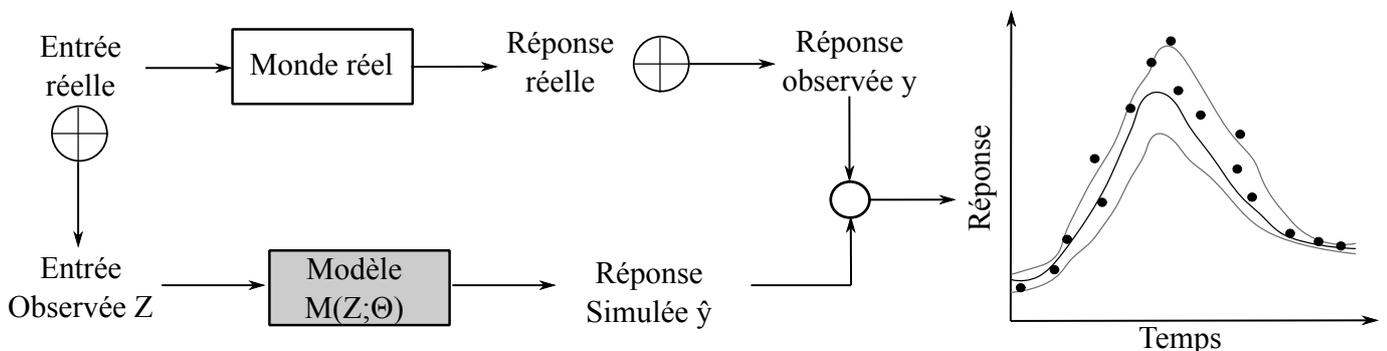


Figure 2.2 Schéma synoptique de la prédiction d'un modèle avec les intervalles d'incertitude (adoptée de Gupta et al. (2005)).

Quant aux sources d'incertitude, Refsgaard et Storm (1996) ont identifié quatre sources importantes d'incertitudes liées à nos capacités de compréhension et de mesure concernant le système réel étudié :

(a) les incertitudes liées aux données : elles sont issues de l'observation, qui comprennent à la fois les données de forçage comme les précipitations et les températures, et les données de réponse comme le débit. Elles résultent à la fois des erreurs de mesures mais également du traitement de ces données. Selon Krzysztofowicz (1999), l'incertitude des données de forçage est souvent liée à la résolution spatiale et temporelle des mesures des précipitations et l'incertitude des données de réponse dépend de la qualité de la mesure du débit lui-même et de la courbe de tarage.

(b) les incertitudes liées à l'estimation des paramètres : elles résultent de l'incapacité d'identifier de manière unique le meilleur jeu de paramètres lors du calage. Ce type d'incertitude est influencé par l'incertitude liée aux données.

(c) Les incertitudes liées à la structure du modèle : elles traduisent la capacité limitée d'un modèle à représenter la dynamique du système modélisé, en raison des simplifications et/ou des insuffisances et/ou une ambiguïté dans la description du processus réel.

(d) Les incertitudes de sortie du modèle : c'est la propagation d'incertitude, c'est-à-dire l'incertitude totale sur les simulations du modèle prenant en compte toutes les sources ci-dessus.

2.5 Les nouveaux développements et défis dans la modélisation hydrologique de bassin versant

Les modèles hydrologiques des bassins versants évoluent constamment en raison des progrès de la science dans divers secteurs, notamment les avancées des techniques de collecte, de traitement et gestion des données. Par conséquent, les modèles hydrologiques deviennent de plus en plus sophistiqués et sont intégrés avec d'autres modèles de processus.

2.5.1 Les technologies spatiales et télédétection

Les techniques de télédétection, radar et satellite, constituent un apport majeur pour atténuer la rareté des données qui est l'une des difficultés majeures de la modélisation hydrologique des bassins versants. La télédétection, en particulier à partir de divers satellites dans diverses bandes spectrales, permet d'avoir des informations sur la distribution spatiale des apports météorologiques et les caractéristiques des bassins versants (la nature du sol, l'occupation des terres et la fluctuation spatiotemporelle des plans d'eau ; comme les barrages, les lacs et les zones inondées) (Singh et Woolhiser 2002; Massari et al. 2014a, b, 2015). Par conséquent, les données de la télédétection peuvent être utilisées pour la surveillance des variables d'état hydrologique et permettent également, en combinaison avec d'autres informations spatiales, de recueillir les paramètres de modèles (Tang et al. 2009; Schultz et Engman 2012; Vereecken et al. 2016; Dong 2018).

Une autre facette importante de la télédétection est le fait que de telles données peuvent être acquises dans des régions éloignées, où aucune mesure n'est réalisable ou ne peuvent être

effectuées que dans des circonstances très difficiles qui entraînent des coûts élevés. Pour ces mesures, les avions et les satellites conviennent particulièrement.

Traditionnellement, il existe trois façons de mesurer les précipitations, à savoir les pluviomètres, les radars météorologiques et les capteurs satellitaires. La mesure des précipitations dans un bassin versant est généralement basée sur des réseaux pluviométriques, dont les mesures ne sont valables que pour le point où elles sont mesurées. Par conséquent, un nombre inadéquat de stations pluviométriques dans le bassin versant peut avoir un impact majeur sur la modélisation (Kebblouti et al. 2015). Contrairement aux pluviomètres classiques, le radar météorologique permet d'obtenir une mesure des précipitations à une résolution temporelle courte avec une large couverture surfacique ainsi qu'une meilleure capture de la variation spatiale des champs de précipitations, ce qui est important pour les modèles distribués. Toutefois, le radar est souvent soumis à une faible qualité des données sur un terrain complexe, principalement en raison du blocage du signal, de l'atténuation par la pluie et de la variabilité verticale de la réflectivité (Hong et al. 2016). Actuellement, le seul moyen pratique de parvenir à une estimation complète des précipitations à l'échelle mondiale provient des satellites d'observation de la terre, qui utilisent des capteurs micro-ondes passives et des capteurs infrarouges calibrés (Todd et al. 2001; Kidd et al. 2003)

Vers la fin de l'année 1997, le lancement du projet *Tropical Rainfall Measurement Mission* (TRMM) a permis le développement rapide d'ensembles de données sur les précipitations basés sur les observations satellitaires, fournissant une énorme quantité d'informations quasi globales pour la recherche et les applications. Actuellement, un certain nombre de produits de précipitations satellitaires ont été rendus publics avec diverses résolutions temporelles et spatiales. Par exemple, les produits *TRMM multisatellite precipitation analysis* (TMPA) (Huffman et al. 2007; Darand et al. 2017) et *Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks* (PERSIANN) (Sorooshian et al. 2000; Sheffield et al. 2006; Sadeghi et al. 2019).

Dans le cadre de la continuité du programme TRMM, le *Global precipitation Mission* (GPM), qui est un programme fondé par une coopération entre deux agences spatiales, la *National Aeronautic and Space Administration* (NASA) et la *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA), a été lancé en tant qu'une mise à niveau pour fournir de meilleurs produits (Hong et al. 2016). Il vise à fournir des estimations globales d'intensité de précipitation, aussi bien dans une perspective climatologique que pour des évaluations immédiates comme l'assimilation dans les modèles de prévision numériques du temps (Berges 2019).

En outre, les satellites fournissent des données relatives à l'utilisation des terres /couverture des terres qui sont des éléments essentiels dans la modélisation hydrologique. Auparavant, la résolution spatiale des données satellitaires était comparativement inférieure à celle des cartes préparées par des levés terrestres. Avec l'avancement des techniques de télédétection et des capteurs hyperfréquences, les satellites fournissent des données à diverses échelles spatiales et temporelles (Talukdar et al. 2020). Au cours des dernières décennies, plusieurs produits permettent l'acquisition des données relatives à l'utilisation des terres /couverture des terres. Par exemple, les projets Landsat développé par la NASA (Williams et al. 2006), satellite pour l'observation de la terre (SPOT) (Baudoin et Chevrel 1992), satellite indien de télédétection

(Resourcesat), Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) (NASA/METI/AIST/Japan Spacesystems et U.S./Japan ASTER Science Team 2009), et Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)...etc. (Hütt et al. 2016; Abdulkareem et al. 2018; Duan et al. 2019).

2.5.2 Les modèles numériques de terrain et systèmes d'information géographique

La variabilité des caractéristiques physiques d'un bassin versant, telles que les sols, l'utilisation des terres et la topographie, constitue l'une des contraintes majeures dans la modélisation. Par conséquent, des modèles distribués à base physique, nécessitant un grand volume de données, ont été développés pour prendre en compte cette variabilité et pour obtenir une meilleure représentativité des processus (Vieux 2001). La principale source d'information topographique avant les années 1980 était constituée de cartes de courbes de niveau. Toutefois, les progrès de la cartographie numérique ont fourni des outils essentiels pour représenter étroitement la nature 3D des paysages naturels (Singh et Woolhiser 2002; Li et Wong 2010; Hrachowitz et al. 2013).

L'un de ces outils est le modèle numérique de terrain (MNT) qui s'agit d'une représentation numérique du relief. Il permet l'extraction automatique des variables topographiques, telles que la géométrie du bassin, les réseaux de cours d'eau, la pente, l'aspect, la direction d'écoulement, etc. Il existe trois schémas de structuration des données d'élévation pour les MNT qui sont : les réseaux vectoriels ou basés sur les contours, les réseaux de grille (raster) et les réseaux triangulés irréguliers (TIN) (Vieux 2001; Schmugge et al. 2002). Cependant, les MNT nécessitent un traitement avant de pouvoir être utilisés dans un modèle hydrologique. Par conséquent, les Systèmes d'Information Géographiques (SIG) sont utilisés pour assembler, analyser et traiter ces données. En outre, l'usage des SIG ne se résume pas à l'utilisation des données MNT, mais également d'autres données issues de la télédétection satellitaire sont également utilisées lors de la modélisation telle que les cartes des sols et de l'occupation des terres (Abdulkareem et al. 2018).

L'intégration du SIG à la modélisation hydrologique a contribué de manière significative à une utilisation plus souple des modèles et même à la conception de modèles plus sophistiqués. Selon Sui et Maggio (1999), plusieurs modes de couplage sont possible qui sont : (a) L'intégration de fonctionnalités des SIG dans des programmes de modélisation hydrologique, (b) L'intégration de la modélisation hydrologique dans les logiciels SIG, (c) Le couplage lâche, et (d) Le couplage serré.

2.5.3 Les traceurs chimiques

L'hydrologie isotopique est basée sur la notion de traçage d'une molécule d'eau à travers le cycle hydrologique. Sklash et Farvolden (1979) ont été parmi les premiers hydrologues à quantifier la composition de l'eau des cours d'eau et ses sources temporelles et géographiques en utilisant les isotopes de l'eau dans les petits bassins versants. Depuis lors, les isotopes stables sont devenus un outil standard pour aider les hydrologues à comprendre le fonctionnement de base des bassins versants (McGuire et McDonnell 2007).

La séparation des hydrogrammes a peut-être été la principale utilisation des isotopes environnementaux à ce jour dans l'hydrologie des petits bassins versants (Genereux et Hooper

1998; Kalbus et al. 2006; Penna et van Meerveld 2019; Radcliff et al. 2021). En effet, Les traceurs chimiques peuvent être utilisés pour définir les écoulements des eaux de surface, subsurface et souterraines permettant ainsi une séparation précise hydrogrammes de crues (McDonnell et al. 1991; Singh et Woolhiser 2002; Schmieder et al. 2016; Fischer et al. 2017). Les isotopes stables peuvent également être utilisés comme traceurs pour estimer le temps nécessaire à l'eau pour traverser un bassin versant ; cette approche permet d'évaluer le temps de concentration des bassins et permet également d'optimiser les système d'évacuation des eaux en milieu urbain (Leibundgut et al. 2011). De plus, les traceurs chimiques ont été utilisés pour le calage des modèles conceptuels. Stadnyk et Holmes (2020) ont comparé le calage d'un modèle hydrologique en utilisant les isotopes au calage hydrométrique traditionnel, et ont conclu que le calage activé par les isotopes assure la réduction du nombre de jeu de paramètres réaliste et assure et une meilleure simulation à long terme du bilan hydrique à grande échelle.

2.6 Les problèmes des échelles spatiale et temporelle dans la modélisation pluie-débit

La question de l'échelle spatiale et temporelle dans la modélisation hydrologique a été reconnue comme l'un des défis les plus gratifiants pour le développement de modèles et les progrès de la science hydrologique (Ficchi et al. 2016). La question de l'échelle revêt une importance encore plus grande lors du développement de modèles hydrologiques régionaux ou mondiaux.

Singh et Woolhiser (2002) ont défini terme d'échelle comme la taille de l'intervalle d'échantillonnage auquel les observations hydrologiques sont effectuées ou comme la taille de la grille utilisée pour les calculs numériques. Ainsi, la taille d'une échelle correspondra à la longueur dans le domaine spatial et à la durée dans le domaine temporel (Melsen et al. 2016a; Ficchi et al. 2019). De nombreux auteurs ont exploré différents aspects des problèmes d'échelle spatiale et temporelle des processus hydrologiques en raison de la prise de conscience environnementale accrue (Par exemple, Klemeš 1983; Blöschl et Sivapalan 1995; Merz et al. 2009).

Blöschl et Sivapalan (1995) ont proposé une synthèse des problèmes d'échelle en hydrologie, où ils ont donné quelques exemples d'approches déterministes et stochastiques utilisées pour la mise à l'échelle en hydrologie, et ils ont proposé une classification des processus hydrométéorologiques selon leur échelles spatiales et temporelles associées. En s'appuyant sur les travaux (Melsen et al. 2016b), Ficchi (2017) a repris cette classification et y a apporté des modifications. C'est cette version qui a été reprise dans cette thèse dans la Figure 2.3.

La Figure 2.3 montre approximativement la fréquence la plus élevée de chaque processus dans le temps et dans l'espace. La région grise ombrée montre le domaine d'activité approximatif du processus hydrologique, tandis que les lignes droites traversant cette région représentent les vitesses caractéristiques des processus, suggérant une corrélation positive entre les échelles spatiales et temporelles.

L'échelle temporelle des données influence grandement le type du modèle hydrologique, sa structure et également les détails à inclure dans le modèle. Par exemple, un modèle hydrologique mensuel est très différent dans sa structure qu'un modèle horaire (Singh et Woolhiser 2002). De même, l'échelle spatiale a un effet sur la qualité de résultats de la

modélisation compte tenu de des hétérogénéités. Toutefois, il a été observé empiriquement que la réponse hydrologique est généralement considérée comme plus simple et plus linéaire avec l'augmentation de la taille du bassin versant (Sivapalan et Wood 1986; Perrin et al. 2001; Andréassian et al. 2004; Kirchner 2009; Davies et Beven 2015). En effet, certains auteurs ont étudié l'influence des échelles spatiales et temporelles des précipitations sur la réponse hydrologique des bassins versants. Krajewski et al. (1991) ont étudié la sensibilité des performances d'un modèle distribué par rapport à la résolution d'échantillonnage spatiale et temporelle des précipitations pour un très petit bassin (7,5 km²). Leurs résultats indiquent une plus grande sensibilité de la réponse du bassin par rapport à la résolution temporelle qu'à la résolution spatiale des apports pluviométriques. De même, Melsen et al. (2016a) ont trouvé des résultats similaires sur un bassin versant très large (1703 km²) où l'impact sur les performances du modèle était plus significatif pour la résolution temporelle que pour la résolution spatiale.

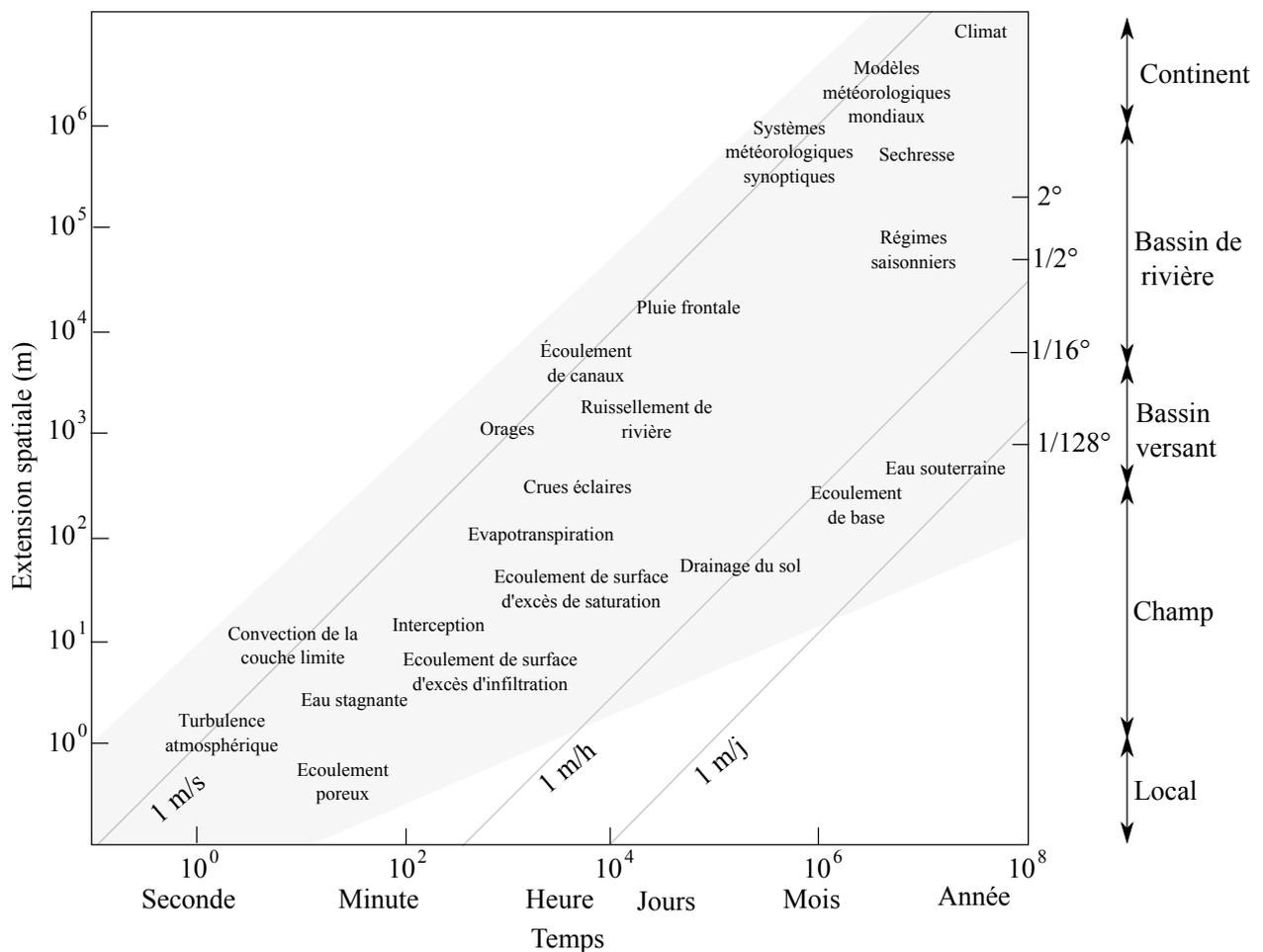


Figure 2.3 Échelles typiques de plusieurs processus hydro-climatiques dans le domaine spatio-temporel (secondes - mètres, échelle log-log). Figure adaptée de Ficchi (2017), elle-même basée sur Melsen et al. (2016b) et Blöschl et Sivapalan (1995)

Compte tenu de ces travaux, la résolution temporelle de la précipitation prend une importance primordiale dans la modélisation hydrologique. Blöschl et Sivapalan (1995) ont signalé que « les processus devraient idéalement être observés et modélisés à l'échelle à laquelle ils se produisent ». Cependant, cela n'est pas toujours possible car certains processus hydrologiques

ont des échelles de temps caractéristiques plus courtes que la résolution des données disponibles. Selon Obled et al. (2009), le pas de temps d'observation et de modélisation doit être assez fin pour reproduire correctement la dynamique la plus rapide du système lorsqu'on adopte une approche conceptuelle.

Les données disponibles pour la modélisation pluie-débit sont souvent discrètes. Les précipitations sont mesurées des durées fixes, ensuite, les données pluviométriques sont généralement agrégées sur un certain intervalle de temps d'accumulation (généralement quotidien, horaire ou parfois de quelques minutes). Les débits sont mesurés ponctuellement à certains instants avec un intervalle d'échantillonnage variable, puis moyenné sur des pas de temps fixes. L'évapotranspiration est généralement calculée à partir des données de température moyennes (Ficchi 2017). Par conséquent, tous les modèles sont affectés par l'effet de l'échelle temporelle, qui lisse le processus que les modèles sont sensés reproduire, comme le montre la Figure 2.4.

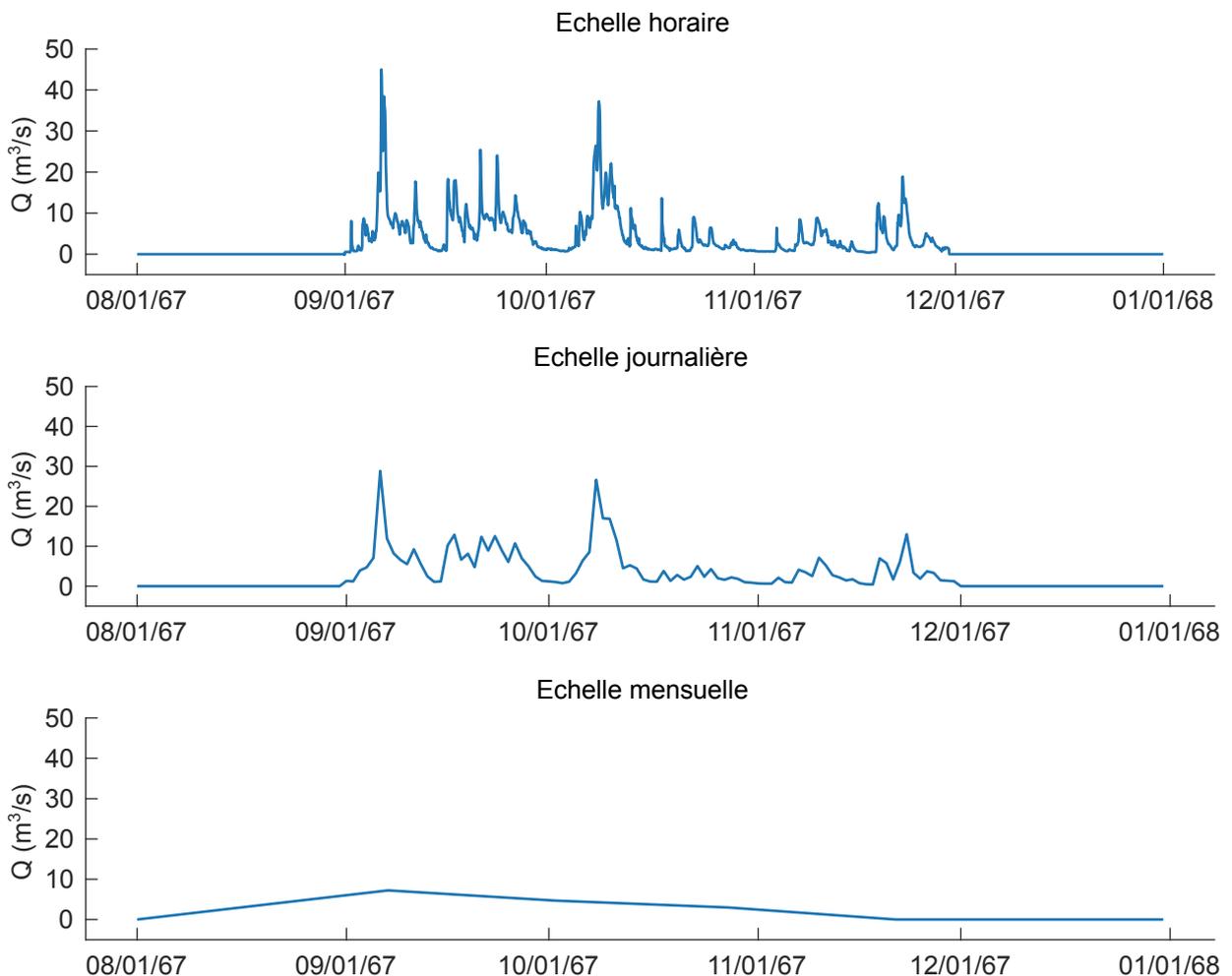


Figure 2.4 Exemple synthétique de l'effet de la moyenne des données sur les données de forçage

La Figure 2.4 illustre la perte progressive d'informations sur la dynamique temporelle et les valeurs extrêmes des précipitations et des débits à mesure que le pas de temps augmente.

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, des généralités sur la modélisation hydrologique à l'échelle du bassin versant ont été abordés, contenant le développement des différents composants des modèles pluie-débit et celui des modèles de bassin versant et leur classification, ainsi qu'un inventaire des modèles de bassin versant les plus populaires. De plus, les procédures de calage et de validation et les incertitudes liées à la modélisation ont été également abordées en détail.

Ensuite, nous avons discuté de l'évolution des modèles d'hydrologie des bassins versants dont l'avenir sera façonné par les progrès rapides de la télédétection et de la technologie satellitaire, du SIG, par la demande croissante de la société pour une gestion intégrée de l'environnement intégrant les aspects biologiques, chimiques et physiques du cycle hydrologique, et par le rôle accru des modèles dans la planification et la prise de décision.

Dans cette synthèse bibliographique, les problèmes de l'échelle spatiale et temporelle dans la modélisation hydrologique ont été abordés, où l'influence de l'échelle temporelle était plus significative d'après plusieurs auteurs. Le fait de moyenniser les données de forçage provoque un lissage des processus ce qui se traduit par des erreurs dans la prédiction et dans l'estimation des paramètres et dépendante du pas du temps. Cet effet affecte également les données de débit observées qui sont une composante essentielle dans la procédure de calage et de validation. Étant donné l'importance de la variabilité sous-quotidienne des précipitations pour la modélisation pluie-débit, on peut être plus confiant dans un modèle fonctionnant avec des données de pas de temps courts qu'un modèle fonctionnant avec des données de pas de temps plus grands.

Chapitre 3

Zone D'étude et Base De Données

— Dans la vie, rien n'est à craindre, tout est à comprendre. — Marie Curie

La connaissance des régions d'études ainsi que leurs caractéristiques morphométriques et hydro-climatiques constitue un élément essentiel pour toute étude hydrologique. Cependant, la disponibilité des données nécessaires à la modélisation pluie-débit constitue une contrainte majeure, en particulier dans les pays en cours de développement, à l'instar de l'Algérie. Toutefois, les régions du nord de l'Algérie sont sujettes aux risques d'inondations en raison de leur climat local comme nous l'avons détaillé dans le Chapitre 1. De ce fait, l'étude du comportement des bassins versants Algérien, en rassemblant les différentes données disponibles, est d'une grande importance.

Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'ensemble des bassins versants étudiés dans cette thèse, ainsi que les données hydro-climatiques disponibles au sein de ces bassins versants. De plus, les procédures d'extraction et de sélection des événements seront abordées dans ce chapitre.

3.1. Présentation de la région d'étude

L'Algérie est située au nord-ouest de l'Afrique en bordure de la Méditerranée. Elle possède une grande superficie (2 382 millions km²), ce qui en fait le plus grand état d'Afrique¹³. Le climat du pays est très diversifié selon classification climatique de Köppen-Geiger (Figure 3.1a), où la partie nord est caractérisée par un climat méditerranéen, tandis que le reste du pays est caractérisé par une superposition de climats semi-aride et aride (Zeroual et al. 2017, 2019).

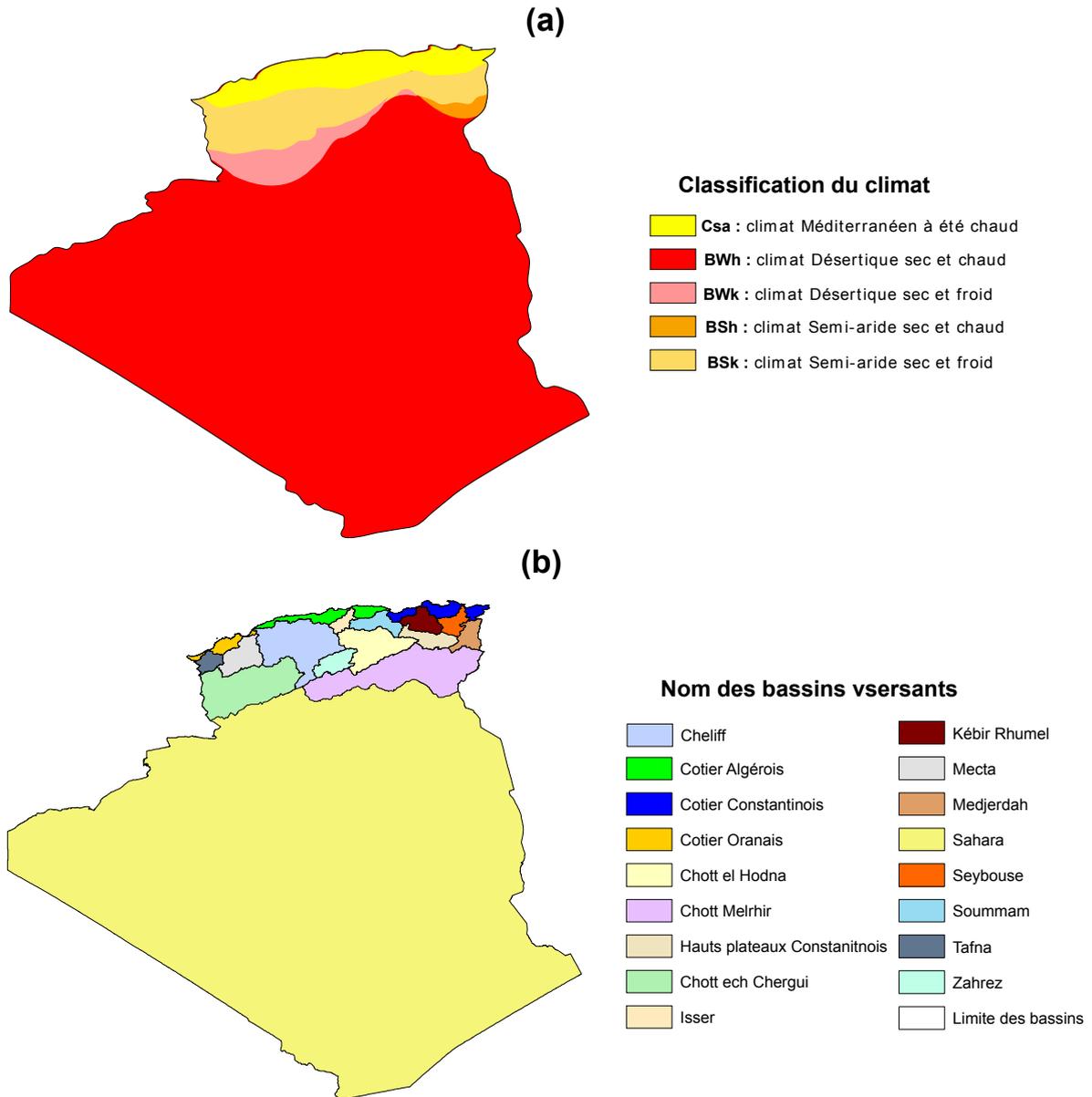


Figure 3.1 La carte de l'Algérie (a) La classification climatique de Köppen-Geiger selon Peel et al. (2007) extraite pour l'Algérie ; (b) Les limites des grands bassins versants Algériens d'après la carte du réseau hydro-climatique et de la surveillance de la qualité des eaux de l'ANRH.

¹³Le Soudan était le plus grand pays d'Afrique depuis son indépendance en 1956. Cependant, depuis le référendum d'autodétermination du Soudan du Sud, le Soudan perd également son « statut » de plus grand État d'Afrique au profit de l'Algérie en Juillet 2011.

D'après la carte du réseau hydro-climatique et de la surveillance de la qualité des eaux élaborée en 2005 par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH), le pays est divisé en 17 grands bassins versants du pays comme le montre la Figure 3.1b. La partie nord de l'Algérie, caractérisée par des précipitations annuelles qui varient entre 400 et 1000 mm (Meddi et al. 2017; Zeroual et al. 2017, 2019), est sujette à des pluies diluviennes, à l'instar d'autres régions méditerranéennes, ce qui accroît considérablement le risque d'inondations (Gaume et al. 2009; Llasat et al. 2010). Par conséquent, dans cette thèse, nous nous sommes focalisés sur cette partie du pays.

3.2 Constitution de la base de données hydro-climatique

3.2.1 La constitution d'un échantillon de bassins versants

Le choix de l'échantillon de bassin versant dépend essentiellement de la disponibilité des données hydro-climatiques avec un pas de temps sous-journalier. Cependant, ces données ne sont disponibles que dans certains bassins munis de stations hydrométriques automatisées et de pluviographes. En fait, cinq bassins versants ont été sélectionnés où les données peuvent être extraites pour un pas de temps sous-journalier, et dont les caractéristiques hydro-climatiques et géomorphologiques sont assez différentes ce qui permet d'assurer une bonne représentativité lors de la simulation. La Figure 3.2 montre la situation géographique des bassins versants étudiés où trois bassins versants se trouvent dans la région Est du pays et deux bassins versants dans la région centre du pays.

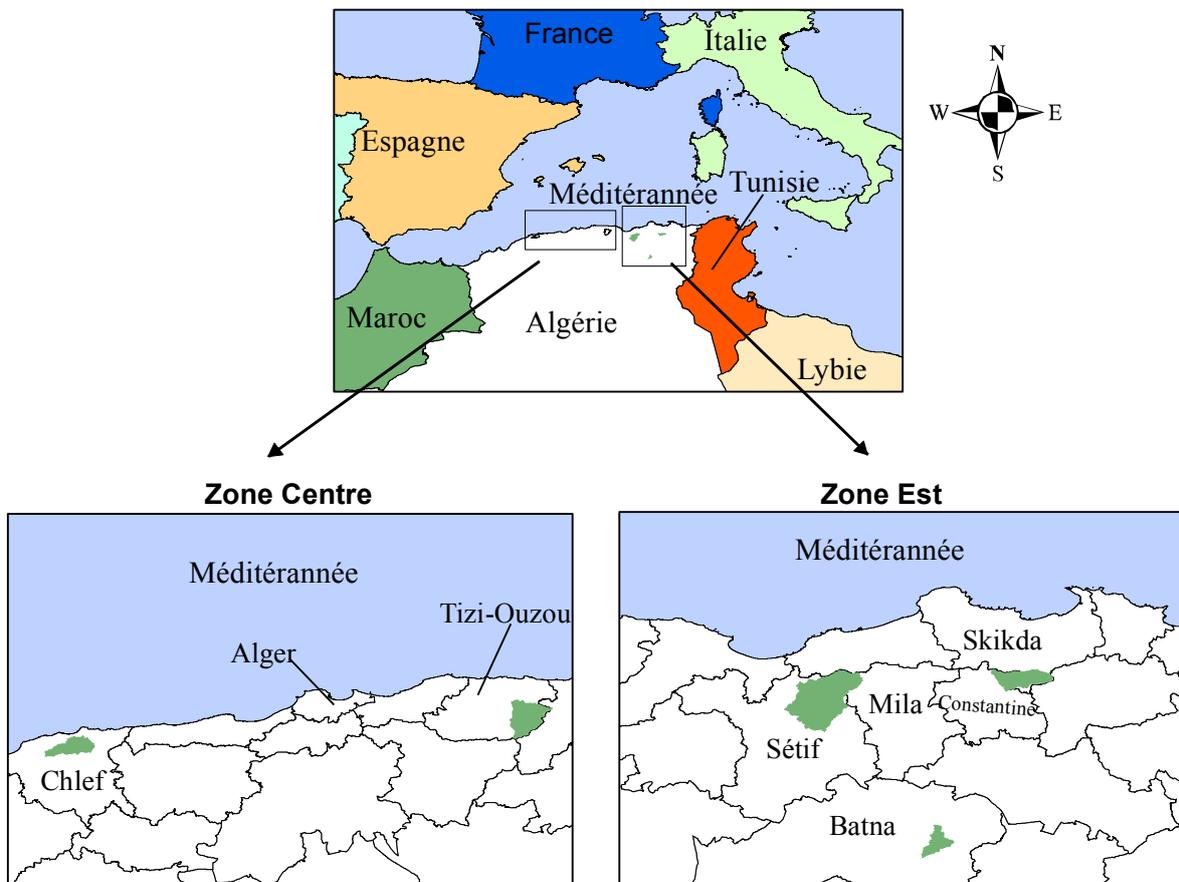


Figure 3.2 La localisation des bassins versants étudiés

3. Zone d'étude et base de données

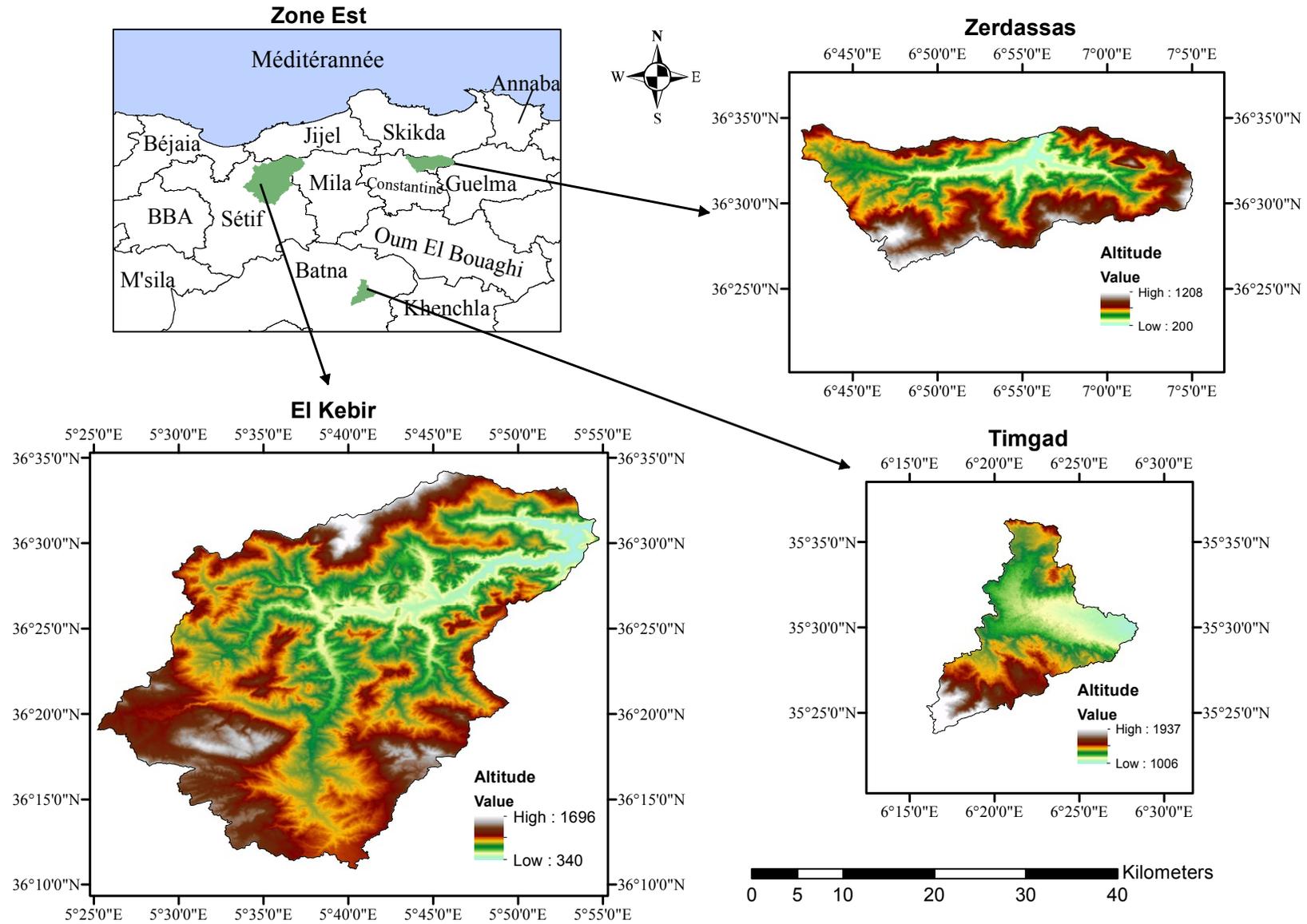


Figure 3.3 La zone d'étude Est et la délimitation des bassins versants

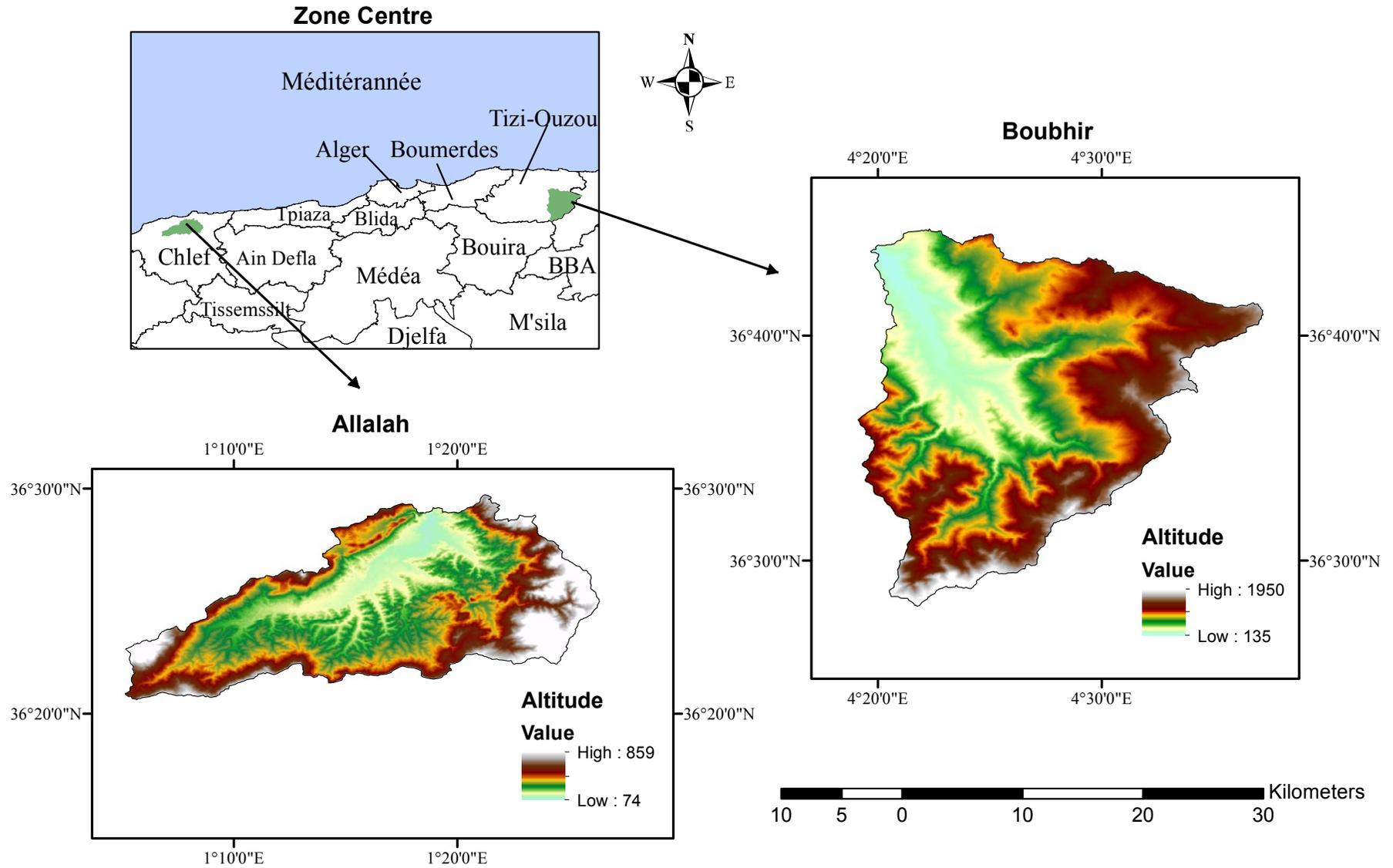


Figure 3.4 La zone d'étude Centre et la délimitation des bassins versants

La délimitation des bassins versants (Figures 3.3 et 3.4) a été faite à l'aide d'un logiciel SIG où nous avons utilisé des données MNT d'une résolution de 30m obtenus à l'aide du satellite ASTER (NASA/METI/AIST/Japan Spacesystems et U.S./Japan ASTER Science Team 2009). Les principales caractéristiques morphométriques de ces bassins versants sont résumées dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 Les principales caractéristiques morpho-métrique des bassins versants étudiés

Caractéristiques des bassins		Bassins versants				
		El Kebir	Timgad	Zerdassas	Allalah	Boubhir
Surface	Km ²	1022	183	321	295	475
Périmètre	Km	184	94	100	99	117
Indice de compacité	-	1.61	1.95	1.56	1.61	1.5
Altitude maximale	M	1696	1937	1208	859	1950
Altitude moyenne	M	900	1464	628	291	813.6
Altitude Minimale	m	340	628	1006	74	135
Pente moyenne du Bassin versant	°	12.90	8.99	13.29	11.00	15.88
Longueur du cours d'eau principal	Km	60	21.5	19	28.5	28.7
Densité de drainage	Km/Km ²	0.26	0.15	0.12	0.44	0.38

La connaissance de la couverture du sol est d'une importance primordiale due à son impact direct sur la genèse des crues (Abdulkareem et al. 2018; Dalu et al. 2018; Estes et al. 2018). Par conséquent, la couverture du sol des bassins versants de l'étude a été prise en considération. La carte de la couverture du sol (Figure 3.5) a été extraite à partir du produit « the European Space Agency Climate Change Initiative (CCI) product: CCI Land Cover, particularly the S2 prototype Land Cover 20 m map of Africa 2016 » (CCI Land Cover team 2017), et les principales caractéristiques de chaque bassin versant sont résumée dans le Tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Synthèse de l'occupation du sol des bassins versants étudiés

Occupation du sol (%)	Bassins versants				
	El Kebir	Timgad	Zerdassas	Allalah	Boubhir
Bois	4.8	5.9	20.0	2.7	51.3
Cultures	67.2	24.7	67.6	51.2	39.1
Pâturage	26.4	68.3	12.1	44.3	7.4
Zones urbaines	1.6	1.1	0.3	1.8	2.2
Plans d'eau	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01

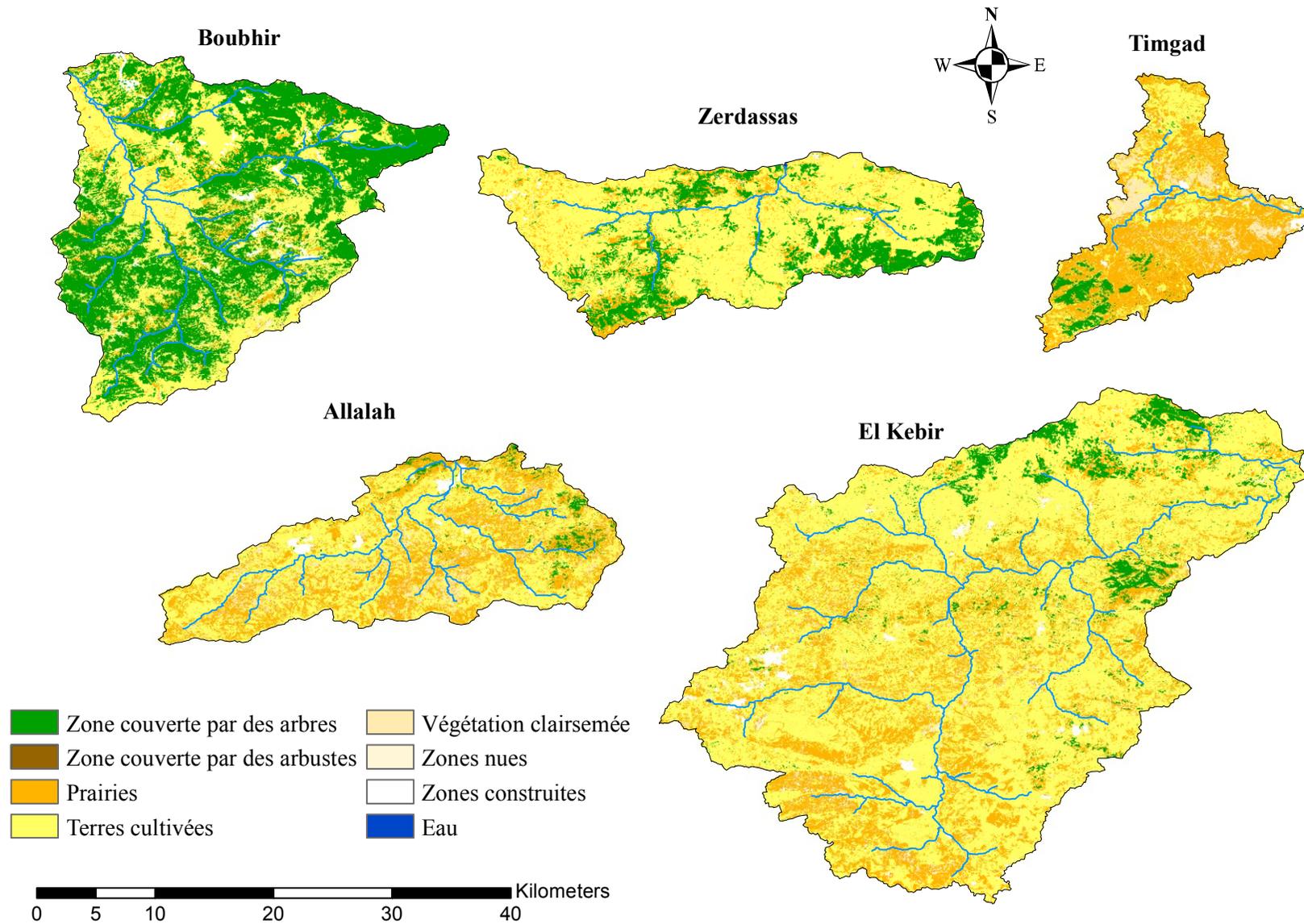


Figure 3.5 La carte d'occupation de sol des bassins versants étudiés.

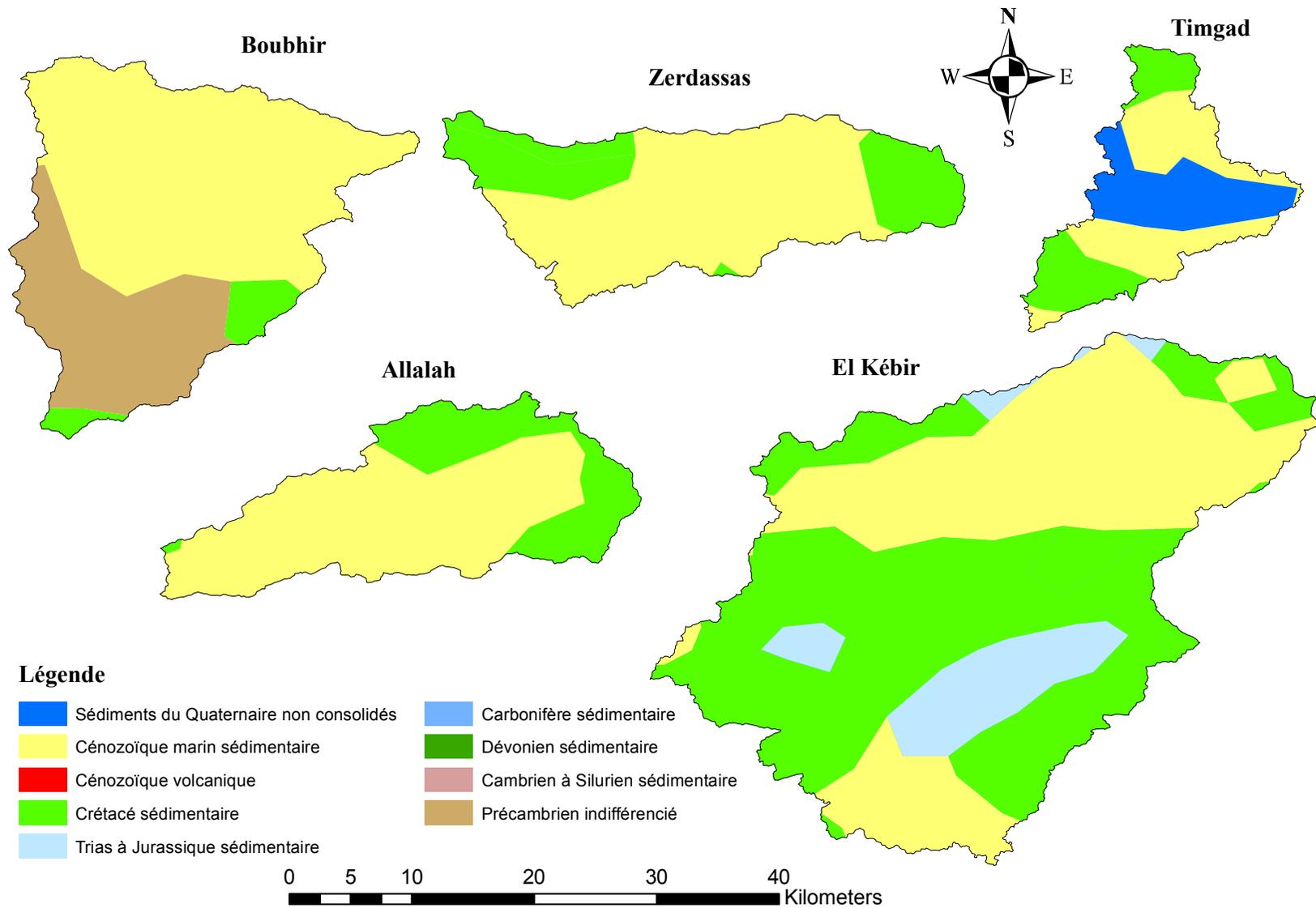


Figure 3.6 La carte des formations géologiques des bassins versants étudiés (source: www.bgs.ac.uk.)

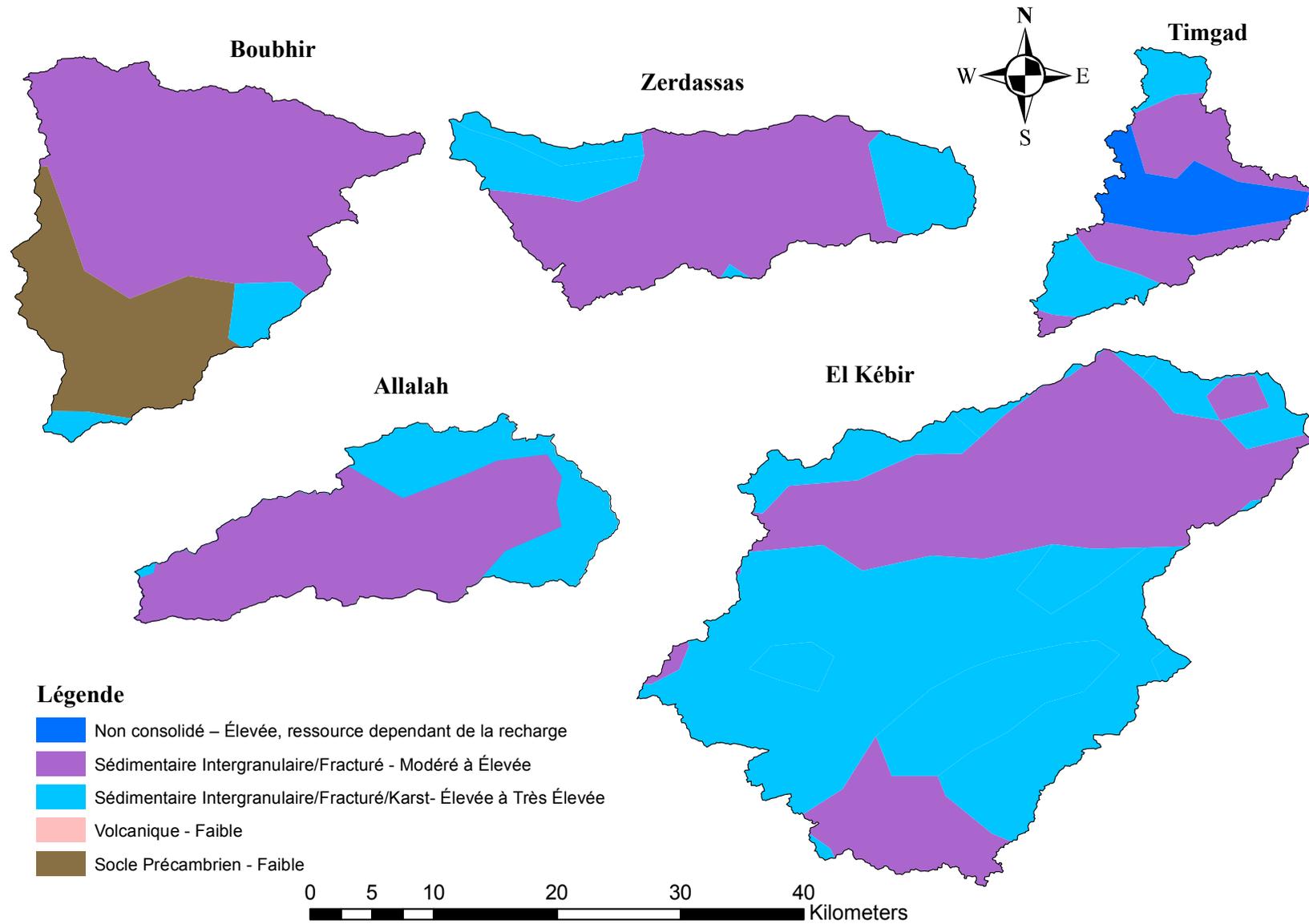


Figure 3.7 La carte de l'hydrogéologie des bassins versants étudiés (source: www.bgs.ac.uk.)

Les Figures 3.5–3.7 ont été établies afin de caractériser les bassins versants et illustrer leur différence, notamment sur le plan de la couverture terrestre, les formations géologiques et les caractéristiques hydrogéologiques.

Pour faciliter l'interprétation des informations contenues dans les figures relatives à l'occupation de sol (Figure 3.5), certaines catégories ayant des attributs similaires ont été fusionnées. Ainsi, cinq catégories principales d'occupation des terres ont émergé (Tableau 3.2). Les superficies couvertes d'arbres et d'arbustes ont été combinées pour former la catégorie de bois. De même, les prairies, la végétation clairsemée et les zones nues sont incluses dans la catégorie de pâturage. Selon le Tableau 3.2, les bassins versants sont de nature rurale, avec peu de zones urbaines, mais ils ont tout de même des couvertures terrestres différentes. La majorité des bassins versants sont dominés par les cultures, à l'exception du bassin versant de Timgad, qui est dominé par les pâturages.

Les informations dérivées à partir de la cartographie de la géologie et de l'hydrogéologie des bassins versants sont combinées avec les informations fournies par les caractéristiques morphométriques, permettant d'apporter des explications sommaires du comportement hydrologique des bassins versants. Les formations géologiques dans la légende de la Figure 3.6 sont classées chronologiquement de la plus récente à la plus ancienne.

Selon la charte chrono-stratigraphique internationale établie par Cohen et al. (2018), la plupart des bassins versants sont principalement composés de formations Phanérozoïques, à l'exception du bassin versant de Boubhir qui contient des formations précambriennes. La Figure 3.7 illustre les caractéristiques hydrogéologiques dérivées pour les bassins versants. Ils montrent la présence de Karst fissuré ainsi que de formations géologiques non consolidées. De ce fait, des échanges avec les bassins voisins et/ou le sous-sol puissent être très probables.

3.2.2 Ensemble d'événements d'inondation

Une procédure automatisée d'extraction des événements pluie-débit inspirée de Brocca et al. (2008, 2011) et Ficchi (2017) a été utilisée pour extraire et sélectionner les événements pour chaque bassin versant durant la période 1969 à 2004 (voir l'annexe A pour la procédure de sélection), fournissant un ensemble de 94 événements sur les 5 bassins versants: 17 pour le bassin versant d'El Kebir, 12 pour le bassin versant de Timgad, 17 pour le bassin versant de Zerdassas, 30 pour le bassin versant de Allalah et 18 pour le bassin versant de Boubhir. La Figure 3.9 illustre la répartition des événements en fonction des mois et des années. Les distributions de quelques descripteurs de crue pour les cinq bassins versants sont illustrées dans la Figure 3.10 et résumées dans le Tableau 3.3. Ces caractéristiques des crues ont été choisies car elles sont conceptuellement liées à la dynamique temporelle des crues et devraient donc être pertinentes pour notre analyse.

Tableau 3.3 Résumé des distributions des caractéristiques des crues des événements disponibles

Caractéristiques des événements	Définition	Min	1 ^{er} quartile	Médiane	3 ^{ème} quartile	Max
Pluie totale (mm)	Précipitations cumulées sur la durée totale de l'événement	5.70	13	21.6	34.7	116.5
Coefficient d'écoulement (-)	Le rapport entre le volume de la crue observé et la pluie totale	0.02	0.07	0.14	0.22	0.67
P_5 (mm)	Les pluies antécédentes cumulées de 5 jours	0	0	7.1	25	75
Durée des crues (h)	Nombre de pas de temps horaires entre le début et la fin de l'événement	7	27	36.5	47	161
Durée des orages (h)	Nombre de pas de temps horaires entre le début et la fin de la pluie	2	10	19	30	146
Débit moyen (m ³ /s)	Le débit moyen chaque événement	0.4	3.06	7.76	20.86	111.45
Débit de pointe (max) (m ³ /s)	Le débit maximum chaque événement	1.24	8.7	21.84	64.80	309.5
Temps de latence pluie-débit (h)	Décalage temporel maximisant la corrélation croisée des séries pluie-débit sur chaque événement	0	2	5	7	22

Selon la Figure 3.8, les coefficients de corrélation de Pearson les plus élevés ($r > 0.7$) se trouvent entre les durées des crues et des orages ($r = 0.94$). Les corrélations entre les pluies totales et les durées de crue et les coefficients d'écoulement sont, respectivement, $r = 0.51$ et $r = 0.84$. Toutefois, Il est important de noter que les événements pluvieux les plus importants en termes de volume de précipitations ne sont pas nécessairement ceux qui ont le coefficient de ruissellement le plus élevé ou qui induisent le débit de pointe le plus élevé, ce qui est typique des conditions climatiques méditerranéennes (Chahinian et al. 2005; Meddi et al. 2017).

Quant aux caractéristiques morpho-métrique du bassin versant, peu de ces indicateurs sont corrélés avec les caractéristiques des événements; Les corrélations entre le décalage pluie-débit et la longueur hydraulique des bassins versants et la densité de drainage des bassins versants n'ont pas été significatives (respectivement avec $r = 0.22$ et $r = 0.16$), tandis que la pente est fortement corrélée au décalage ($r = 0.84$). De même, l'indice de compacité est fortement corrélé au décalage ($r = 0.94$).

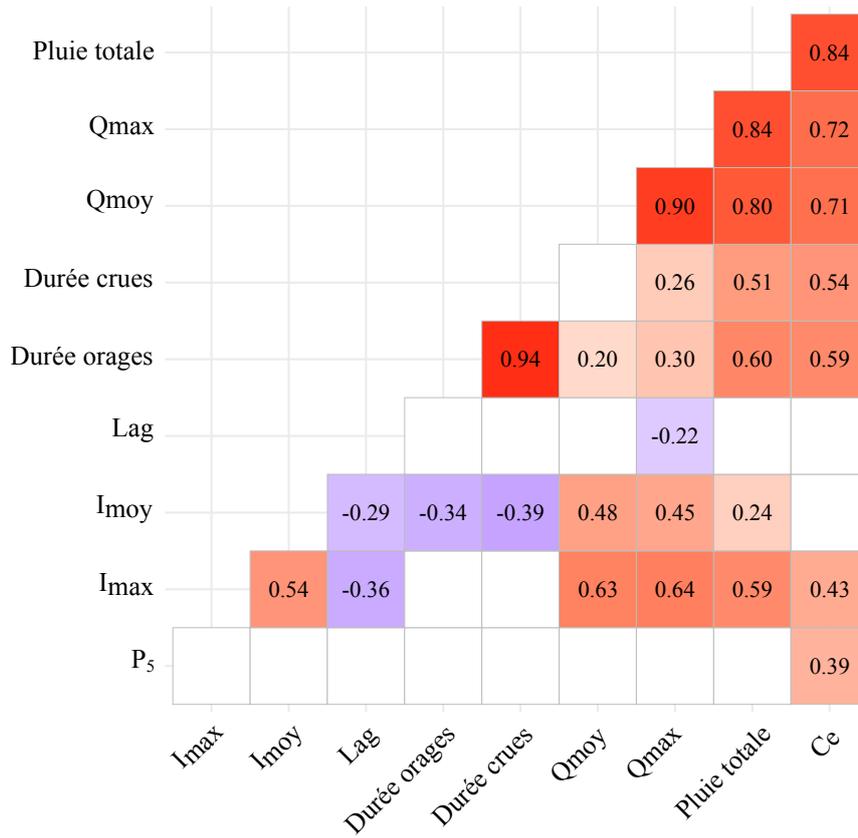


Figure 3.8 Le corrélogramme des principales caractéristiques des événements

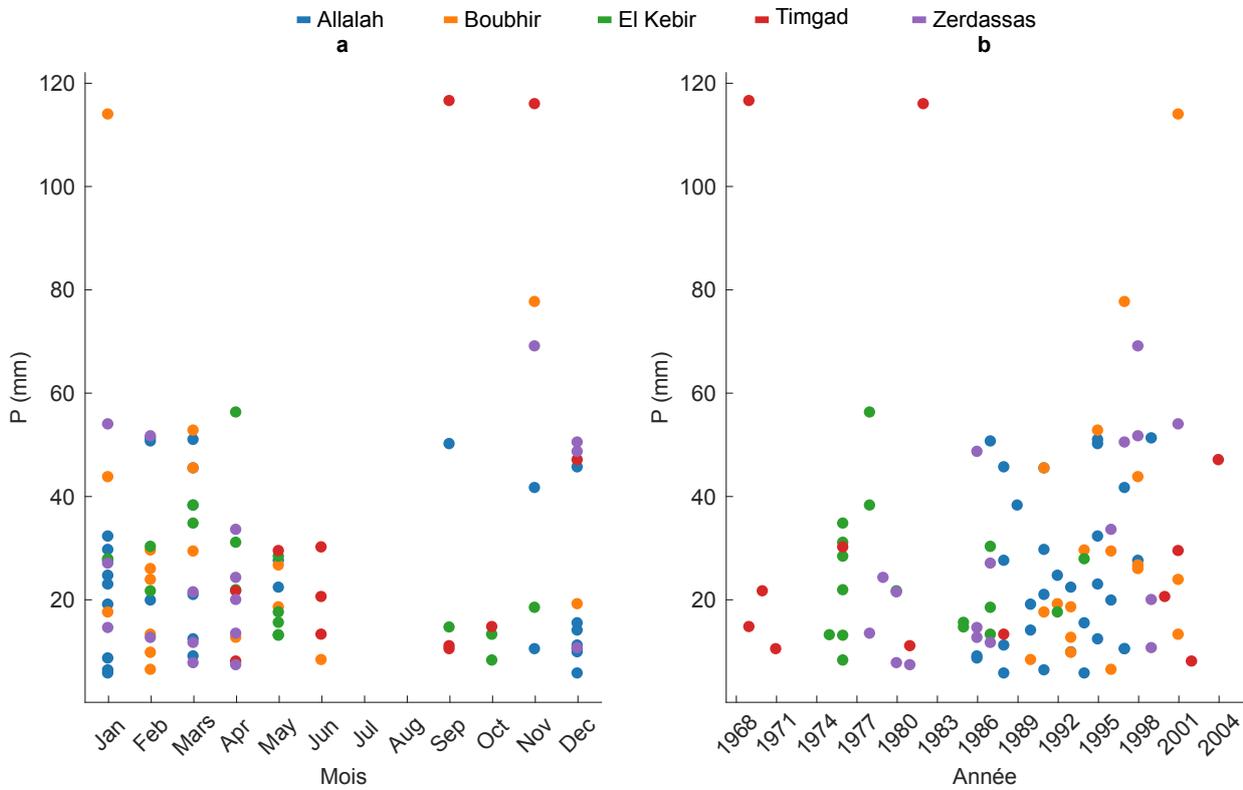


Figure 3.9 La répartition des événements selon : (a) les mois et (b) les années.

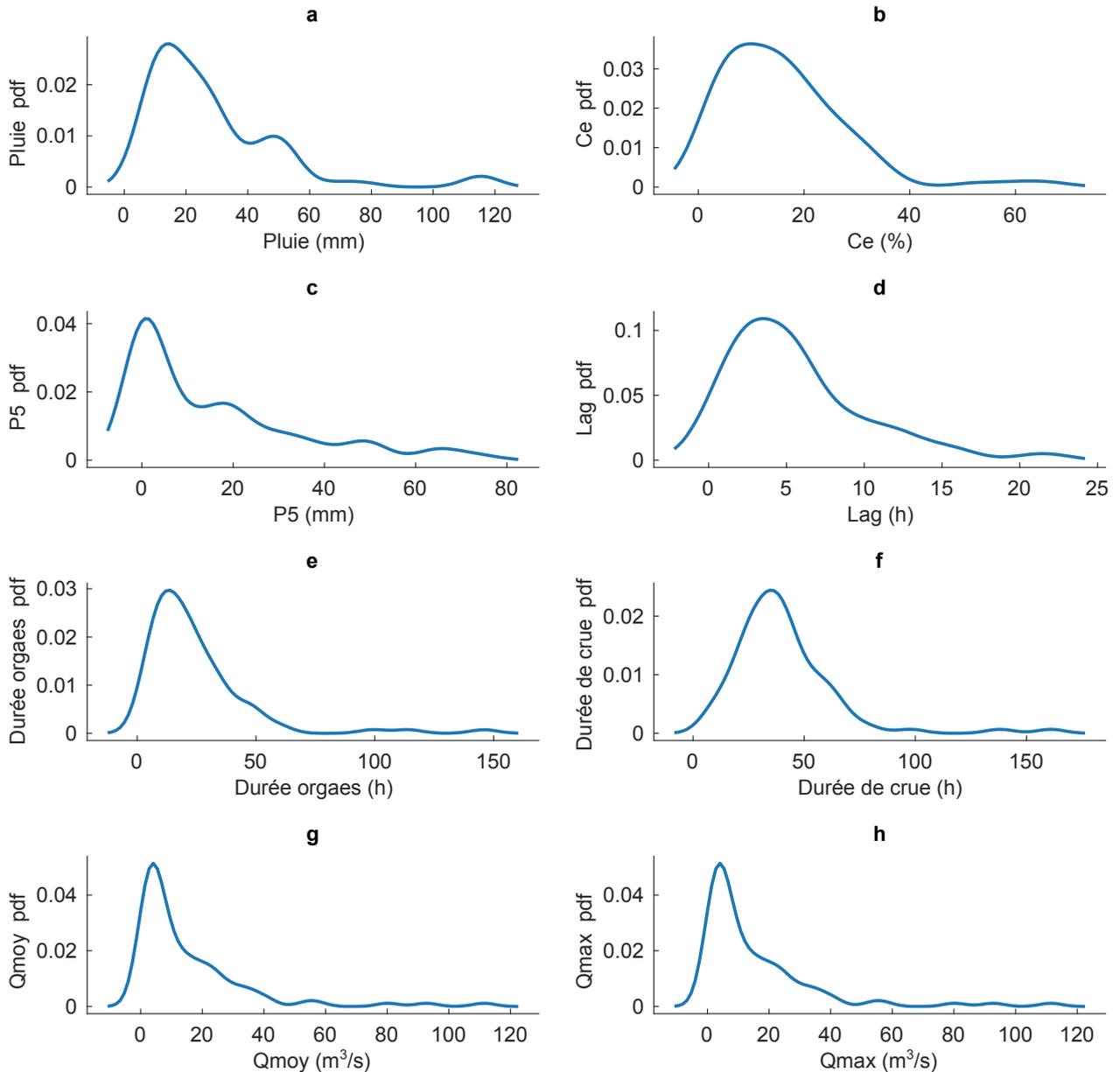


Figure 3.10 Les fonctions de distribution des caractéristiques des crues des événements disponibles

3.2.3 La structure de données pluie-débit

Les données disponibles au sein des bassins versants étudiés ont été recueillies à partir de stations hydrométriques automatisées et de pluviographes. Les stations hydrométriques automatisées permettent d'obtenir des hydrogrammes observés à une échelle horaire. Cependant, quant aux pluviographes, ils donnent des valeurs cumulées de précipitations sur des intervalles de temps irréguliers, ce qui constitue un handicap lors de l'automatisation de la procédure de sélection des événements et lors de la modélisation. Par conséquent, les données de précipitations ont été converties en un pas de temps horaire par l'application d'un algorithme d'interpolation. La Figure 3.11 montre les résultats d'interpolation pour un événement choisit au hasard parmi les événements disponibles. En fait, plusieurs méthodes d'interpolations sont disponibles dans les logiciels et packages, et chacune de ces méthode

produit une répartition différentes ce qui impacte fortement la répartition horaire des précipitations. Dans cette thèse, nous avons opté pour interpolation cubique.

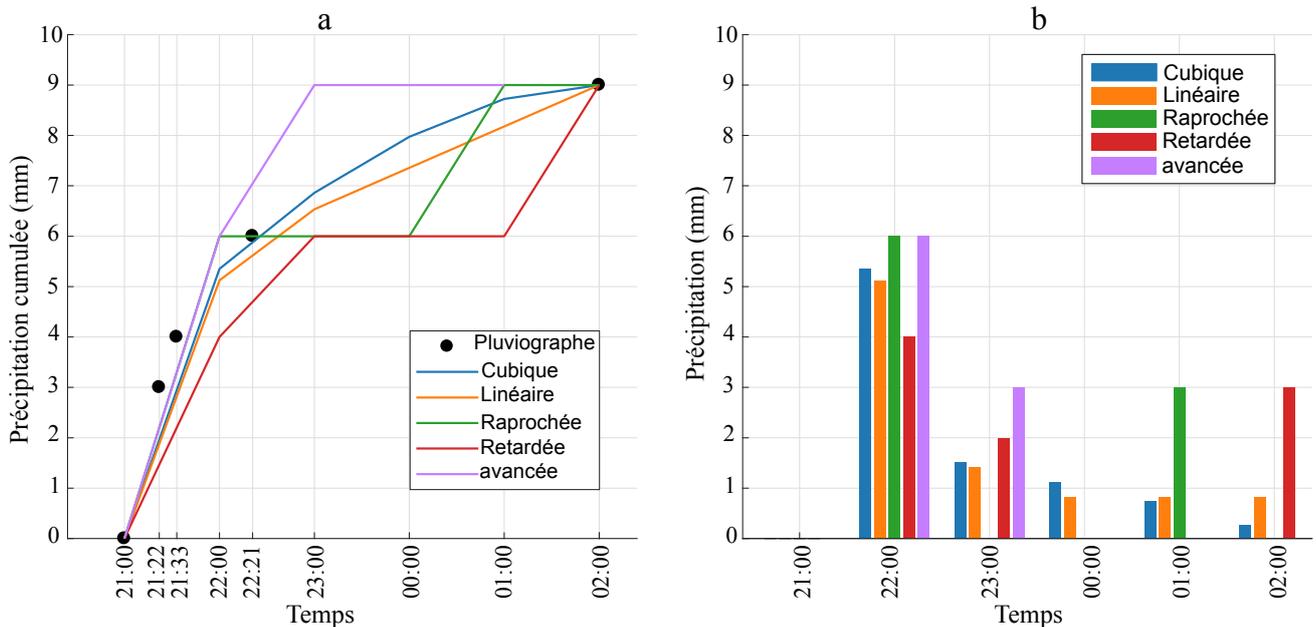


Figure 3.11 Les différentes méthodes d'interpolation disponibles pour la constitution des pluies horaires

3.3 L'échantillonnage des ensembles de données de calage et de validation

L'importance capitale du calage et de la validation dans la détermination des performances des modèles hydrologiques, implique une approche minutieuse et fondée lors de l'échantillonnage des sous-ensembles des données de calage et de validation.

Nous avons adopté le test sur échantillon fractionné (the split-sample test) (Klemeš 1986), qui est le test classique qui s'adapte le mieux pour cette étude. Il consiste à diviser l'échantillon en deux périodes plus ou moins égales (voir chapitre 2). Cependant, l'échantillonnage de l'ensemble de données a un impact considérable sur le calage et la validation. Par conséquent, plusieurs auteurs ont débattu d'une ligne directrice sur cette question pertinente (Par exemple. Perrin et al., 2007; Zheng et al., 2018; entre autres). L'approche la plus commune consiste à utiliser les deux tiers des données pour le calage et le reste pour la validation (Abbaspour et al. 2015). De plus, Sorooshian et al. (1983) ont constaté que les paramètres calés tendent à atteindre des valeurs plus réalistes lorsque des périodes de calage plus longues sont utilisées.

La méthode DUPLEX, mise au point par R.W. Kennard (article non-publié) et décrite par Snee (1977), assure une couverture uniforme de l'espace de données et permet de diviser les données en deux ensembles qui couvrent approximativement la même région et qui ont des propriétés statistiques similaires. En effet, l'algorithme DUPLEX permet une sélection de sous-ensembles représentatifs en maximisant les distances euclidiennes entre les sous-ensembles (Daszykowski et al. 2002; Mora et Schimleck 2008; Puzyn et al. 2011). Il fonctionne selon le principe suivant : l'algorithme commence par calculer toutes les distances entre les données (points candidats) et sélectionne les deux points les plus éloignés en termes de distance euclidienne et les rassemble au sein d'un même jeu de données qui est l'ensemble de calage. Les deux points suivants qui sont les plus éloignés sont mis dans l'ensemble de

validation. L'opération d'alternance entre l'ensemble de calibration et l'ensemble de validation est poursuivie jusqu'à ce que tous les points candidats soient assignés à l'un des deux sous-ensembles et que de rapport de fractionnement souhaité soit atteint (Snee 1977; Daszykowski et al. 2002; Puzyn et al. 2011). La Figure 3.12 illustre la sélection des données au sein d'un espace à deux dimensions pour un exemple synthétique.

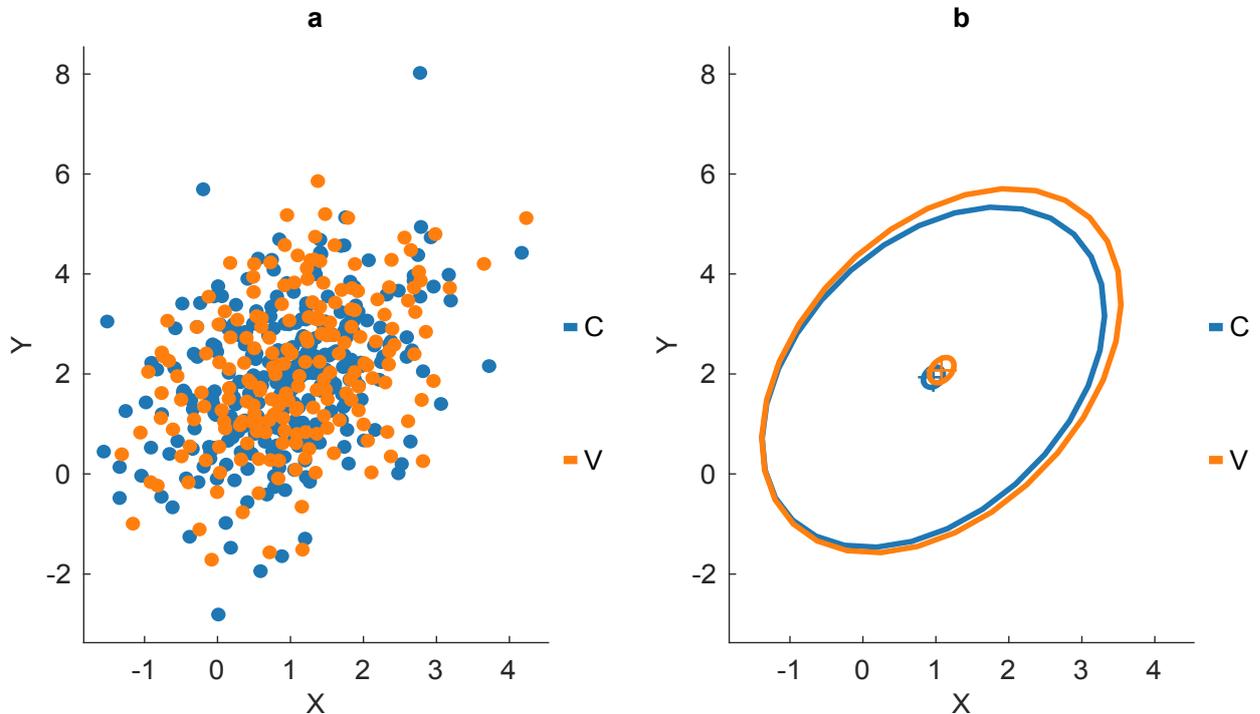


Figure 3.12 Exemple synthétique de la séparation des sous-ensembles, de 200 points à deux dimensions, effectuée par l'algorithme DUPLEX

Compte tenu de ces informations, les événements ont été divisés en deux sections par l'application de l'algorithme DUPLEX (Snee 1977; Daszykowski et al. 2002), où soixante pour cent des données disponibles ont été utilisées pour l'étalonnage, et le reste a été utilisé pour la validation. Le package sous Matlab® développé par Daszykowski (2016) a été adaptée et utilisé.

Les principales caractéristiques des événements sont illustrées dans la Figures 3.13, qui montre les relations entre la précipitation totale (P), l'intensité moyenne des précipitations, la précipitation de cinq jours antécédents (P_5) et le coefficient d'écoulement (C_e) pour les périodes de calage et de validation. En effet, la Figure 3.13 montre qu'il y a une variété d'évènements de crues où peu de corrélations sont présentent entre les caractéristiques de crues notamment entre le C_e et P .

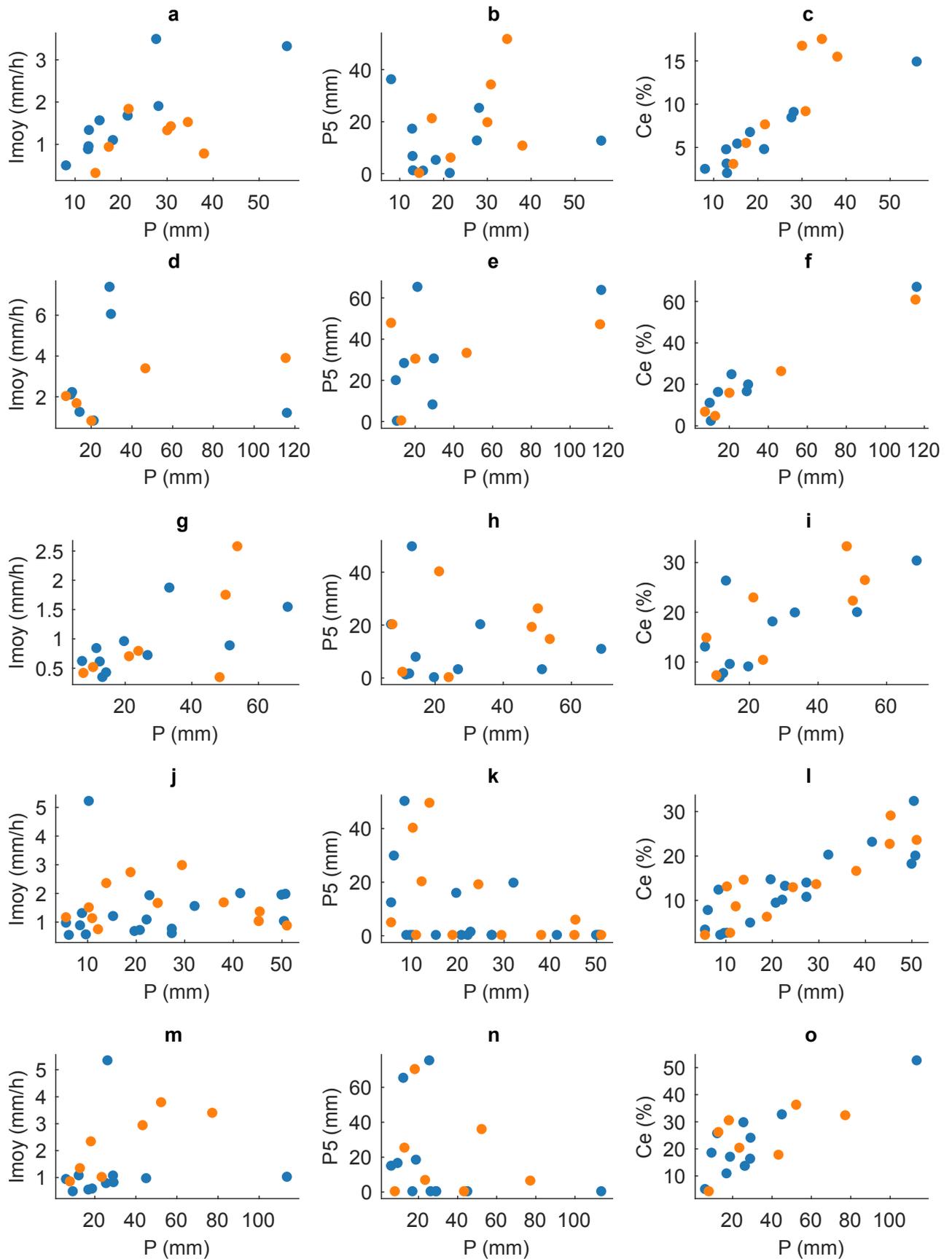


Figure 3.13 Principales caractéristiques des événements sélectionnés pour le calage (Bleu) et la validation (Orange); a, b et c pour le bassin El Kebir, d, e et f pour le bassin de Timgad, g, h et i pour le bassin de Zerdassas, j, k et l pour le bassin de Allalah et m, n et o pour le bassin de Bouhbir

3.4 Conclusion

Afin de répondre aux objectifs de cette thèse, nous avons construit une petite base de données de bassins versants Algériens, pour lesquels des données hydro-climatiques à une échelle temporelle horaire sont disponibles. Nous avons présenté les zones et les bassins versants concernés étudiés. De même, nous avons présenté les données disponibles et les traitements effectués pour préparer la série chronologique de précipitations et de débits.

En outre, une procédure automatisée de sélection des sous-ensembles de calage et de validation, nommée DUPLEX, a été détaillée afin de garantir une modélisation représentative et d'éviter un éventuel biais des paramètres lors du calage.

Chapitre 4

Méthodes de Développement et de Comparaison de Modèles Pluie-Débit

“All models are wrong, but some are useful” George E. P. Box

Ces dernières décennies, La puissance de calcul des ordinateurs s'est élargie, tout comme notre compréhension des processus hydrologiques et la disponibilité des données hydrométéorologiques. Cela a conduit à la prolifération de modèles de processus et hydrologique et de modèles de bassins versant (Chapitre 2). Toutefois, chaque modèle s'appuie sur des théories et des hypothèses simplificatrices. En conséquence, des recherches approfondies sont nécessaires pour identifier les structures des modèles qui s'adaptent le mieux au contexte climatique et géomorphologique de la zone étudiée. L'objectif de ce chapitre est de construire un modèle pluie-débit conceptuel évènementiel qui permet de reproduire convenablement les hydrogrammes de crues observés.

Introduction

Ce chapitre se base sur les concepts fondamentaux de la modélisation hydrologique à l'échelle du bassin versant, déjà discutés dans le Chapitre 2, où des modèles de composants des processus hydrologiques ont été intégrés pour développer un modèle pluie-débit viable pour le cadre climatique et géomorphologique de la zone d'étude. En outre, la procédure de calage basée sur les algorithmes génétiques est abordée ainsi que les critères de performances utilisés pour évaluer les modèles.

4.1 La mise au point d'un modèle pluie-débit au pas de temps horaire

Comme il a été montré dans le Chapitre 2, un modèle mathématique est une représentation mathématique simplifiée d'un phénomène physique où des formulations mathématiques sont impliquées pour modéliser les phénomènes induits dans le processus hydrologique. Les modèles diffèrent dans leurs structures et hypothèses simplificatrices mais aussi dans le nombre de processus impliqués. D'après Hingray et al. (2015), la construction de la structure du modèle nécessite la schématisation de l'hydrosystème, des problèmes mathématiques et numériques liés à sa discrétisation spatiale, ainsi que les concepts choisis pour représenter le milieu physique et les processus. La conception du modèle et le développement du programme informatique associé s'appuient souvent sur la réutilisation des systèmes existants. Il est préférable de se référer au bilan hydrologique plutôt qu'au bilan hydrique lors de la modélisation pluie-débit à l'échelle du bassin versant, car l'analyse pluie-débit emploie de modèles appropriés pour chaque composante d'écoulement ou au moins les composantes principales. Par conséquent, certaines composantes sont parfois négligées. Pour la modélisation à un pas de temps fin, les principaux processus hydrologiques employés sont: l'infiltration, les pertes (par interception et dans les dépressions), l'écoulement souterrain, l'écoulement de surface et l'écoulement hypodermique comme l'illustre la Figure 4.1. Toutefois, en modélisation événementielle, l'évapotranspiration n'est pas importante par rapport aux autres abstractions et peut être négligée (Nguyen 2019; Xie et al. 2019).

Dans cette thèse, une approche de modélisation globale hybride, mi-empirique mi-conceptuelle est utilisée. Autrement dit, les fondements conceptuels des modèles sont conceptuels, mais leur développement est principalement empirique (Wagener et al. 2004; Berthet 2010). La structure des modèles développés combine un module de séparation des écoulements, un module d'infiltration et un module de transfert. Le reste du chapitre passe en revue les sous-modèles qui ont été employés.

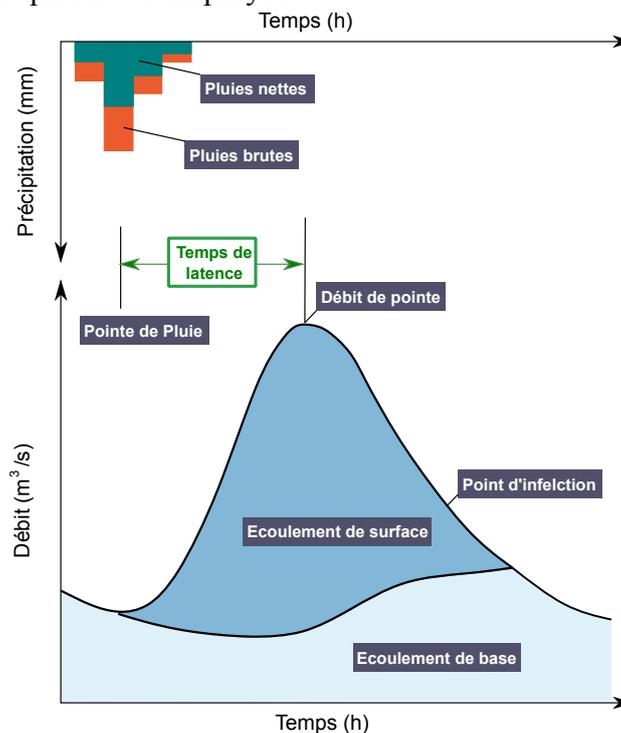


Figure 4.1 Schémas synoptique de la transformation de la pluie en débit.

4.2 La séparation des écoulements

En raison de son impact direct sur le calage, la séparation des écoulements est une étape critique lors de la modélisation pluie-débit qui est considérée comme la première étape de l'analyse du bilan hydrique à l'échelle du bassin versant, et qui permet de déterminer la quantité du ruissellement observé (R_{obs}) (Eckhardt 2005; Duncan 2019). Comme mentionné dans la section 2.1.1.4, il existe différentes composantes de l'écoulement au cours d'un processus de précipitation, telle que l'écoulement de surface (rapide), l'écoulement intermédiaire, l'écoulement de base, etc. Généralement, le débit peut être divisé en deux composants qui sont le débit rapide et le débit de base. L'écoulement rapide répond rapidement aux événements pluvieux, tandis que l'écoulement de base dont la source principale est l'eau souterraine présente une réponse lente aux événements pluvieux (Shao et al. 2020).

Il existe une grande variété de méthodes de séparation d'hydrogrammes, allant d'empiriques à analytiques et physiques, et qui varient en termes de complexité et de nombre de paramètres impliqués. Les techniques graphiques sont très pratiques et simples à utiliser (Chow et al. 1988). Cependant, si les hydrogrammes de crue sont tronqués, la programmation se complique. La méthode du filtre digital est alternative et qui peut impliquer un, deux ou plusieurs paramètres (Lyne et Hollick 1979; Eckhardt 2005). Dans cette thèse la méthode du filtre digital, à un paramètre, proposée par Lyne et Hollick (1979) a été utilisée. Elle est couramment utilisée de nos jours pour la séparation de l'écoulement de base (Mei et Anagnostou 2015). La méthode s'exprime par la formulation suivante :

$$q_t = a_f \times q_{t-1} + \frac{1+a}{2} (Q_t - Q_{t-1}) \quad (4.1)$$

Où q_t est l'écoulement rapide de surface aux pas de temps t , Q_t est le débit total observé aux pas de temps t et a_f est le paramètre du filtre digital, qui dépend des conditions géologiques du bassin versant et peut varier entre 0,925 et 1 (Arnold et Allen 1999). La Figure 4.2 illustre l'effet du paramètre a_f sur le débit de base.

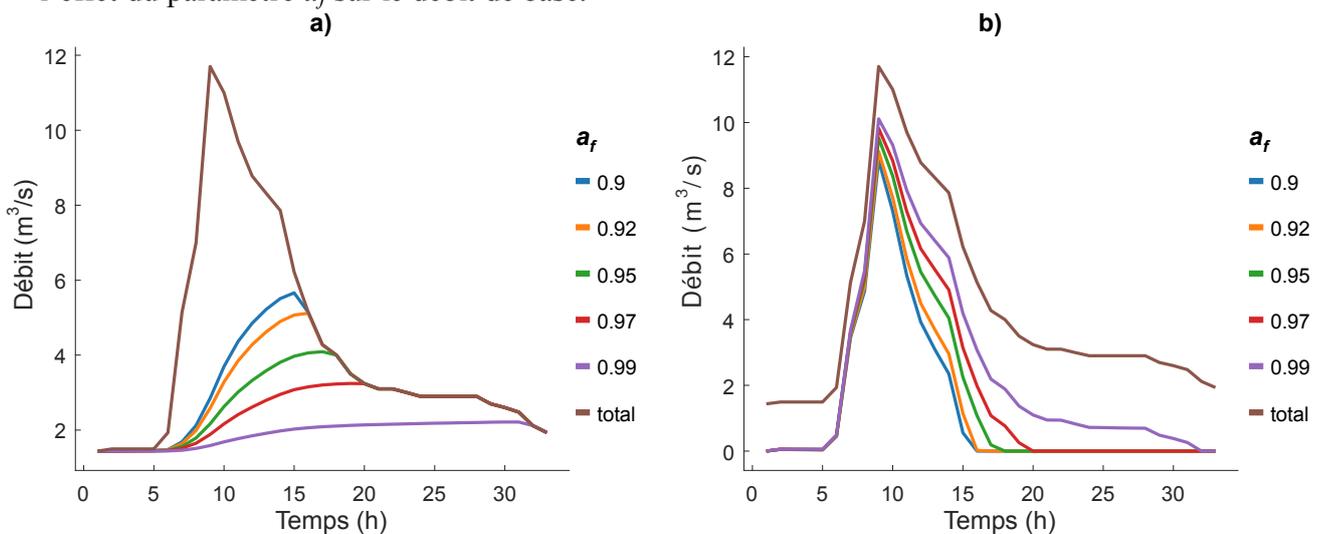


Figure 4.2 L'effet du paramètre a_f sur la séparation des écoulements: (a) les écoulements de base et (b) les écoulements de surface.

Comme illustré dans la Figure 4.2a, le paramètre a_f a un impact sur la forme de la courbe de séparation du débit de base, et donc sur la forme de l'hydrogramme de l'écoulement rapide (Figure 4.2b) et sur le volume du ruissellement observé (R_{obs}). Par conséquent, le paramètre du filtre digital doit être inclus lors du calage en parallèle avec les fonctions de production. Cependant, il convient d'être prudent lors de la détermination du spectre de variations du paramètre du filtre digital afin d'éviter de biaiser les résultats du modèle, car ce paramètre repose principalement sur la géologie du bassin versant et l'interaction eaux souterraines-cours d'eau (Mei et Anagnostou 2015; Abdi et Meddi 2020a, b).

4.3 La fonction de production

Dans un modèle pluie-débit, le module le plus significatif est la fonction de production, qui a pour objectif de définir, à chaque pas de temps, la quantité nette de précipitations qui contribue au ruissellement de surface en soustrayant les différentes pertes qui se produisent. Ces pertes sont souvent assimilées à l'infiltration qui est la perte la plus significative dans la relation pluie-débit. L'interception et le stockage dans les dépressions sont difficiles à estimer dans le cadre d'une modélisation globale car ils dépendent respectivement du couvert végétal et de la géomorphologie du bassin. De ce fait, elles sont exprimées empiriquement comme une fraction de l'infiltration et/ou du degré de saturation du sol. Cependant, à mesure que l'échelle temporelle de la modélisation augmente, l'évapotranspiration devient plus importante (à partir d'un pas de temps journalier) et doit être prise en compte (Perrin 2000; Oudin et al. 2005). De ce fait, dans le cadre de la modélisation des crues éclairs, la fonction de production peut être réduite en un module d'infiltration (Chahinian et al. 2005; Brocca et al. 2011; Nguyen 2019).

4.3.1 La Méthode SCS-CN

La méthode Soil Conservation Service-Curve Number (SCS-CN) (SCS 1972; USDA 1986), qui est renommée en Natural Resource Conservation Service-Curve Number (NRCS-CN), est l'une des méthodes les plus populaires, fiables et attrayante parmi les hydrologues et les professionnels des ressources en eau pour estimer le ruissellement des précipitations (Hawkins et al. 1985; Ponce et Hawkins 1996; Mishra et Singh 2002a, 2013; Shi et al. 2009; Soulis et al. 2009; Abdi et Meddi 2015; Ajmal et al. 2015; Verma et al. 2017b, a; El Khalki et al. 2018b). La méthode SCS-CN a été mise au point pour l'estimation du ruissellement de surface d'un événement orageux donné et la construction d'hydrogrammes de conception dans les bassins versants agricoles Américains de moins de 250 km² (Ponce et Hawkins 1996; Verma et al. 2017b).

La méthode SCS-CN est basée sur l'équation du bilan hydrique (Équation 4.2) ainsi que sur deux hypothèses fondamentales. La première hypothèse assimile le rapport entre le ruissellement direct de surface (R) et la précipitation totale (P) au rapport entre l'infiltration réelle (F) et la capacité de rétention maximale potentielle (S), comme l'indique l'Équation (4.3). La seconde hypothèse relie l'abstraction initiale (I_a) à la capacité de rétention maximale potentielle (S), comme le montre l'Équation (4.4).

$$P = I_a + F + R \quad (4.2)$$

$$\frac{R}{P - I_a} = \frac{F}{S} \quad (4.3)$$

$$I_a = \lambda S \quad (4.4)$$

Où P est la précipitation totale, I_a est l'abstraction initiale, R est le ruissellement direct de surface cumulé, S est la capacité de rétention maximale potentielle du sol, F est l'infiltration cumulée excluant I_a , et λ est le coefficient d'abstraction initiale. Plusieurs études ont supposé que le coefficient λ est constant avec une valeur de 0.2, afin de réduire le nombre de paramètres lors du processus de calage (Ponce et Hawkins 1996). Des études récentes ont, cependant, montré que le coefficient λ prend une valeur autour de 0.05 (Par exemple. Shi et al. 2009; Soulis et al. 2009).

La première hypothèse (Équation 4.3) est principalement un concept de proportionnalité, et la seconde hypothèse (Équation 4.4) est une relation linéaire entre I_a et S . Le couplage de ces deux équations permet d'obtenir l'Équation (4.5) est la forme générale la plus connue de la méthode SCS-CN.

$$R = \frac{(P - I_a)^2}{P + S - I_a} ; \quad \text{Pour } P \geq I_a ; \quad (4.5)$$

$$R = 0 ; \quad \text{Autrement}$$

Le paramètre S , exprimé en mm, varie dans l'intervalle $0 \leq S \leq \infty$, et dépend du type de sol, du type de couvert végétal, de l'utilisation des terres, des conditions hydrologiques, des conditions d'humidité antérieures et du climat du bassin versant. Il est transformé en un paramètre adimensionnel, qui est le curve number (CN), qui varie dans une plage plus attrayante : $0 \leq CN \leq 100$, comme suit :

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (4.6)$$

Les paramètres S et CN sont inversement proportionnels, la valeur numérique la plus élevée possible de CN symbolise une condition de rétention maximale potentielle nulle ($S = 0$), qui dans une situation physique réelle, représente un bassin versant imperméable. Dans le cas contraire, la valeur numérique la plus faible possible de CN indique une situation de rétention maximale potentielle la plus élevée ($S = \infty$), reflétant une situation physique d'un bassin versant infiniment abstrait (aucun ruissèlement ne se produit), ce qui reste une situation improbable dans des conditions réelles (Mishra et al. 2003, 2018b).

Les conditions d'humidité antécédentes (AMCs) sont généralement considérées comme le facteur le plus significatif lors du calcul du ruissèlement, et sont catégorisés en trois niveaux : AMC I (conditions sèches), AMC II (conditions normales ou moyennes), et AMC III (conditions humides), dépendant des précipitations antérieures de cinq jours (P_5) (SCS 1972) comme exprimé dans le tableau 4.1. Une valeur médiane de CN (CN_2) est attribuée à l'AMC II, et pour tout changement d'AMC, CN_2 est converti en CN_1 pour AMC I ou en CN_3 pour AMC III. Plusieurs formules analytiques ont été développées pour exprimer la conversion du CN (Par exemple. Sobhani 1976; Hawkins et al. 1985; Chow et al. 1988; Mishra et al. 2008).

Tableau 4.1 Classification des niveaux d'AMC pour la méthode SCS-CN

Niveau d'AMC	Précipitations antérieures totales de 5 jours (P_5) (mm)	
	Saison dormante	Saison de croissance
I	$P_5 < 12.7$	$P_5 < 35.6$
II	$12.7 \leq P_5 \leq 27.9$	$35.6 \leq P_5 \leq 53.3$
III	$P_5 > 27.9$	$P_5 > 53.3$

Mishra et al. (2008) ont développé des formules de conversion du CN dépendantes des AMCs, qui ont été comparées aux formules existantes, en utilisant des données de terrain extraites de la base de données USDA-ARS¹⁴. Les résultats ont montré que leurs formules offraient de meilleures performances (Ajmal et al. 2015). Par conséquent, Ces formules de conversions, exprimées dans les Équations (4.7) et (4.8), ont été utilisées dans cette thèse.

$$CN_1 = \frac{CN_2}{2.2754 - 0.012754CN_2} \quad (4.7)$$

$$CN_3 = \frac{CN_2}{0.430 + 0.0057CN_2} \quad (4.8)$$

Certains chercheurs se sont penchés sur l'utilisation d'autres indicateurs d'humidité pour établir des conditions antécédentes avant un événement (Longobardi et al. 2003). Brocca et al. (2009b, a) ont examiné l'utilisation des observations de l'humidité du sol près de la surface ainsi que l'utilisation de l'indice des précipitations antécédentes (API) et l'index de débit de base (BFI). Ils ont trouvé que les conditions d'humidité indicatives dérivées par satellite et/ou quelques mesures ponctuelles pourraient être suffisantes pour établir des conditions antécédentes avant un événement.

4.3.2 Les méthodes SCS-CN modifiées

L'objectif d'améliorer un modèle pluie-débit n'est pas rare en hydrologie. La majorité des modèles actuels sont le produit de modifications/améliorations successives qui ont progressivement modifié les caractéristiques de la structure de base (Perrin 2000). Effectivement, La méthode originale SCS-CN a fait l'objet de nombreuses modifications pour améliorer son efficacité et contourner ses limites. Les méthodes potentiellement applicables à notre contexte d'étude sont décrites en détail dans cette section, et seront mises à l'épreuve avec la base de données recueillie.

4.3.2.1 Le model Mishra et al. (2006)

Les AMCs sont assez difficiles à évaluer en raison de la relation discrète entre CN et les niveaux d'AMC, qui entraîne une augmentation soudaine du ruissellement calculé (Mishra et Singh 2002b; Mishra et al. 2018b). Par conséquent, Mishra et Singh (2002b) ont modifié l'équation originale en se basant sur la quantité d'humidité antécédente (AMA) au lieu d'utiliser le concept classique de l'AMC. En fait, Mishra et Singh (2002b) supposé que le

¹⁴ USDA-ARS : Département De L'agriculture Des Etats-Unis – Service de Recherche Agricole. (<https://data.nal.usda.gov/dataset/ars-water-database>)

coefficient de ruissellement et le degré de saturation du sol sont identiques (Équation 4.3). En utilisant ce concept, ils ont modifié l'équation du ruissellement direct en incorporant l'humidité antécédente (V_0) comme l'indique l'Équation (4.9).

$$R = \frac{(P - I_a + V_0)(P - I_a)}{P + S - I_a + V_0}; \quad \text{Pour } P \geq I_a; \quad (4.9)$$

$$R = 0; \quad \text{Autrement}$$

Mishra et al. (2006) ont mis en évidence la forte dépendance des abstractions initiales de l'humidité antécédente, et ont par conséquent modifié la relation I_a-S comme indiqué dans l'Équation (4.10), pour contourner la majeure limitation du modèle de Mishra et Singh (2002b).

$$I_a = \frac{\lambda S^2}{S + V_0} \quad (4.10)$$

Mishra et al. (2006) ont également formulé des équations empiriques liant l'humidité antécédente (V_0) aux précipitations antécédentes de 5 jours (P_5) comme indiqué dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1 Les différents modules de comptabilisation de l'humidité antécédente

ID	Équation empirique de la comptabilisation de l'humidité antécédente (SMA)	
Module HA-1	$V_0 = 0.5 \cdot \left(-(1 + \lambda) \cdot S + \sqrt{((1 + \lambda) \cdot S)^2 + 4P_5 \cdot S} \right)$	(4.11)
Module HA-2	$V_0 = \alpha \cdot \sqrt{P_5 \cdot S}$	(4.12)
Module HA-3	$V_0 = \alpha \cdot P_5$	(4.13)
Module HA-4	$V_0 = \alpha \cdot P_5^\gamma$	(4.14)

α et γ sont des coefficients d'ajustement adimensionnels
 HA est l'abréviation d'Humidité Antécédente

Les modules comptabilisation de l'humidité antécédente (Tableau 4.1) sont des tentatives empiriques pour représenter la relation complexe reliant V_0-P_5 . Le module HA-1, proposé par Mishra et Singh (2002b), qui ne contient aucun paramètre, a une formulation complexe qui a été dérivée empiriquement à partir de données pour un contexte climatique particulier. Cependant, les travaux de Mishra et al. (2006) et Abdi et Meddi (2020a) ont montré en évidence que ce module n'était pas robuste pour différentes conditions climatiques ou géomorphologiques. Le module HA-2 considère une relation V_0-P_5 de forme quadratique. Tandis que le module HA-3 propose une relation linéaire. Les deux contiennent un paramètre d'ajustement adimensionnel nommé α . Abdi et Meddi (2020a) ont proposé une formule généralisée permettant d'ajuster d'avantage la relation complexe V_0-P_5 et d'obtenir de meilleures estimations du ruissellement. Cependant, cette approche implique l'utilisation d'un paramètre supplémentaire (c'est-à-dire, γ), ce qui accroît ainsi le degré de complexité du modèle. Toutefois, dans la littérature scientifique, le module plus utilisé est le module HA-2 (Par exemple, Mishra et al. 2006; Singh et al. 2015; Verma et al. 2017a; Abdi et Meddi 2020b). Par conséquent, par soucis de parcimonie, le module HA-2 a été préféré au module HA-4 dans cette thèse.

4.3.2.2 Le model de Sahu et al. (2010)

Sahu et al. (2010) ont analysé les limites du modèle de Mishra et Singh (2002b) et ont soulevé certains inconvénients. En fait, ils ont souligné qu'il n'y a pas de dépendance explicite de I_a vis-à-vis de V_0 dans le modèle, sachant que I_a repose sur l'interception, le stockage en surface et l'infiltration, qui dépendent fortement de V_0 (Ponce et Hawkins 1996). De plus, ils ont affirmé que le paramètre S est une quantité variable au sein d'un bassin versant dépendant de V_0 . Par conséquent, Sahu et al. (2010) ont proposé une procédure hydrologiquement plus rationnelle pour le calcul du ruissellement (Équation 4.15), en utilisant la rétention maximale potentielle dans une condition aride (S_0) (c'est-à-dire AMC I) qui est indépendante de l'humidité antécédente et dépend entièrement des caractéristiques du bassin versant.

$$R = \frac{(P - I_a)(P - I_a + V_0)}{P - I_a + S_0} ; \quad \text{Pour } P \geq I_a ; \quad (4.15)$$

$$R = 0 ; \quad \text{Autrement}$$

I_a et V_0 sont calculés en utilisant les Équations (4.16) et (4.17), respectivement.

$$I_a = \lambda(S_0 - V_0) \quad (4.16)$$

On peut noter que l'équation (4.16) suppose que I_a dépend explicitement de V_0 , ce qui est proche de la réalité, étant donné que le plus l'humidité antécédente est élevée plus l'abstraction initiale est faible, et vice versa.

$$V_0 = \beta \left[\frac{(P_5 - \lambda S_0)S_0}{(P_5 - \lambda S_0) + S_0} \right] ; \quad \text{Pour } P_5 > \lambda S_0 ; \quad (4.17)$$

$$V_0 = 0 ; \quad \text{Autrement}$$

Où β est un coefficient de proportionnalité.

4.3.2.3 Le model Singh et al. (2015)

Michel et al. (2005) ont signalé plusieurs incohérences structurelles dans la méthode SCS-CN originale et l'ont modifié en termes de paramétrage avec une perception plus saine de la procédure de comptabilisation de l'humidité du sol (SMA) sous-jacente. Bien que la procédure soit plus cohérente du point de vue SMA et introduit l'humidité initiale du sol (V_0) et l'humidité seuil du sol (S_a), cela élimine l'abstraction initial (I_a) pour calculer le ruissellement de surface direct. Cependant, Singh et al. (2015) ont souligné que le modèle de Michel et al. (2005) dépend entièrement de la méthode SCS-CN existante (Équation 4.5), qui omet la procédure SMA de sa première hypothèse fondamentale (Équation 4.3) ou du concept que le coefficient de ruissellement et le degré de saturation du sol sont identiques. De plus, Michel et al. (2005) n'ont pas proposé une méthode pour la quantification de V_0 qui doit être calée pour chaque événement. Après avoir analysé les inconvénients de la méthode proposé par Michel et al. (2005), Singh et al. (2015) ont présenté un modèle hydrologique plus rationnel et structurellement stable, avec une procédure améliorée de comptabilisation de l'humidité du sol (SMA), en utilisant le concept introduit par Mishra et Singh (2002b). La procédure intègre l'humidité initiale (V_0), l'humidité seuil du sol (S_a) et la rétention maximale potentielle absolue (S_b). Le ruissellement est calculé en utilisant les Équations (4.18) – (4.20).

$$R = 0; \quad \text{Si } V_0 \leq S_a - P; \quad (4.18)$$

$$R = \frac{(P + V_0) (P + V_0 - S_a)}{P + S + V_0}; \quad \text{Si } S_a - P \leq V_0 \leq S_a \quad (4.19)$$

$$R = P \left(1 - \frac{(S_b - V_0)^2}{SS_b + P(S_b - V_0)} \right); \quad \text{Si } S_a \leq V_0 \leq S_b \quad (4.20)$$

V_0 est calculé avec le module HA-2 (Équation 4.12), et S_a et S_b sont calculés en utilisant les Équations (4.21) et (4.22).

$$S_a = \beta \times S \quad (4.21)$$

$$S_b = S_a + S \quad (4.22)$$

Où β est un coefficient de proportionnalité.

4.3.2.4 Le model de (Verma et al. 2017a)

Plus récemment, Verma et al. (2017a) ont proposé une procédure SMA améliorée en se basant sur le concept introduit par Mishra et Singh (2002b) et s'inspirant des travaux de Michel et al. (2005) et de Singh et al. (2015). Cependant, ils étaient critiques sur le fait que l'abstraction initiale soit incluse dans l'hypothèse de proportionnalité, car elle est une composante de la perte de précipitations ne contribuant ni à l'infiltration ni au ruissellement, et ont donc proposé une formulation différente. Le ruissellement est calculé en utilisant les Équations (4.23) – (4.25). Les paramètres de la SMA sont calculés identiquement au modèle de Singh et al. (2015) à l'aide des Équations (4.12) et (4.21).

$$R = 0; \quad \text{Si } V_0 \leq S_a - P; \quad (4.23)$$

$$R = \frac{(P - S_a + V_0) (P - S_a + 2 \cdot V_0)}{P - S_a + 2 \cdot V_0 + S}; \quad \text{Si } S_a - P \leq V_0 \leq S_a \quad (4.24)$$

$$R = P \left(1 - \frac{(S_a + S - V_0)^2}{P(S_a + S - V_0) + S(S + V_0)} \right) \quad \text{Si } S_a \leq V_0 \leq S_a + S \quad (4.25)$$

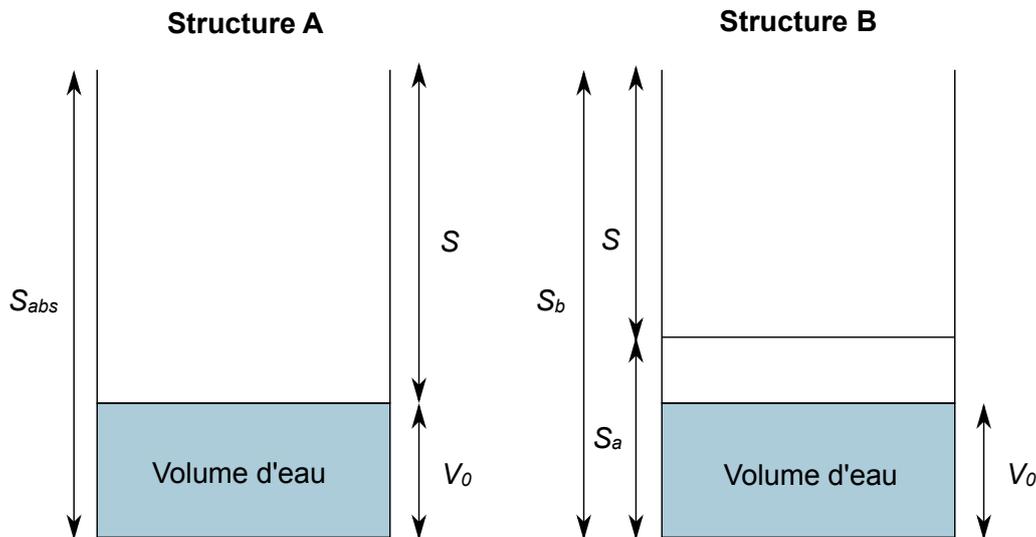


Figure 4.3 Schéma explicatif montrant la réserve d'humidité du sol dans les modèles inspirés du modèle SCS-CN (adapté de Verma et al. (2017a)).

Pour plus de commodité, le modèle original SCS-CN, le modèle de Mishra et al. (2006), le modèle de Sahu et al. (2010), le modèle de Singh et al. (2015) et le modèle de Verma et al. (2017a) sont appelés respectivement M1, M2, M3, M4 et M5 dans le texte à venir. Le Tableau 4.2 résume la formulation de tous ces modèles ainsi que leurs structures d'après la Figure 4.3.

Tableau 4.2 Description et plages des paramètres des modèles

Modèle	Paramètres					
	nombre	Structure	Équation	Symbol	Description	plage
M1	2	-	(4.2)–(4.8)	CN_2	Curve Number Médian [-]	1–100
				λ	Coefficient d'abstraction initiales [-]	0–0.2
M2	3	A	(4.9), (4.10) et (4.12)	S	Capacité de stockage maximale [mm]	0–500
				λ	Coefficient d'abstraction initiales [-]	0–0.2
				α	Coefficient d'ajustement reliant P_5 et S à V_0 [-]	0–1
M3	3	A	(4.15)–(4.17)	S_0	Capacité de stockage maximale [mm]	0–500
				λ	Coefficient d'abstraction initiales [-]	0–0.2
				β	Coefficient d'ajustement reliant P_5 et S à V_0 [-]	0–1
M4	3	B	(4.12) et (4.18)–(4.22)	S	Capacité de stockage maximale [mm]	0–500
				α	Coefficient d'ajustement reliant P_5 et S à V_0 [-]	0–1
				β	Coefficient d'humidité seuil du sol [-]	0–0.2
M5	3	B	(4.12), (4.21) et (4.23)–(4.25)	S	Capacité de stockage maximale [mm]	0–500
				α	Coefficient d'ajustement reliant P_5 et S à V_0 [-]	0–1
				β	Coefficient d'humidité seuil du sol [-]	0–0.2

4.4 La fonction de transfert

L'importance du transfert diminue à mesure que le pas de temps d'étude augmente, et le modèle tend à se simplifier à une fonction de production destinée à contrôler les bilans hydriques. Au fur et à mesure que le pas de temps diminue, le transfert a tendance à être de plus en plus sophistiqué (Perrin 2000; Chahinian et al. 2005).

4.4.1 Le concept de l'hydrogramme unitaire

Le concept d'hydrogramme unitaire (UH) est une approche semi-empirique qui a été développé par Sherman (1932). Il est utilisé pour les bassins versants de petite à moyenne taille pour la détermination de l'hydrogramme de l'écoulement rapide (de surface) à partir du ruissellement direct (précipitation effective ou pluie nette) calculé par les fonctions de productions. Comme mentionné dans la section 2.1.1.3, le concept de l'UH est une méthode couramment utilisé de nos jours dans plusieurs modèles de bassins versants fonctionnels (Dooge 1959; Bruen et Dooge 1984; Chow et al. 1988; Jakeman et al. 1990). Les hypothèses fondamentales implicites dans l'utilisation de l'UH (Figure 4.4a) pour la modélisation des systèmes hydrologiques sont les suivantes (McCarthy 1938; Dooge 1959; Bruen et Dooge 1984; Chow et al. 1988; Hingray et al. 2015) :

- La réponse du bassin versant aux pluies nettes est linéaire : D'une part, cela implique que le principe de proportionnalité s'applique de sorte que les hauteurs de pluies nettes de magnitude différente produisent des réponses de bassin versant qui sont mises à l'échelle en conséquence. D'autre part, cela implique que le principe de superposition s'applique afin que les réponses de plusieurs pluies nettes différentes puissent être superposées pour obtenir la réponse composite du bassin versant (Figure 4.4b).

- La pluie nette est uniformément répartie sur l'ensemble du bassin hydrographique: c'est-à-dire que la réponse du bassin versant à la pluie nette peut donc être décrite de manière globale.
- La réponse hydrologique du bassin versant aux pluies nettes est invariante dans le temps (Figure 4.4c) : la réponse du bassin versant à un incrément de pluie nette donné est la même quel que soit le moment d'occurrence de cette pluie nette. De plus, la durée de l'hydrogramme de ruissellement direct est indépendante de l'intensité effective des précipitations et dépend uniquement de la durée effective des pluies nettes (Figure 4.4b).

Le terme « unité » désigne la durée de référence T de la pluie nette (Par exemple, 30 minutes, 1 heure, 6 heures, etc.). Par conséquent, L'UH d'un bassin versant est l'hydrogramme de ruissellement direct résultant d'une pluie nette de hauteur d et de durée T , uniformément répartie dans l'espace et d'intensité constante sur la durée T . Autrement dit, l'UH d'un bassin versant, pour une durée de référence T , est défini comme étant le débit qui résulterait d'une pluie nette de 1 mm se produisant sur le bassin versant à un taux uniforme dans un temps T (Chapman 1996). Pour des valeurs infiniment petites de T , l'UH est appelé hydrogramme unitaire instantané (UHI), qui est la réponse impulsionnel $u_0(t)$ du bassin versant. D'après Hingray et al. (2015), les principales caractéristiques de l'UH pour une durée de référence T sont le temps de pointe (t_p), le temps de récession (t_r), le temps de concentration (t_c), le temps de latence (t_l) et le temps de base ($t_b = t_p + t_r = T + t_c$) (Figure 4.4a).

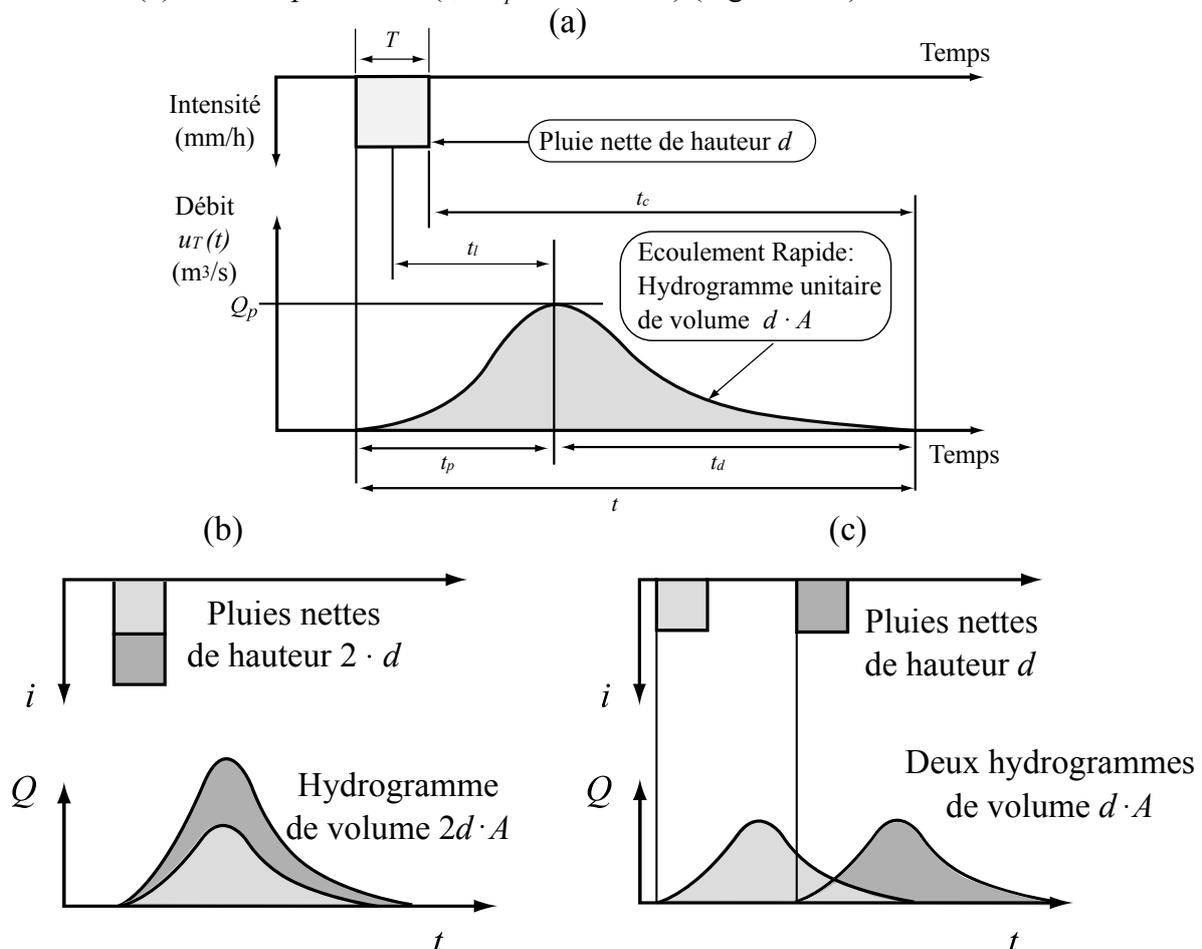


Figure 4.4 Les caractéristiques et les concepts de l'hydrogramme unitaire.

L'hydrogramme de ruissellement direct est obtenu par la convolution discrète de la pluie nette et l'UH comme l'indique l'équation (4.26). Le principe de la technique de convolution est détaillé dans Chow et al. (1988).

$$Q_n = \sum_{m=1}^{n \leq M} r_m \mu_{n-m+1} \quad (4.26)$$

Où Q_n est l'ordonnée de l'hydrogramme de ruissellement direct à un pas de temps discret n , r_m est l'impulsion de pluie nette à un pas de temps discret m , et μ_{n-m+1} est l'ordonnée de l'UH à tout pas de temps discret $n-m+1$. La difficulté primaire dans l'utilisation du concept de l'UH réside dans son identification, comme l'ont souligné plusieurs auteurs (Par exemple. Mawdsley et Tagg 1981; Duband et al. 1993; Chapman 1996). Si les données pluie-débit sont disponibles, de nombreuses techniques peuvent être appliquées pour estimer l'UH du bassin versant. Dans le cas contraire, des méthodes synthétiques doivent être employées. Lorsque des données concomitantes de précipitations et de débits sont disponibles au même pas de temps, la technique de déconvolution, qui est l'inverse de l'opération de convolution présentée dans l'Équation (4.26), peut être employée pour calculer les « N-M+1 » ordonnées de μ (Équations (4.27) ou (4.28)).

$$\begin{bmatrix} r_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ r_2 & r_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ r_3 & r_2 & r_1 & \dots & & & \dots & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ \cdot & & & \dots & & & \dots & & \\ \cdot & & & \dots & & & \dots & & \\ r_M & r_{M-1} & r_{M-2} & \dots & r_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & r_M & r_{M-1} & \dots & & r_1 & \dots & 0 & 0 \\ \cdot & & & \dots & & & \dots & & \cdot \\ \cdot & & & \dots & & & \dots & & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & r_M & r_{M-1} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & r_M \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \mu_3 \\ \vdots \\ \mu_{N-M+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ Q_M \\ Q_{M+1} \\ \cdot \\ \cdot \\ Q_{N-1} \\ Q_N \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

Ou sous la forme condensée :

$$[r] \cdot [\mu] = [Q] \quad (4.28)$$

Où $[u] = [u_1, u_2, \dots, u_{N-M+1}]^T$, est le vecteur des N-M+1 valeurs définissant l'UH recherché. La résolution de l'Équations (4.28) peut être effectuée soit par régression linéaire ou par programmation linéaire. Cependant, Selon Chow et al. (1988), la méthode basée sur la régression linéaire, qui est basée sur des inversions matricielles, est difficile à appliquer et ne garantis pas que toutes les ordonnées de l'UH soient non-négatives. Les méthodes basées sur programmation linéaire sont une alternative pour le calcul des ordonnées de l'UH, où l'Équations (4.28) est énoncée sous la forme d'une fonction objective linéaire à optimiser (l'erreur entre les valeurs du débit observé et simulé) soumise à des équations de contraintes

linéaires (les valeurs de μ sont non-négatives). Cependant, pour des événements pluie-débit complexes, l'identification par ces méthodes suscitée est difficilement applicable et tend à donner des résultats irréalistes et des Hus différents pour chaque événement. En outre, l'UH identifiée pour un événement pluie-débit donné dépend fortement des hypothèses et des méthodes utilisées pour le prétraitement des données associées (fonctions de production et de séparation des écoulements) (Chow et al. 1988; Chapman 1996; Hingray et al. 2015). Ces contraintes ont poussé des auteurs à explorer d'autres méthodes pour identifier l'UH pour un bassin versant en se basant sur le concept de l'HUI (Bruen et Dooge 1984).

4.4.2 Le modèle de Nash (HUI de Nash)

Nash (1957) a proposé un modèle conceptuel basé sur l'hypothèse que le bassin versant est une succession de N réservoirs linéaires identiques connectés en série. L'hydrogramme unitaire instantané (HUI) du modèle de Nash est obtenu en résolvant successivement l'équation de réservoir linéaire pour chacun des réservoirs, ce qui permet d'aboutir à l'Équations (4.29) :

$$\mu(t) = \frac{1}{K \cdot \Gamma(N)} \left(\frac{t}{K} \right)^{(N-1)} \exp \left(- \left(\frac{t}{K} \right) \right) \quad (4.29)$$

Où $\mu(t)$ est l'HUI du bassin versant simulé, N est le nombre de réservoirs en série, K est le coefficient de stockage, t est le temps et Γ est la fonction gamma défini par l'Équations (4.30).

$$\Gamma(N) = \begin{cases} (N-1)! & \forall N \in \mathbb{N} \\ \int_0^{\infty} u^{N-1} \cdot e^{-u} \cdot du & \forall N \in \mathbb{R} \end{cases} \quad (4.30)$$

Le modèle de Nash n'a que deux paramètres, N et K , mais peut s'adapter à une grande variété de formes d'hydrogrammes. D'après Hingray et al. (2015), le paramètre N influence principalement la forme de l'HUI tandis que le paramètre K affecte la position du pic. Toutefois, N et K interviennent tous les deux dans l'expression du temps de pic et du débit de pic de l'HUI comme le montre clairement les Équations (4.31) et (4.32). La Figure 4.5 illustre la sensibilité du modèle à ces deux paramètres.

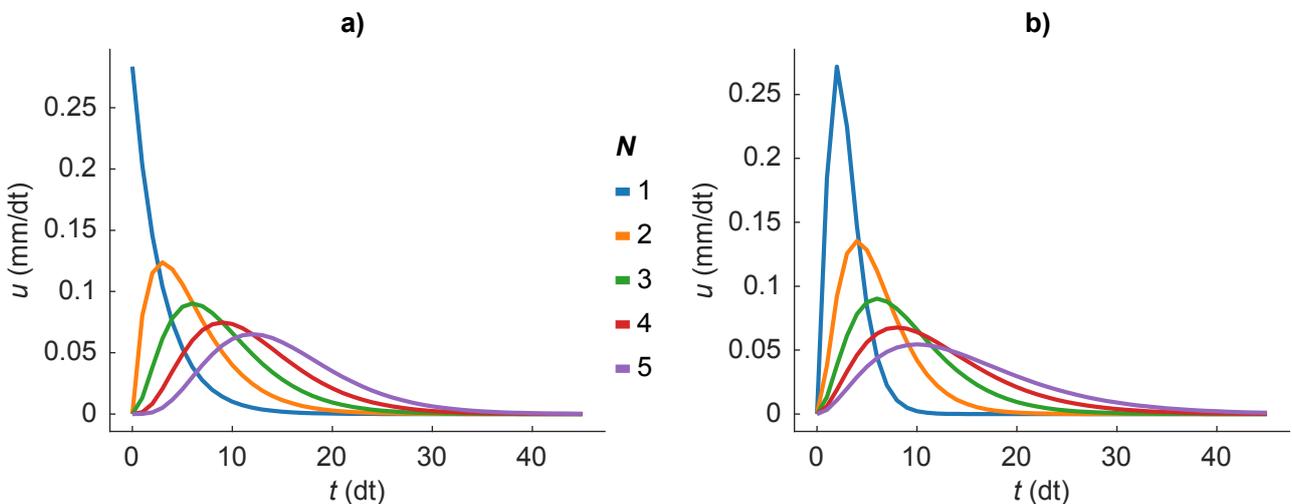


Figure 4.5 La sensibilité des paramètres de l'HUI

$$t_p = K(N-1) \quad (4.31)$$

$$q_p = \frac{1}{K \cdot \Gamma(N)} (N-1)^{(N-1)} \cdot e^{(1-N)} \quad (4.32)$$

Dans cette étude, le choix des modèles de transfert a été fait sur la base d'études menées sur des régions semi-arides et méditerranéennes similaires, dans lesquelles, ils ont fourni des résultats prometteurs (Par exemple. Brocca et al. 2008; El Khalki et al. 2018a).

La Figure 4.6 synthétise l'architecture du modèle pluie-débit ainsi que les modules employés. Les données de base, qui sont la pluie et le débit observé pour chaque évènement, sont simultanément injectées dans le modèle. En fait, le module de production utilise la pluie brute pour calculer la pluie nette ou le ruissellement (R_{sim}), qui est ensuite introduit dans le module de transfert pour générer l'hydrogramme de ruissellement rapide ($Q_{r_{sim}}$). Parallèlement, le module de séparation des écoulements extrait le débit de base, qui est ensuite combiné avec l'hydrogramme de ruissellement rapide pour générer l'ensemble de l'hydrogramme simulé (Q_{sim}).

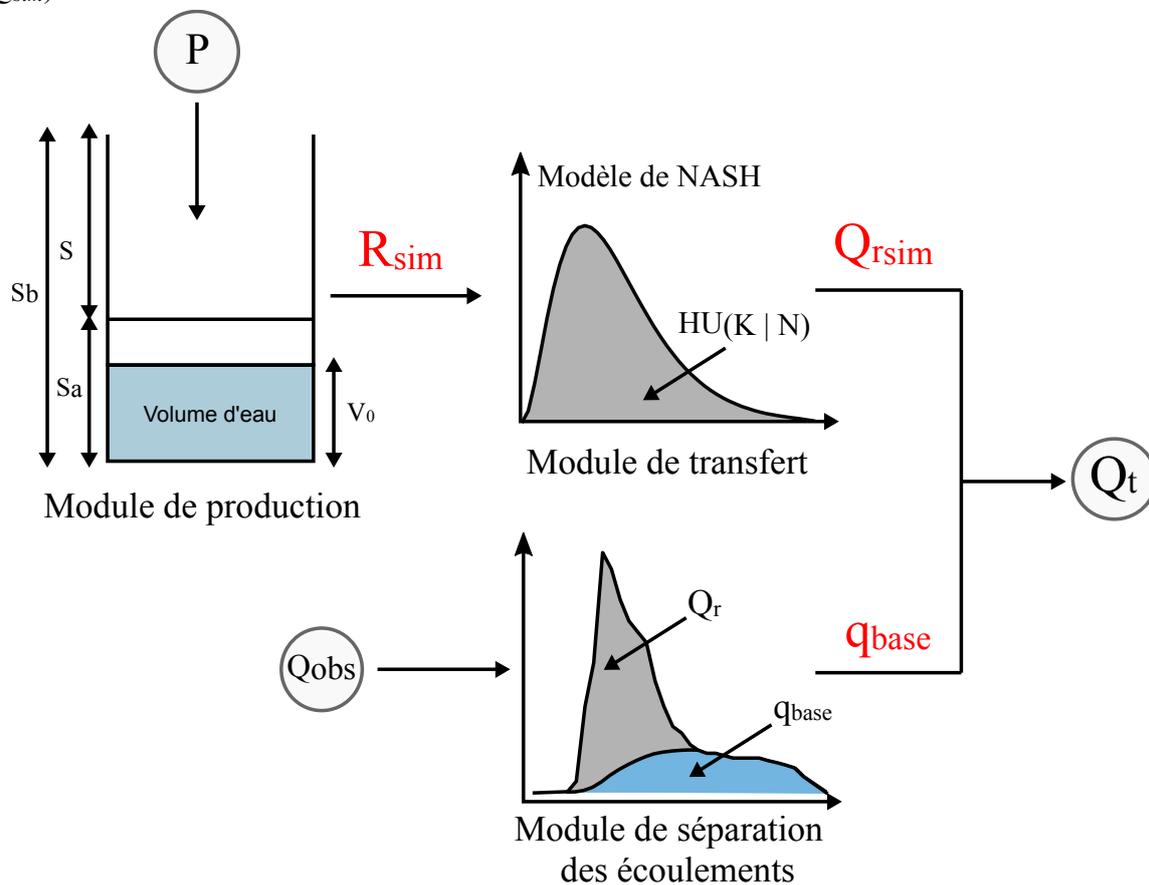


Figure 4.6 La structure générale du modèle pluie-débit développé.

La structure présentée dans la Figure 4.6 est couramment utilisée dans plusieurs modèles pluie-débit évènementiels pour des fins de simulation du comportement hydrologique d'un bassin versant (Chahinian et al. 2005; Perrin et al. 2007; Moussa et al. 2007; Brocca et al. 2009b, 2011; Boutaghane 2016; El Khalki et al. 2018a; Abdi et Meddi 2020a, b). Dans notre thèse, le module de production est différent en fonction du modèle utilisé, mais la structure générale est la même que pour les modèles M1, M2, M3, M4 et M5.

4.5 Modèle de bassin versant proposé

Dans le cadre la prévision des crues en temps réel, un module d'ajustement ou de mise à jours des états du modèle à partir des observations doit être inclus (Berthet 2010). Par conséquent, nous proposons une structure de modèle de bassin versant complet permettant à la fois d'effectuer des simulations du comportement hydrologique du bassin versant et d'effectuer des prévisions en temps réel s'il se montre assez performant lors de la simulation. Toutefois, nous n'avons abordé que le mode simulation dans cette thèse.

En fait, dans un modèle de bassin versant complet, la production et le transfert ne sont pas toujours clairement dissociables, où un réservoir peut jouer un rôle pour chacune de ces deux fonctions. Celles-ci dépendent des paramètres dont les valeurs doivent être calculées pour chaque bassin. La plupart des paramètres sont rarement directement quantifiables et doivent être optimisés via une procédure de calage (Perrin 2000).

De nombreux modèles de bassin versant sont proposés dans la littérature scientifique. Ces modèles se différencient principalement par le nombre de paramètres impliqués, le degré de conceptualisation et l'échelle temporelle d'applicabilité. Dans le domaine des modèles conceptuels globaux, un exemple clair de la complexification progressive de la structure des modèles à mesure que le pas de temps devient plus fin est la chaîne de modèles GR développée à l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (Irstea) par différents auteurs (Michel 1983; Edijatno 1999; Perrin 2000; Perrin et al. 2003; Mathevet 2005; Mouelhi et al. 2006; Le Moine et al. 2007; Le Moine 2008; Pushpalatha et al. 2011). Ces modèles ont été développés pour différents pas de temps spécifiques, à jour : annuel (GR1A), mensuel (GR2M), journalier (GR4J, GR5J, GR6J) et horaire (GR4H, GR5H). Cependant, les modèles GR sont des modèles continus et par conséquent, ils ne sont pas adaptés aux données disponibles.

D'autre part, Fenicia et al. (2011) et Kavetski et Fenicia (2011) ont proposé le cadre SUPERFLEX, qui est un cadre flexible pour la construction de modèles à partir de composants génériques destinés à représenter des fonctions hydrologiques distinctes à l'échelle du bassin versant. Dans ce cadre, les structures du modèle sont hypothétiques et construites à l'aide de composants génériques tels que des réservoirs et des fonctions de décalage (en anglais, Lag), assemblées (connectées) dans un modèle de système couplé à l'aide de jonctions et de flux, et paramétrées à l'aide de fonctions constitutives reliant les états internes et les flux (Fenicia et al. 2014). En effet, Fenicia et al. (2011) ont émis et mis en œuvre 12 structures de modèles alternatives avec un niveau de complexité approprié pour les études portant principalement sur les réponses intégrées à l'échelle du bassin versant.

La structure du modèle M05 du cadre SUPERFLEX a été choisie comme structure de base dans cette thèse parmi les 12 modèles disponibles. Cette structure a été choisie en raison de son degré de conceptualisation qui permet de simuler les principaux processus du bilan hydrique à l'échelle horaire, ainsi que la bonne performance du modèle souligné par Fenicia et al. (2014). Cette structure a été modifiée et adaptée pour une modélisation pluie-débit événementielle à un pas de temps horaire. Dans ce travail, le modèle proposé est appelé modèle MBV (abréviation pour Modèle de Bassin Versant) pour plus de commodité.

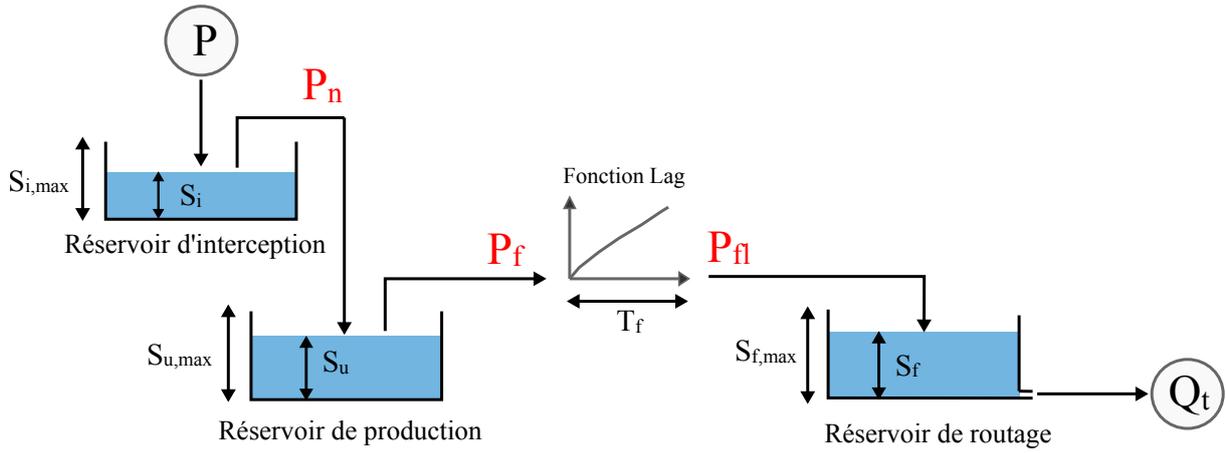


Figure 4.7 La structure du modèle MBV.

Le modèle MBV, comme le montre la Figure 4.7, se compose de deux réservoirs en série : un réservoir de production non saturé et un réservoir de routage rapide reliés par une fonction de décalage. De plus, un réservoir d'interception a été ajouté en amont du réservoir de production qui a pour rôle de modéliser les pertes initiales dont-la détermination est cruciale pour un pas de temps horaire.

Dans les modèles journaliers, l'objectif principal d'un réservoir d'interception est d'intercepter une partie de la pluie par l'ETP. Cependant, les travaux de Mathevet (2005) et de Ficchi (2017) ont souligné l'apparition de biais croissant et des incohérences à mesure que le pas de temps diminue. En conséquence, dans le modèle MBV, le réservoir d'interception a pour rôle d'intercepter une partie de la pluie qui ne participe pas dans le bilan hydrique du bassin versant. Le fonctionnement typique d'un réservoir d'interception est décrit dans les Equations (4.33) et (4.34).

$$P_n(t) = \max(0, P(t) + S_i(t) - S_{i,\max}) \quad (4.33)$$

$$S_i(t+1) = \min(S_{i,\max}, P(t) + S_i(t)) \quad (4.34)$$

Où P est la pluie brute, P_n est la pluie effective qui participe au bilan hydrique, S_i et $S_{i,\max}$ sont, respectivement, la capacité initiale et maximale du réservoir d'interception. Cependant, cette formulation est typique pour une modélisation continue. En effet, il est très difficile d'estimer la capacité initiale du réservoir d'interception pour une modélisation événementielle. Par conséquent, en s'inspirant l'Équation (4.10) proposée par Mishra et al. (2006), nous proposons un réservoir d'interception dont la capacité maximale est représentée par une fraction du réservoir de production, mais également variable en fonction de P_5 . La capacité maximale du réservoir d'interception s'écrit comme suit :

$$S_{i,\max} = \frac{\lambda' \times S_{u,\max}^2}{S_{u,\max} + V_0} \quad (4.35)$$

Où λ' est un coefficient de proportionnalité, $S_{u,\max}$ est la capacité maximale du réservoir de production et V_0 est l'humidité antécédente calculée par le module d'humidité HA-3 (Équation (4.13)). Le flux P_n excédant du réservoir d'interception entre dans le réservoir de production. La pluie nette P_f est obtenue par l'Équation (4.36) :

$$P_f = \theta \times P_n \times \left(\frac{S_u}{S_{u,\max}} \right)^\Omega \quad (4.36)$$

Où P_f est la pluie nette, P_n est la pluie effective obtenu après le passage des pluies brutes par le réservoir d'interception et soustraction des pertes initiales, S_u et $S_{u,\max}$ sont, respectivement, la capacité initiale et maximale du réservoir de production, et θ et Ω sont des paramètres à caler. La mise à jour du stock hydrique du réservoir de production est effectuée comme l'indique l'Équation (4.37).

$$\frac{dS_u}{dt} = P_n - P_f \quad (4.37)$$

Pour le modèle MBV, la fonction de décalage des flux, décrite dans l'Équation (4.38), est appliquée à P_f pour garantir un effet d'atténuation et de translation du ruissellement de surface.

$$P_{fl} = (P_f \otimes h_f)(t) \quad (4.38)$$

Où P_{fl} est le flux des pluies nettes transformé par la fonction h_f et l'opérateur \otimes désigne le produit de convolution comme décrit par l'Équation (4.26).

$$h_f = \begin{cases} t/T_f^{2.5}, & t < T_f \\ 1, & t > T_f \end{cases} \quad (4.39)$$

h_f est la fonction de décalage cumulée dont la somme égale 1. En d'autres termes, dh_f/dt est un hydrogramme unitaire. Le flux P_{fl} entre dans le réservoir de routage. Le débit simulé Q_t est obtenu par l'Équation (4.40):

$$Q_t = K_f \times S_f \quad (4.40)$$

S_f et $S_{f,\max}$ sont, respectivement, la capacité initiale et maximale du réservoir de routage. La mise à jour du stock hydrique du réservoir de routage est effectuée comme l'indique l'Équation (4.41).

$$\frac{dS_f}{dt} = P_{fl} - Q_t \quad (4.41)$$

Pour les modèles continus, une période d'initialisation est préconisée pour estomper l'effet des états initiaux du modèle. Par exemple, pour le modèle GR4J, une période d'initialisation d'une année est recommandée. Cependant, pour un modèle événementiel, l'estimation des états du modèle est effectuée par des indicateurs externes, en l'occurrence P_5 . D'une part, le réservoir d'interception est présumé vide au début de chaque événement pluvieux, du fait de l'introduction d'un réservoir à capacité variable. D'autre part, la capacité initiale du réservoir de production est considérée égale à V_0 pour chaque événement pluvieux. Par ailleurs, le débit de base est modélisé par la méthode du filtre digitale (Équation 4.38) qui sera ajouté au débit Q_t . En conséquence, le réservoir de routage est considéré vide au début de chaque événement pluvieux.

4.6 La méthode d'optimisation

Il existe une pléthore de modèles pluie-débit de complexités diverses pour simuler la relation pluie-débit dont les processus sont hautement non linéaire. La totalité de ces modèles contiennent des paramètres de modèle qui apparaissent dans les équations du modèle sous forme de constantes ou d'exposants et sont généralement non observables à l'échelle des simulations (Yang et al. 2018). La capacité des modèles pluie-débit à capturer les processus hydrologiques du monde réel dépend de la façon dont ces paramètres sont spécifiés (Duan et al. 2006; Pechlivanidis et al. 2014).

En raison de la nature hautement non linéaire des processus hydrologiques, le calage des modèles pluie-débit est confronté à d'énormes défis qui nécessitent des outils mathématiques sophistiqués, des quantités importantes de données d'étalonnage et un certain degré de connaissance des modèles (Clarke 1973; Duan et al. 1993; Pechlivanidis et al. 2011).

Dans la section 2.4.1, nous avons présenté les différentes approches que propose la littérature scientifique pour caler les paramètres d'un modèle hydrologique. Ainsi, dans cette thèse, nous avons opté pour une d'approche d'optimisation globale qui a pour avantage de réduire le risque de converger vers un optima local (Duan et al. 1993). Certaines méthodes globales populaires incluent les Algorithmes Génétiques (AG), les méthodes d'évolution complexes remaniées développées à l'Université de l'Arizona (SCE-UA), l'essaimage de particules (PS), l'optimisation des colonies de fourmis (ACO) et le recuit simulé (SA), entre autres. Beaucoup de ces algorithmes sont également appelés algorithmes évolutifs, car les stratégies de recherche suivent les principes évolutifs (Gupta et al. 2005; Duan et al. 2006; Yang et al. 2018). Toutefois, Duan et al. (1993) ont souligné que chacune de ces méthodes a ces propres forces et limites, ce qui rend le choix de l'algorithme d'optimisation assez fastidieux dans certaines situations.

4.6.1 Les algorithmes génétiques (AG)

Les Algorithmes Génétiques (AG) demeurent l'un des algorithmes évolutionnaires les plus populaires inspirés des processus biologiques de la sélection naturelle (Holland 1975; Goldberg 1989). La sélection naturelle est définie comme les processus par lesquels les organismes survivent et produisent une progéniture avec la tendance à adapter leur environnement. Il existe différents types de processus de sélection naturelle, notamment l'hérédité chromosomique, la mutation, le croisement et la sélection (Yang et al. 2018).

Selon Simpson et al. (1994), l'optimisation d'un problème particulier à l'aide des AG est réalisée grâce aux concepts suivants. D'abord, une population initiale est créée en sélectionnant au hasard un certain nombre d'individus (chromosomes) dans l'espace de recherche. Deuxièmement, la valeur de la fonction objective pour chaque solution réalisable, ou individu, est défini comme l'adaptation du chromosome à son environnement. L'individu (chromosome) avec une meilleure valeur de fonction objective (ou fitness) est supposé posséder de meilleurs gènes (paramètres) et a donc plus de chances d'être sélectionné pour produire la prochaine génération. Les chromosomes avec une meilleure fonction de fitness sont sélectionnés et un opérateur de croisement est appliqué suivi de l'application d'un opérateur de mutation ; enfin, une nouvelle population est générée, plus efficace que la population initiale. Ces opérations sont répétées jusqu'à l'obtention de la solution optimale; le

pourcentage de gènes dans chaque chromosome parent à traverser, à transférer et à muter est défini comme des paramètres d'algorithme (Wang 1991; Holland 1992; Zucco et al. 2015). Plus de détails peuvent être obtenus dans Golberg (1989) ou Yang et al. (2018). De plus, aucune propriété mathématique de la fonction objective n'est prise en compte, ce qui rend les AG plus généralement applicables et robustes (Liong et al. 1995).

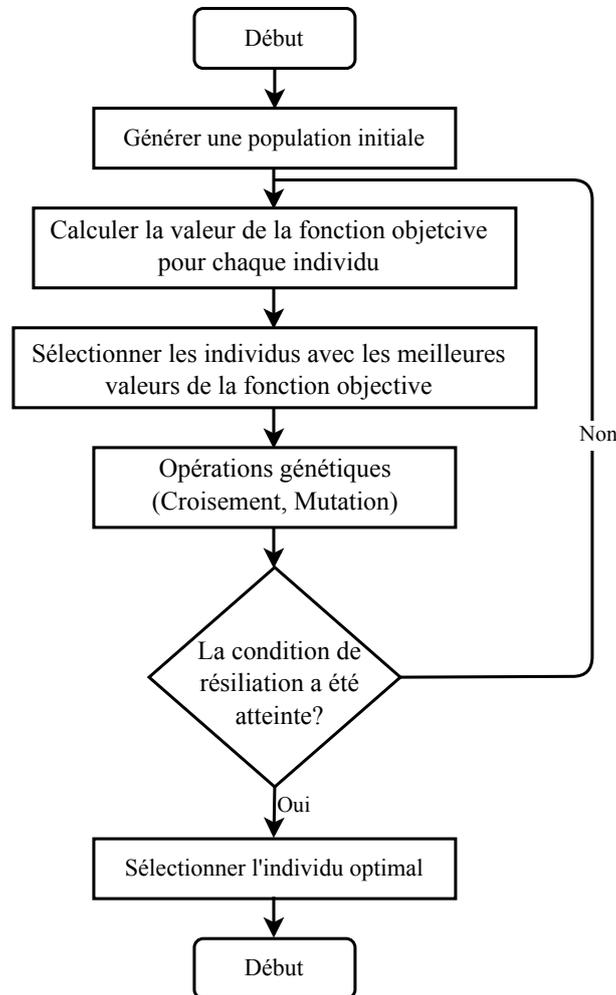


Figure 4.8 La procédure généralisée de mise en œuvre des AG d'après Katoch et al. (2021)

La Figure 4.8 illustre la procédure généralisée de mise en œuvre des AG, qui se résume comme suit :

1. Définir la fonction objective :

Attribuer une fonction objective: $F(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$, où n est le nombre de dimension.

2. L'initialisation :

Échantillonner au hasard k individus dans l'espace des paramètres pour former la population $P = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}$. Chaque p_i est défini comme un chromosome individuel comme indiqué dans l'encadré 1 en pointillés de la Figure 4.9.

3. La sélection:

Évaluer la fonction objective pour tous les individus de la population et sélectionner de manière récursive deux individus comme parents pour produire une progéniture. Dans

l'exemple illustré à la Figure 4.9, les chromosomes 1 et 2 sont sélectionnés comme parents. Les membres d'élite, c'est-à-dire les individus ayant des valeurs de condition physique élevées, sont également sélectionnés et directement copiés vers la prochaine génération sans aucun changement.

4. Le croisement :

La production de la progéniture est d'abord réalisée par opération de croisement sur les individus parentaux sélectionnés. Il existe de nombreux types d'opérations de croisement, comme le montre l'encadré 2 en pointillés de la Figure 4.9 : (a) le croisement en un seul point, (b) le croisement en deux points et (c) le croisement arithmétique gènes.

5. La mutation :

Comme le montre l'encadré 3 en pointillés de la Figure 4.9, après l'opération de croisement, une partie des gènes de la descendance est capable de muter de $g(i)$ à $g'(i)$. La mutation est effectuée en ajoutant un petit nombre aléatoire aux valeurs des gènes de la progéniture qui sont sélectionnés pour muter au cours d'une itération. Cette stratégie de mutation empêche la population de piéger dans des minima locaux, et de converger prématurément. Les nouveaux gènes $g'(i)$ sont recopiés dans chaque progéniture et remplacent les gènes originaux $g(i)$.

6. La nouvelle génération :

La nouvelle population pour la génération $(t+1)$ se compose de la progéniture issue des opérations de croisement et de mutation, ainsi que des membres d'élite directement copiés de la génération précédente (t) .

7. La résiliation :

Les étapes (3) à (6) sont répétées jusqu'à ce que les critères d'arrêt soient remplis, c'est-à-dire que le nombre total d'évaluations de fonction atteigne le maximum défini par l'utilisateur, le nombre total de génération atteigne le maximum défini par l'utilisateur ou les changements relatifs moyens des valeurs de la fonction objective sur une période le nombre de génération est inférieur à la tolérance de fonction, etc.

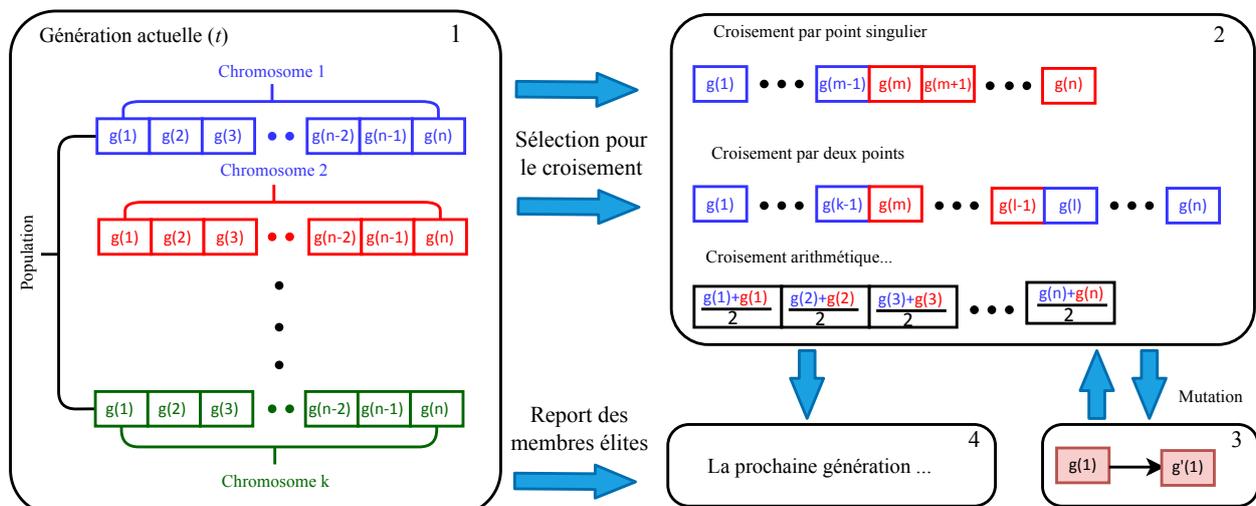


Figure 4.9 Diagramme conceptuel montrant les procédures des AG, c'est-à-dire les opérations de croisement, de transfert et de mutation de la génération t à $t+1$, tiré de Yang et al. (2018).

Plusieurs travaux de recherches ont démontré la capacité des AG à optimiser convenablement les paramètres d'un modèle pluie-débit conceptuel (Par exemple, Wang 1991; Franchini 1996; Balascio et al. 1998; Madsen 2000; Babovic et Keijzer 2002; Blasone et al. 2006; Wu et al. 2012; El Fels et al. 2017). Le concept des AG reste applicable lorsqu'il s'agit d'un problème à fonctions objectives multiples; le problème de calage peut être formulé comme suit (Madsen 2000) :

$$\min[F_1(\theta), F_2(\theta), \dots, F_m(\theta)] \quad (4.42)$$

Où $F_i(\theta)$ ($i=1,2,\dots,m$) sont les différentes fonctions objectives et θ représente le jeu de paramètres. Les algorithmes évolutionnaires multi-objectifs qui utilisent le tri et le partage non dominés ont été principalement critiqués pour leur (i) complexité de calcul, (ii) une approche non élitiste, et (iii) la nécessité de spécifier un paramètre de partage. Deb et al. (2000) ont proposé un algorithme évolutif multi-objectif basé sur le tri non dominé (Non-dominated Sorting GA-II ou (NSGA-II) qui atténue les trois difficultés ci-dessus. Cette approche sera utilisée comme méthode d'optimisation dans notre travail et la version de l'algorithme NSGA-II développé par Heris (2015) a été implémenté dans le modèle d'optimisation. La solution de l'Equation (4.42) n'est pas, en général, un seul et unique ensemble de paramètres mais se compose du soi-disant ensemble de solutions de Pareto, selon différents compromis entre les différentes fonctions objectives (Georgiades et al. 2019), comme le montre la Figure 4.10.

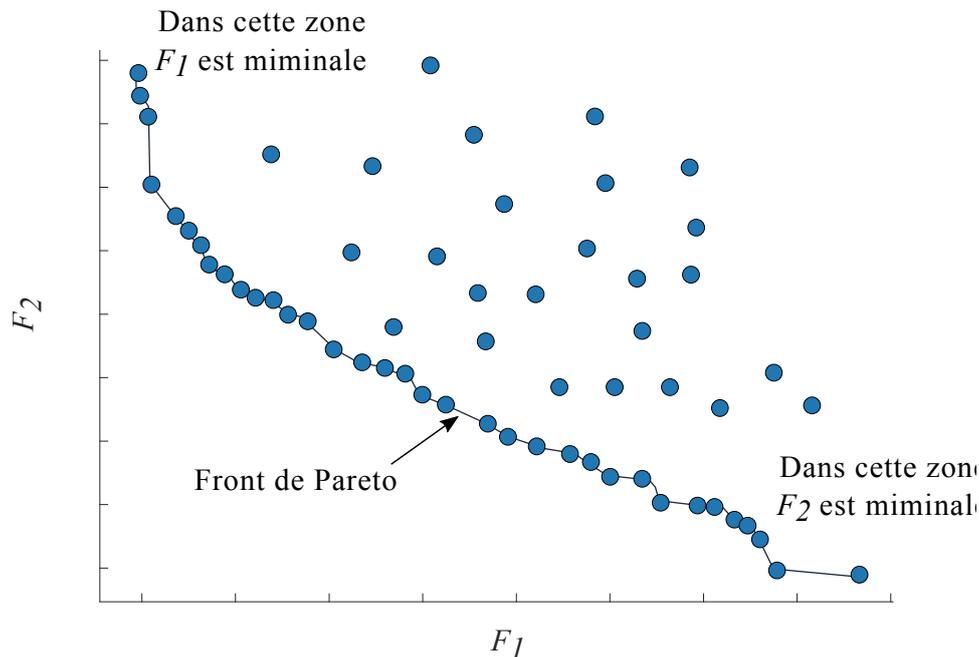


Figure 4.10 Schéma explicatif de l'ensemble de solution de Pareto (front de Pareto) pour le cas d'un problème d'optimisation à deux fonctions objectives.

Le choix de la solution optimale du front de Pareto n'est pas évident, mais il doit être effectué par un hydrologue aguerri maîtrisant le modèle et ayant une bonne connaissance des processus hydrologiques impliqués (Rao et Lakshmi 2021). Généralement, lorsqu'il s'agit de calibration multi-objectifs, le problème est transformé en un problème d'optimisation mono-objectif en définissant un scalaire qui agrège les différentes fonctions objectives (Madsen 2003; Hundecha et Bárdossy 2004; Moussa et Chahinian 2009; Abdi et Meddi 2020a, b).

Cependant, cette approche comporte des inconvénients lors de l'agrégation des fonctions objectives car il est difficile de s'assurer que chacune des fonctions objectives soit équipondérée. En outre, des méthodes de prise de décision multicritère (En anglais: Multi-Criteria Decision Making Methods (MCDM)) peuvent être employées pour sélectionner une bonne alternative parmi le nombre prédéterminé d'alternatives.

La Technique pour l'ordre de préférence par similarité à la solution idéale (En anglais : Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)), proposée par Hwang et al. (1993) et Lai et al. (1994), fait partie des méthodes MCDM les plus utilisées par les chercheurs pour sélectionner la meilleure solution de Pareto parmi les solutions non dominées disponibles (Tavana et al. 2016; Akbari et al. 2017; Lin et al. 2019; Xu et al. 2020; Yusuf et al. 2021). En fait, les alternatives sont initialement classées en fonction de leur similitude avec une solution idéale, qui est la meilleure à tous égards et peut donc pratiquement ne pas exister. L'alternative qui a une similitude plus élevée avec la meilleure solution est mieux notée que les alternatives qui ont une valeur de similarité inférieure.

D'après Thakkar (2021), l'approche TOPSIS consiste à identifier la distance de chaque alternative à la solution idéale et à choisir la meilleure alternative en fonction de cette distance. La méthodologie globale consiste à comparer un ensemble d'alternatives basées sur les poids attribués à chaque critère d'évaluation, puis à calculer les valeurs normalisées de ces scores, qui sont ensuite utilisées pour calculer la distance géométrique à partir d'une solution idéale (Hwang et al. 1993; Lai et al. 1994; Thakkar 2021). Les étapes complètes d'une application typique de TOPSIS sont illustrées à la Figure 4.11, et la procédure en détail est donné dans l'annexe B.

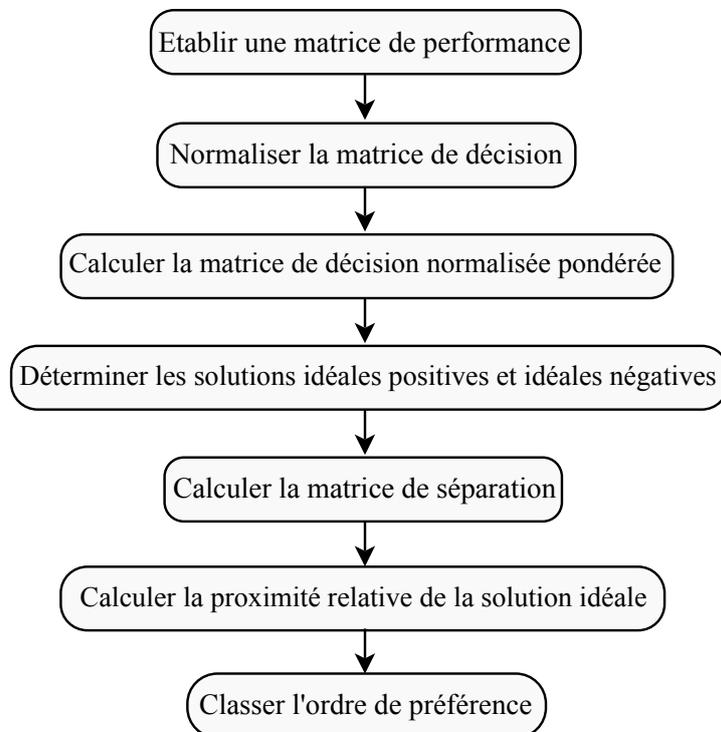


Figure 4.11 La procédure TOPSIS, tiré de Thakkar (2021)

L'avantage majeur de la méthode TOPSIS par rapport aux autres techniques réside dans sa simplicité et son efficacité lors de la mesure des performances relatives de chaque alternative (Tobiszewski et al. 2015; Ahmadisharaf et al. 2016). Cependant, à l'instar des autres méthodes MCDM, La solution obtenue par TOPSIS est directement lié aux attributs sélectionnés, ce qui représente un problème en cas de non-identification des attributs clés. De plus, étant donné que les distances euclidiennes sont utilisées dans TOPSIS, la corrélation entre les attributs n'est pas prise en compte, et il est difficile de déterminer le poids des critères et aussi d'assurer la cohérence du jugement. La version de la méthode TOPSIS proposé par Pereira (2021) a été implémenté dans le modèle d'optimisation dans cette thèse.

4.7 Les critères de performance

Le processus d'évaluation de la performance d'un modèle hydrologique nécessite des estimations à la fois subjectives et objectives de la relation qui existe entre le débit simulé et le débit observé. La méthode la plus fondamentale pour évaluer les performances du modèle en termes de comportement fonctionnel consiste à inspecter visuellement les différences entre les hydrogrammes simulés et observés. Ce faisant, l'hydrologue peut formuler des évaluations subjectives du comportement du modèle par rapport au comportement systématique (Par exemple, sur-prévision ou sous-prévision) et dynamique (synchronisation temporelle, la courbe de montée, la courbe de décrue) du modèle. Pour une évaluation objective, cependant, l'hydrologue exigera la production d'une ou plusieurs estimations mathématiques de l'erreur qui se produit entre l'enregistrement des séries chronologiques hydrologiques simulées et observées (Chahinian et al. 2005; Dawson et al. 2007; Moussa et Chahinian 2009; Bennett et al. 2013). Par conséquent, l'évaluation des performances des modèles est essentielle pour guider l'identification des modèles et également pour l'estimation de leurs paramètres (Liu 2020).

Dans la littérature scientifique, plusieurs auteurs ont émis des constats et des recommandations concernant le choix des critères de performances et leur utilisation. En effet, Berthet (2010), en s'inspirant des travaux de Linsley (1982), a émis un constat concernant l'accroissement pléthorique des critères de performance, et le fait que les hydrologues choisissent très souvent des critères qui leur sont propres (ou raffinent des critères utilisés largement par la communauté), qui ont pour effet de limiter les possibilités de comparaison des résultats des expériences de modélisation. ASCE (1993) a examiné un certain nombre de critères de performance pour l'évaluation des modèles hydrologiques qui ont été divisés en deux catégories distinctes; ceux pour évaluer les hydrogrammes continus et ceux qui devraient être appliqués aux modèles événementiels. De même, Mathevet (2005) a exprimé le besoin de critère adimensionnel d'évaluation des erreurs des modèles afin de permettre non seulement la comparaison de plusieurs modèles sur un même bassin, mais également sur plusieurs bassins aux caractéristiques différentes. En outre, Dawson et al. (2007) ont déploré un manque de cohérence dans la manière dont les modèles hydrologiques sont évalués, ce qui handicape la comparaison des études rapportées et entrave le développement de modèles supérieurs. Ainsi, pour des fins de transparence et de cohérence, ils ont proposé un site Web HydroTest (<https://hydrotest.org.uk>) qui fournit un large éventail de mesures objectives et de tests cohérents de performance du modèle pour évaluer les compétences en matière de prévision.

En se basant sur les recommandations des différents auteurs, et compte tenu du fait que les évènements sélectionnés sont d'amplitudes différentes (voir Figure 3.10), il faut s'assurer qu'ils ont des poids similaires lors de l'évaluation des performances des modèles. En d'autres termes, si nous n'utilisons pas des critères de performances normalisés, les résultats de la modélisation seront biaisés et les grands évènements seront favorisés au détriment des petits évènements (Chahinian et al. 2005; Abdi et Meddi 2020a, b).

Nous avons utilisé les critères numériques suivants, qui sont couramment utilisés dans les études de modèles hydrologiques. Toutefois, pour plus de précision, ces critères ont été répartis en deux catégories : les critères de performances volumétriques et les critères de performances volumétriques.

4.7.1 Les critères volumétriques :

Les critères volumétriques ont pour but d'évaluer l'aptitude des modèles productions à prédire les volumes des crues. On a préconisé les critères suivant :

- L'erreur absolue moyenne (MAE) qui s'exprime:

$$MAE = \frac{1}{N_{ev}} \sum_{i=1}^{N_{ev}} (|V_{obs} - V_{sim}|)_i \quad (4.43)$$

Avec N_{ev} est le nombre d'évènements, V_{obs} et V_{sim} sont respectivement les volumes de crues observés et simulés. Le critère MAE est un critère de performance global dont la valeur optimale est 0.

- L'erreur relative absolue moyenne (MARE) a pour expression:

$$MARE = \frac{1}{N_{ev}} \sum_{i=1}^{N_{ev}} \left(\frac{|V_{obs} - V_{sim}|}{R_{obs}} \right)_i \quad (4.44)$$

Le critère MARE est un critère de performance global dont la valeur optimale est 0.

- Le pourcentage de biais (PBIAS) à l'échelle de l'évènement peut être écrit comme suit :

$$PBIAS_i = 100 \times \left(\frac{V_{obs} - V_{sim}}{V_{obs}} \right)_i \quad (4.45)$$

Le critère numérique PBAIS est un critère de performance individuel pour chaque évènement. Sa valeur optimale est 0. Cependant, il est utilisé pour dériver le critère BIAS qui est un indicateur global des biais des modèles.

$$BIAS = \frac{1}{N_{ev}} \sum_{i=1}^{N_{ev}} PBIAS_i \quad (4.46)$$

Le critère numérique BIAS est très semblable au critère de performance MARE. Cependant, ils n'ont pas la même fonction. En effet, le critère de performance MARE indique l'erreur relative absolue moyenne des modèles pour tous les évènements. Par contre, le BIAS permet de savoir, globalement, si un modèle a surévalué ou a sous-évalué les volumes des évènements.

4.7.2 Les critères hydrométriques :

Les critères hydrométriques ont pour but d'évaluer la capacité des modèles à reproduire les formes des hydrogrammes de crues, les débits de pointes et leur temps d'apparition. On a utilisé les critères suivant :

- L'erreur quadratique moyenne normalisée (NRMSE), qui facilite la comparaison entre des ensembles de données ou des modèles à différentes échelles. Nous avons utilisé la formulation suivante :

$$NRMSE_i = \left[\frac{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{N_t} (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{N_t}}}{\mu_{obs}} \right]_i \quad (4.47)$$

Où Q_{obs} et Q_{sim} sont, respectivement, les débits observés et simulés, μ_{obs} est le débit moyen de l'hydrogramme de l'évènement i et N_t et la durée de l'hydrogramme de l'évènement i . La valeur optimale du critère de performance NRMSE est 0.

- L'erreur relative moyenne de débit de pointe (PPEAK) est utilisée pour exprimer la différence entre le débit de pointe observé et le débit de pointe simulé à l'échelle de l'évènement.

$$PPEAK_i = 100 \times \left(\frac{Q_{obs}^{pic} - Q_{sim}^{pic}}{Q_{obs}^{pic}} \right)_i \quad (4.48)$$

Où Q_{obs}^{pic} et Q_{sim}^{pic} sont, respectivement, le débit de pointe observé et le débit de pointe simulé. La valeur optimale du critère de performance PPEAK est 0.

- L'erreur moyenne absolue sur le temps d'apparition des débits de pointes (TPEAK).

$$TPEAK = \frac{1}{N_{ev}} \sum_{i=1}^{N_{ev}} (|T_{obs}^{pic} - T_{sim}^{pic}|)_i \quad (4.49)$$

Où T_{obs}^{pic} et T_{sim}^{pic} sont, respectivement, le temps d'apparition du débit de pointe observés et le temps d'apparition du débit de pointe simulé. La valeur optimale du critère de performance TPEAK est 0.

- Le critère adimensionnel Kling–Gupta efficiency (KGE) (Gupta et al. 2009) et sa version modifiée KGE' (Kling et al. 2012), qui sont définis comme suit :

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (A-1)^2 + (B-1)^2} \quad (4.50)$$

$$KGE' = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (B-1)^2 + (C-1)^2} \quad (4.51)$$

Où A est le rapport des variances, B est le biais du modèle, r est le coefficient de corrélation et C est le rapport des coefficients de variation, donnés par les relations ci-dessous :

$$A = \frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} \quad B = \frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} \quad C = \frac{CV_{sim}}{CV_{obs}} \quad (4.52)$$

Où σ est l'écart-type, μ est le débit moyen et CV est le coefficient de variation. En fait, le critère KGE combine les trois composantes du critère de Nash-Sutcliffe (NSE) (c'est-à-dire la corrélation, le biais, le rapport des variances ou les coefficients de variation) d'une manière plus équilibrée, ce qui le rend plus précis (Gupta et al. 2009; Zhu et al. 2016; Liu 2020). Le KGE et sa version modifiée KGE' ont été largement utilisés pour le calage et l'évaluation des modèles hydrologiques ces dernières années (Par exemple, le package airGR (Coron et al. 2017)). Les critères KGE et KGE' sont calculé pour chaque évènement, et leur valeur optimale est 1.

Toutefois, Il est important de souligner que deux modes sont possibles pour le calage des modèles. En fait, pour le cas des modèles composés de fonctions de production et de transfert distinctes, il est possible de calé chaque fonction appart (calage par palier), c'est-à-dire que les paramètres des fonctions de productions peuvent être obtenus en utilisant les critères de performances globaux adéquats qui sont les critères MAE, MARE et BIAS. Ensuite, les résultats obtenus sont utilisé pour calé les fonctions de transfert en utilisant les critères numériques KGE, KGE', PPEAK, TPEAK et NRMSE. Cette approche a pour avantage de limiter la propagation de l'erreur entre les différentes fonctions (Chahinian et al. 2005). Cependant, cette approche n'est pas applicable pour le cas des modèles de bassin de versants complet où la production et transfert ne sont pas toujours clairement dissociables. Dans ce travail nous optons pour un calage complet qui est plus facile et plus rapide à mettre en œuvre.

4.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la mise au point d'un modèle pluie débit pour la simulation du comportement intégré des bassins versant pour un pas de temps horaire. L'effet d'échelle implique la prépondérance de certains processus tel que les pertes initiales, l'infiltration et le routage. En conséquence, la structure du modèle pluie-débit doit être méticuleusement établie. En effet, un module de séparation de l'écoulement de base est introduit pour éliminer la composante souterraine de l'écoulement que ne nous pouvons pas modéliser avec des données événementielles. Plusieurs modèles de production ont été sélectionnés ; le modèle SCS-CN associé à l'AMC et 4 modèles SCS-CN modifiés basés sur la comptabilisation de l'humidité antécédente. Ensuite, le modèle de transfert de NASH est utilisé pour la détermination des hydrogrammes. D'autre part, le modèle MBV ayant une structure différente de celles basées sur le modèle SCS-CN inspiré d'un modèle pluie-débit journalier et adapté pour un pas de temps horaire, a été proposé.

Par ailleurs, ce chapitre aborde la procédure de calage multicritère basée sur l'algorithme d'optimisation NSGA-II, qui permet d'obtenir l'ensemble de solution de Pareto, associé à l'algorithme d'aide à la décision TOPSIS pour sélectionner le meilleur jeu de paramètres. Enfin, les critères de performances utilisés à la fois pour caler les modèles et pour évaluer leurs performances ont été présentés.

Le chapitre suivant sera dédié à la présentation des résultats obtenus avec les différents modèles proposés. De plus, une analyse de la cohérence et de la consistance des structures sera abordée.

Chapitre 5

Comparaison des performances de modèles pluie-débit au pas de temps horaire

“An experiment is a question which science poses to Nature, and a measurement is the recording of Nature’s answer” Max Planck

Dans la littérature scientifique, on trouve une pléthore de modèles hydrologiques avec différents niveaux de complexité. Ces modèles partagent tous un problème général qui est la difficulté de vérifier leur fiabilité lorsqu'ils sont appliqués à l'étude de bassins aux climats, sols et utilisations des terres différents. Par conséquent, l'étude des performances et de la robustesse ainsi que la fiabilité de ces modèles doit être menée de manière rigoureuse afin d'identifier le modèle le plus adéquat tout en étant fiable et parcimonieux

Introduction

Ce chapitre s'intéresse à l'analyse des performances, de la robustesse et de la fiabilité des modèles testés dans les bassins versants étudiés. En effet, une analyse globale des performances est menée dans un premier temps pour déterminer la structure la plus adéquate pour la région d'étude, puis nous tentons de mettre en évidence une complémentarité potentielle entre les différentes structures des modèles, ainsi que la présence de variables géomorphologiques pouvant impacter les paramètres du modèle.

5.1 L'évaluation des performances des modèles testés

Les 6 structures de modèles présentées dans le Chapitre 4 ont été testées sur un échantillon de 5 bassins versants, soit un ensemble de 94 événements. Les sous-ensembles de calage et de validations ont été abordés dans le Chapitre 3.

Les résultats obtenus sont issus d'un mode de calage complet (cf. section 4.7) multi-objectifs par l'application de l'algorithme d'optimisation NSGA-II pour la génération de l'ensemble de solutions de Pareto, et de l'algorithme TOPSIS pour sélectionner la meilleure alternative parmi les solutions possible. Les valeurs des critères de performances obtenus lors du calage et lors de la validation ont été analysées. Les résultats du calage reflètent la capacité d'apprentissage du modèle, tandis que les résultats de validation indiquent la capacité d'un modèle à imiter le débit d'un bassin versant, dans des conditions hydrologiques distinctes de celles de la phase d'apprentissage, sans modifier les paramètres.

Dans un premier temps, on évalue les performances des modèles dans chaque bassin versant, ce qui constitue une évaluation individuelle des modèles sur un bassin versant donné. Dans un second temps, on évalue les performances des modèles d'une manière globale en incluant les 5 bassins versants, ce qui constitue une évaluation régionale (ou globale) des modèles.

Afin d'apporter une interprétation approfondie des résultats obtenus, elle a été séparée en deux parties distinctes; la première partie a été consacré à l'évaluation des fonctions de production, donc de la capacité des modèles à reproduire les volumes observés selon les critères de performances BIAS, MAE et MARE. La seconde partie a été dirigée sur l'évaluation des modèles à reproduire la forme des hydrogrammes observés selon les critères de performances KGE et PPEAK...etc.

5.2. La performances volumétriques des modèles

Le Tableau 5.1 montre les résultats des six modèles pluie-débit testés selon les critères de performances BIAS, MAE et MARE obtenus lors du calage et de la validation. La première étape de l'évaluation des performances des modèles consiste en l'évaluation du critère BIAS, qui est une mesure des biais des modèles, indiquant une surestimation globale (obtenue sur l'ensemble des événements) si supérieur à 0 et une sous-estimation globale si inférieur à 0. En effet, la valeur du critère BIAS permet de vérifier que l'algorithme d'optimisation et les fonctions objectives choisis garantissent des poids égaux pour les événements de magnitudes différentes.

D'après les résultats présentés dans le Tableau 5.1, On ne constate pas une dégradation significative des valeurs du critère BIAS entre la période de calage et de validation, ce qui indique que le processus de calage a bien pris en compte les magnitudes des différents événements, sauf pour le bassin versant d'El Kebir, où des biais globaux négatifs ont été observés pour les modèles SCS-CN modifiés. Toutefois, la dégradation du BIAS entre la période de calage et de validation a été plus importante pour le modèle M1 que pour les autres modèles. En outre, les résultats du Tableau 5.1 indiquent que le modèle M1, qui est le modèle SCS-CN basé sur l'AMC, a été le plus médiocre en termes de performances à la fois pour le calage et la validation, notamment pour le bassin versant d'El Kebir, pour lequel les critères MAE et MARE durant la validation étaient respectivement de 1.17 mm et 33.5%.

Tableau 5.1 Les résultats des modèles basés sur leur capacité à prédire les volumes des cures

Bassins		Critères																	
		BIAS [%]						MAE [mm]						MARE [%]					
		M1	M2	M3	M4	M5	MBV	M1	M2	M3	M4	M5	MBV	M1	M2	M3	M4	M5	MBV
El Kebir	C	-9.0	0.0	0.0	-1.4	-3.1	0.8	0.58	0.09	0.10	0.09	0.10	0.19	32.1	4.3	7.5	5.3	6.3	10.3
	V	-2.7	-9.9	-11.0	-11.2	-12.7	-0.8	1.17	0.32	0.43	0.34	0.38	0.32	33.5	9.9	13.7	11.2	12.7	10.9
	G	-6.4	-4.1	-4.5	-5.4	-7.0	0.1	0.82	0.18	0.24	0.19	0.21	0.25	32.7	6.6	10.1	7.7	8.9	10.6
Timgad	C	-6.6	0.0	-3.1	-0.1	-3.3	-5.9	1.49	0.57	0.45	0.53	0.47	1.05	19.8	3.3	10.6	3.9	4.1	15.9
	V	4.4	-2.8	-7.9	2.3	-1.2	11.6	0.92	1.81	1.17	1.68	1.72	1.44	21.4	7.8	12.5	8.8	12.0	15.4
	G	-2.0	-1.2	-5.1	0.9	-2.4	1.4	1.25	1.09	0.75	1.00	0.99	1.21	20.5	5.2	11.4	6.0	7.4	15.7
Zerdassas	C	-6.1	0.0	-0.8	1.0	-0.3	-0.27	0.90	0.28	0.20	0.27	0.28	0.31	15.6	4.9	7.6	6.4	7.5	7.4
	V	17.7	0.6	6.3	2.4	1.6	0.45	2.14	0.43	0.50	0.43	0.41	0.97	25.7	6.2	8.6	6.3	6.1	8.1
	G	3.7	0.3	1.6	1.6	0.5	0.0	1.41	0.34	0.42	0.34	0.33	0.58	19.8	5.5	7.8	6.3	6.9	7.6
Allalah	C	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.0	-0.4	0.70	0.51	0.52	0.49	0.55	0.50	21.5	10.3	13.0	9.1	10.4	11.4
	V	9.4	5.9	0.5	1.8	1.5	3.2	1.04	0.42	0.43	0.38	0.39	0.39	27.7	11.9	11.5	9.6	11.2	9.8
	G	-3.8	-2.4	-0.2	-0.7	0.0	1.0	0.83	0.47	0.49	0.44	0.49	0.45	24.0	10.9	12.4	9.3	10.7	10.8
Boubhir	C	0.2	0.0	0.0	0.4	-3.8	-2.3	1.57	0.29	0.32	0.19	0.46	0.28	19.6	3.9	4.6	4.3	5.6	7.1
	V	14.7	5.8	2.4	4.3	1.9	-0.9	3.27	0.91	0.52	0.73	0.54	0.45	24.4	7.6	4.8	6.2	4.7	4.5
	G	4.2	2.1	2.3	1.4	-2.5	-1.5	2.05	0.48	0.37	0.36	0.46	0.32	21.0	5.1	5.9	5.1	5.8	5.6

Note: Les valeurs en gras montrent les modèles statistiquement plus efficaces basés sur un critère spécifique.

C: Calage

V: Validation

G : Globale (Périodes de Calage et de validation confondues)

De même, pour le bassin de Zerdassas lors de la validation où les critères MAE et MARE étaient de 2.14 mm et 25.7%, respectivement. De surcroît, le MAE obtenu lors de la validation pour le bassin versant de Boubhir a pris une valeur de 3.27 mm, qui dépassait largement celle des autres modèles.

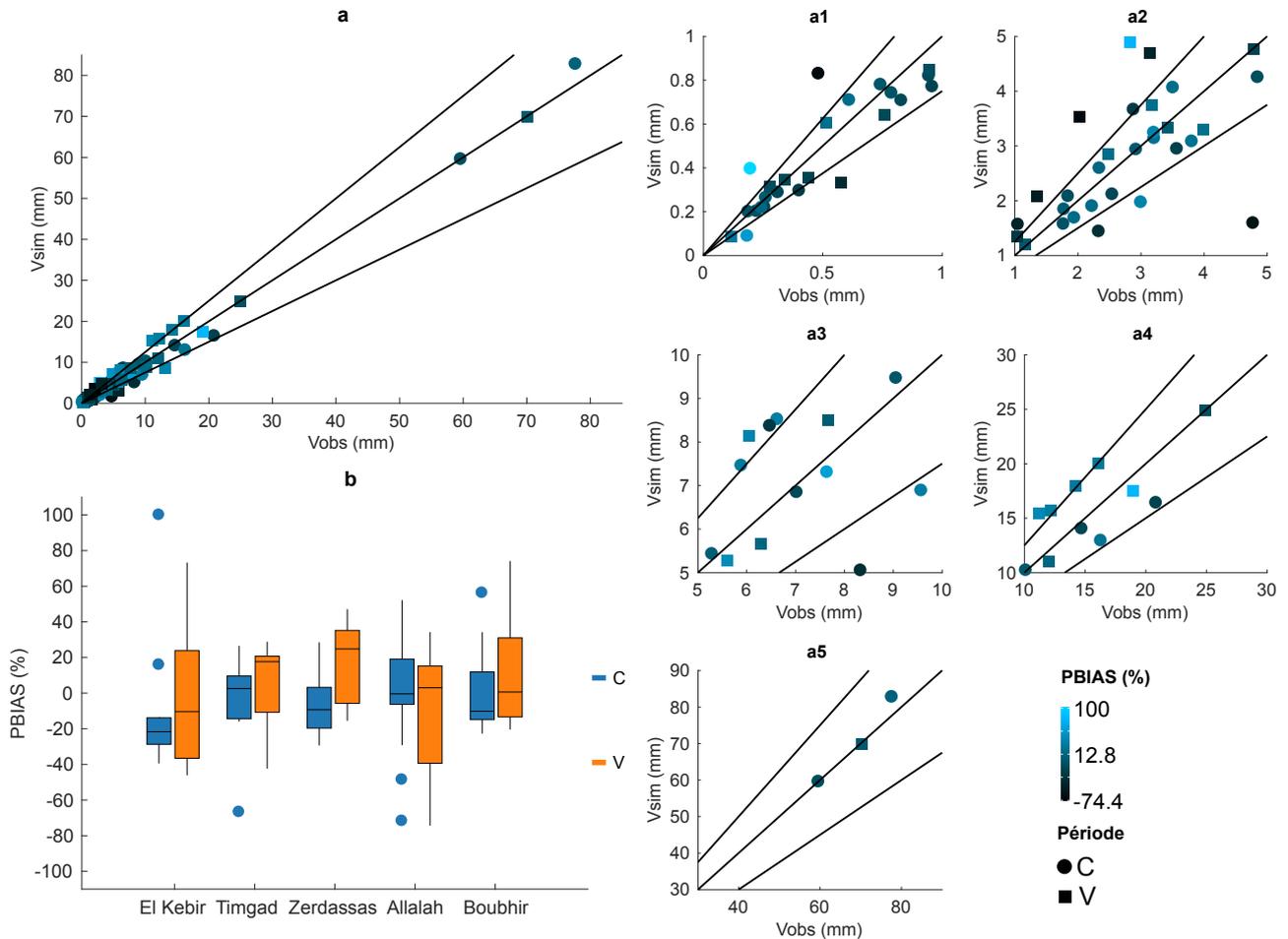


Figure 5.1 Les résultats du modèle M1 pour l'ensemble des bassins versant (C: Calage et V: Validation); a) illustrant le nuage de points des volumes simulés versus les volumes observés, et b) illustrant les diagrammes en boîte (Boxplots) basés sur le critère PBIAS.

Le nuage de points des volumes simulés en fonction des volumes observés de tous les bassins versants combinés, ainsi que les valeurs du critère PBIAS, sont présentés sur la figure 5.1a. Cependant, en raison du large spectre de variation de l'échantillonnage des volumes, une visualisation précise des résultats était impossible. En conséquence, nous avons produit des sous-figures (Figures a1–a5) en modifiant l'échelle des abscisses et des ordonnées. De plus, la Figure 5.1b, qui représente une boîte à moustaches (Boxplot) des résultats du modèle M1 en fonction du critère PBIAS, fournit une évaluation supplémentaire et individuelle des performances du modèle. Un diagramme en boîte synthétise la distribution des performances d'un modèle en indiquant les quantiles 2.5%, 10%, 50%, 90% et 97.5% et la moyenne des résultats.

Nous avons remarqué que le modèle M1 a produit des résultats insatisfaisants pour tous les bassins versants examinés. En effet, à plusieurs reprises, les valeurs du critère PBIAS ont

dépassé la plage admissible de $\pm 25\%$ (Moriassi et al. 2007) pour tous les bassins versants avec le modèle M1, notamment pour le bassin versant d'El Kebir et d'Allalah où des valeurs du critère PBIAS très éloignées de la plage admissible ont été observées. En revanche, selon les résultats présentés dans le Tableau 5.1, les modèles SCS-CN modifiés (c'est-à-dire M2, M3, M4 et M5), ainsi que le modèle à réservoir MBV, étaient plus efficaces que le modèle M1, où une amélioration significative des critères de performance MAE et MARE a été observée, à l'exception du bassin de Timgad, où le critère MAE était « accidentellement » le plus bas lors de la validation tandis que le critère MARE était le plus élevé.

Par conséquent, l'utilisation du concept de l'AMA a amélioré les résultats de prévision du ruissellement par rapport à l'utilisation du concept de l'AMC, qui n'as pas permis une modélisation appropriée de la réponse hydrologique des bassins étudiés, en raison du bond soudain du *CN* qui constitue la limitation majeure de l'utilisation de l'AMC, comme de nombreux auteurs l'ont souligné (Par exemple, Ponce et Hawkins 1996; Mishra et al. 2006; Ajmal et al. 2015; Verma et al. 2017; Abdi et Meddi 2020). Néanmoins, il convient de souligner que les équations de conversion du *CN* en fonction des AMC (Équations (4.7) et (4.8)) ont été établies pour des conditions climatiques complètement différentes de celles de la région étudiée dans cette thèse. Ainsi, le modèle M1 a été retiré de la liste des modèles candidats à tester pour la reproduction des hydrogrammes de crues.

Bien que des résultats différents aient été enregistrés, il n'y avait pas de classification précise et distincte entre les modèles M2, M3, M4, M5 et MBV en fonction de leur capacité à prédire le volume de ruissellement. En effet, selon le Tableau 5.1, la valeur minimale du critère MAE pour le bassin versant d'El Kebir a été obtenue pour les modèles M2 et M4 lors du calage prenant une valeur de 0.09 mm, tandis qu'en validation, ce sont les modèles M2 et MBV qui ont enregistré les valeurs minimales du critère MAE avec une valeur de 0.32 mm. Toutefois, globalement, c'est le modèle M2 qui a été le plus performant pour le bassin versant d'El Kebir sur la base des critères MAE et MARE qui ont pris, respectivement, des valeurs de 0.18 mm et de 6.6%. De plus, pour le bassin versant de Timgad, le modèle M3 a donné les valeurs du critère MAE les plus basses lors du calage et de la validation, tout comme le modèle M2 pour le critère MARE. Par ailleurs, les plus faibles valeurs enregistrées des critères MAE et MARE était pour le modèle M4 pour le bassin versant d'Allalah à la fois pour le calage et la validation. En revanche, la plus basse valeur du critère MAE pour le bassin de Boubhir a été obtenue pour le modèle MBV, et la valeur minimale du critère MARE a été enregistré à la fois pour le modèle M2 et le modèle M4.

Selon les Figures 5.2a–5.2e, qui illustrent les résultats du critère PBIAS en boîtes à moustaches pour les modèles (sauf pour le modèle M1, qui a déjà été retiré), nous avons noté une différence notable du comportement des modèles. En effet, les modèles modifiés M2, M3, M4 et M5 ont assuré des valeurs du critère PBIAS les plus proches de la plage admissible par rapport au modèle MBV, pour lequel des valeurs extrêmes du critère PBIAS au-delà de la plage admissible ont été observées, particulièrement pour les bassins versants de Timgad, Zerdassas et Boubhir avec des valeurs au-delà de $\pm 30\%$. De plus, nous avons noté des intervalles interquartiles plus larges pour le modèle MBV, indiquant que les valeurs du critère PBIAS pour ce modèle sont plus dispersées. En revanche, Le modèle MBV a surpassé certains modèles SCS-CN modifiés selon le critère MAE.

D'autre part, le modèle M3 a donné de mauvais résultats par rapport aux autres modèles modifiés, avec des résultats du critère PBIAS plus éloignés de la plage admissible, atteignant -29.1% pour le bassin versant d'Allalah et 26.7% pour le bassin versant de Boubhir, ainsi que des intervalles interquartiles assez larges.

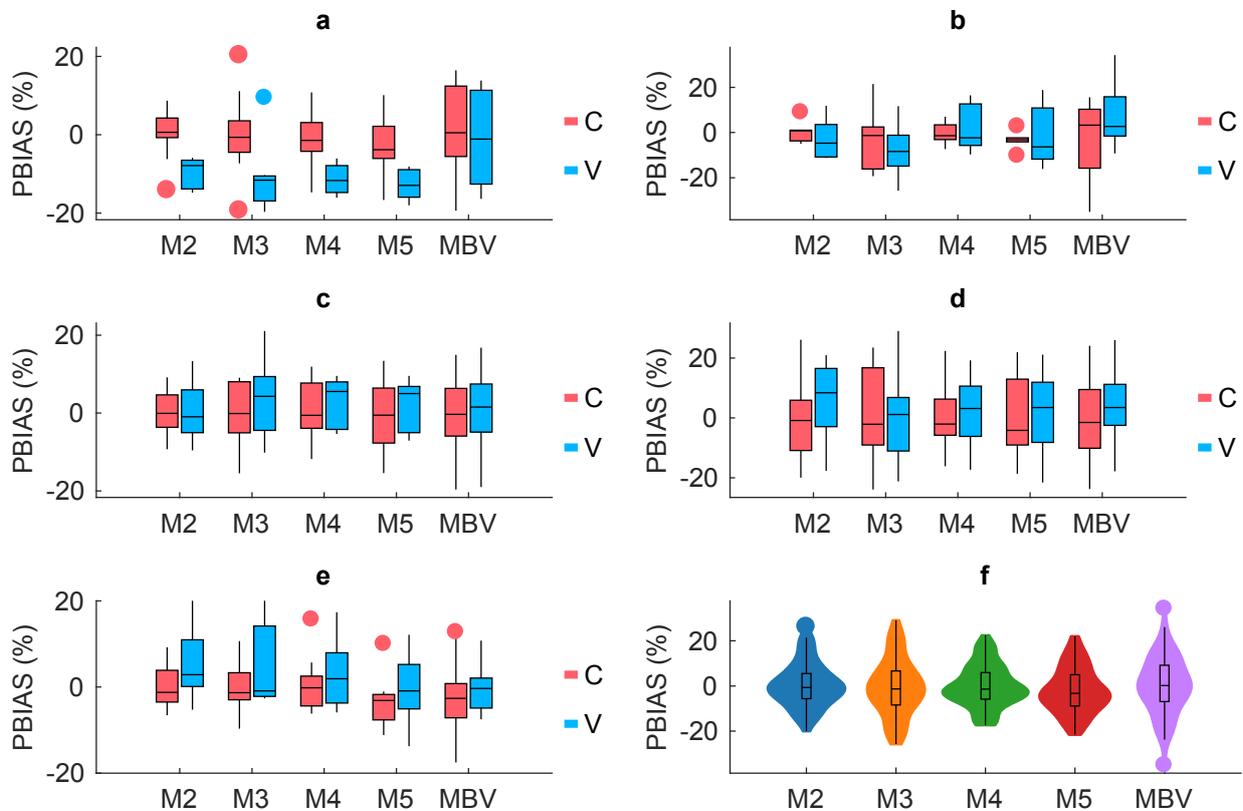


Figure 5.2 Comparaison des résultats des modèles en termes du critère PBIAS : sous forme de boîtes à moustache pour ; a) le bassin versant d'El Kebir, b) le bassin versant de Timgad, c) le bassin versant de Zerdassas, d) le bassin versant d'Allalah, e) le bassin versant de Boubhir et f) sous forme de diagramme en violon pour l'ensemble de données des bassins versants.

De surcroît, la Figure 5.2f a été établie pour fournir un résumé complet des performances des modèles en termes de PBIAS pour les bassins étudiés. En fait, elle illustre les résultats du critère PBIAS pour les 94 événements combinés sous la forme d'un diagramme en violon (en anglais : violin plot), permettant la visualisation de la densité de probabilité des valeurs lissées par un estimateur de densité à noyau, en plus de toutes les informations disponibles dans une boîte à moustaches. Le modèle M4, comme le montre la Figure 5.2f, est le modèle pour lequel les valeurs PBIAS sont plus denses vers la valeur idéale (c'est-à-dire 0). Les modèles M2 et M5 étaient juste derrière, avec des densités comparables, mais leurs intervalles interquartiles étaient plus étendus. Puis vint le modèle M3, qui avait une densité plus faible autour de la valeur idéale, et enfin, le modèle MBV, qui avait la plus grande dispersion des valeurs du critère PBIAS. D'autre part, les modèles modifiés (c'est-à-dire, M2, M3, M4 et M5) ont quatre paramètres à optimiser, tandis que le modèle MBV en a six. En conséquence, le modèle MBV est plus complexe que les modèles SCS-CN modifiés. En général, les modèles les plus complexes sont censés être les plus efficaces puisque chaque paramètre reflète un processus spécifique, affinant ainsi la représentation du système à modéliser. Toutefois, le

sur-paramétrage augmente la complexité des modèles, ce qui peut les empêcher d'atteindre leurs performances potentielles (Perrin et al. 2001; Willems et al. 2014), et générer l'équifinalité des paramètres, qui est un problème important en modélisation hydrologique, comme l'ont souligné Beven et Binley (1992). Par conséquent, pour choisir le modèle le plus efficace, compte tenu de l'effet du nombre de paramètres, il faut appliquer les critères de sélection des modèles, tel que le critère d'information d'Akaike (AIC) (Akaike 1974) et le critère d'information bayésien (BIC) (Schwarz 1978), qui différencient les modèles en fonction de leurs performances du nombre de paramètres qu'ils contiennent (Symonds et Moussalli 2011; Bennett et al. 2013; Asl-Rousta et al. 2017; Chien et Mackay 2019). Cependant, malgré sa plus grande complexité, le modèle MBV s'est avéré moins résilient et adaptable à certains scénarios pluvieux. En fait, la structure à réservoirs du modèle MBV est souvent utilisée pour la modélisation pluie-débit en continu à des pas de temps journaliers. En conséquence, notre tentative d'utiliser cette structure à un pas de temps sous-journalier tout en estimant les états du modèle à l'aide d'indicateurs externes s'est révélé limitée pour certains événements pluvieux. Ainsi, le modèle MBV a été retiré de la liste des modèles candidats sans avoir à employer les critères de sélection des modèles.

Compte tenu des résultats susmentionnés, le choix d'un modèle « ultime » répondant à tous les critères pour tous les bassins versants est une tâche difficile. De plus, étant donné que les modèles SCS-CN modifiés sont tous du même niveau de complexité et diffèrent principalement par leurs structures, les critères de sélection des modèles tels que les critères AIC et BIC ne sont pas pertinents. En conséquence, un examen plus approfondi du comportement et de la structure des modèles a été mené.

5.3. Analyse structurale et paramétriques des modèles

Les paramètres optimaux des fonctions de production des modèles obtenus avec l'algorithme NSGA-II et sélectionnés par la suite à l'aide de la méthode TOPSIS, sont présentés dans le Tableau 5.2. Comme le montre la Figure 5.3a, nous n'avons constaté aucune différence significative entre les paramètres de capacité de stockage maximale des modèles dans les bassins versants étudiés. En revanche, la principale différence réside dans les paramètres d'humidité initiale et les paramètres du processus de pertes (c'est-à-dire, les pertes initiales et l'humidité seuil).

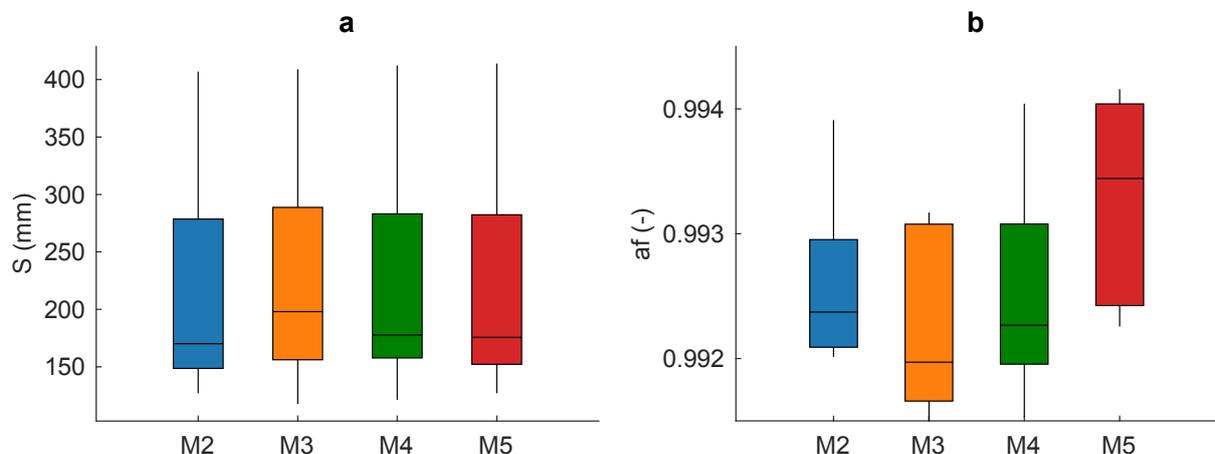


Figure 5.3 La variabilité des paramètres : a) la capacité maximale de rétention et b) le coefficient du filtre digitale pour la séparation du débit de base

Tableau 5.2 Les paramètres optimaux des modèles obtenus avec l'algorithme NSGA-II et sélectionnés par l'algorithme TOPSIS

Bassin	Modèle															
	M2				M3				M4				M5			
	S	λ	α	α_f	S_0	λ	β	α_f	S	α	β	α_f	S	α	β	α_f
El Kébir	406.9	0.010	0.075	0.992	408.9	0.007	0.112	0.993	412.3	0.019	0.037	0.993	413.9	0.012	0.025	0.992
Timgad	127.0	0.043	0.241	0.994	117.8	0.044	0.321	0.993	121.3	0.067	0.077	0.994	127.1	0.044	0.06	0.993
Zerdassas	235.8	0.010	0.304	0.993	248.7	0.003	0.889	0.992	240.1	0.022	0.146	0.992	238.4	0.015	0.11	0.992
Allalah	156.0	0.028	0.242	0.992	169.1	0.022	0.500	0.991	169.9	0.039	0.077	0.992	160.7	0.026	0.055	0.994
Bouhbir	170.1	0.017	0.206	0.992	198.1	0.006	0.422	0.992	177.7	0.029	0.089	0.992	175.6	0.022	0.069	0.994

Théoriquement, la séparation des écoulements de base est indépendante de la structure du modèle de production et dépend entièrement des conditions géologiques et géomorphologiques. Cependant, le paramètre a_f a été laissé libre afin de garantir une flexibilité aux modèles pour qu'ils puissent s'ajuster aux différents événements dans différentes conditions, en plus du fait de la nature des données hydrométriques, qui se trouvent parfois tronquées. Autrement dit, la séparation des écoulements dépend des conditions géologiques mais également influencée par la structure de la fonction de production. En effet, comme indiqué sur la Figure 5.3b, on constate une légère différence pour le paramètre a_f du filtre digitale, qui a pris des valeurs plus élevées pour le modèle M5 et des valeurs plus réduites pour le modèle M3.

De plus, étant donné que les modèles ont des structures et des équations complètement différentes, une comparaison directe des paramètres optimaux obtenus pour les divers modèles serait triviale et non pertinente. Néanmoins, Le modèle M2 est le modèle plus similaire au modèle original SCS-CN. Les coefficients des pertes initiales obtenues pour ce modèle étaient 0.010 pour le bassin versant d'El Kébir, 0.043 pour le bassin versant de Timgad, 0.010 pour le bassin versant de Zerdassas, 0.028 pour le bassin versant d'Allalah, et 0.017 pour le bassin versant de Boubhir. En effet, Woodward et al. (2003) ont examiné le coefficient d'abstractions initiales pour plus de 300 bassins versants et ils ont conclu que l'hypothèse d'une valeur de 0.2 était inhabituellement élevée et par conséquent, ils ont suggéré une valeur de 0.05. Baltas et al. (2007) ont étudié ce coefficient dans un bassin versant expérimental en Grèce, et ils ont constaté qu'il variait de 0,014 à 0,054 et que sa valeur moyenne était de 0,037 pour le bassin versant de l'étude ; ces résultats ont été repris ensuite par Soulis et al. (2009). De même, Shi et al. (2009) ont constaté que le coefficient de pertes initiales de la région des Trois Gorges en Chine variait de 0,010 à 0,154 et que sa valeur moyenne était égale à 0,053. Ces études, entre autres, ont attribué la variation du coefficient de pertes initiales aux différences d'occupation du sol, de géologie et de climat entre les bassins versants (Singh et Frevert 2002), ce qui corrobore les résultats trouvés à l'aide du modèle M2 pour les bassins versants étudiés.

La Figure 5.4 a été conçue afin d'établir une comparaison directe entre les modules de calcul de l'humidité initiale pour chacun des modèles. En effet, la Figure 5.4 illustre les valeurs d'humidités initiales dérivées à l'aide des paramètres optimaux des modèles (Tableau 5.2) pour diverses valeurs de P_5 pour l'ensemble des bassins versants étudiés. Toutefois, il convient de rappeler que l'humidité initiale des modèles M2, M4 et M5 a été calculée à l'aide du module d'humidité HA-2 (Équation (4.12)), tandis que l'humidité initiale du modèle M3 a été calculée à l'aide de l'Équation (4.17). En fait, nous avons identifié une anomalie physique lors de l'estimation de l'humidité initiale avec le modèle M2, qui consiste en une surestimation de l'humidité initiale (M) pour les faibles valeurs de P_5 . Cette irrégularité a été observée pour tous les bassins versants ; elle était plus apparente dans le bassin de Zerdassas (Figure 5.4c) et moins prononcée dans le bassin versant d'El Kebir (Figure 5.4a). Cependant, pour les modèles M4 et M5, qui emploient le même module d'humidité que le modèle M2, les résultats obtenus semblent physiquement plausibles, avec des valeurs de M en dessous de P_5 sauf pour le bassin de Zerdassas, où les valeurs de M ont été quelque peu surévaluées. D'autre part, nous notons que le module d'humidité du modèle M3 a garanti le fait que les valeurs de M étaient

inférieures à P_5 pour tous les bassins versants. En effet, le modèle M3 utilise une valeur seuil P_5 en dessous de laquelle l'influence de l'humidité initiale est négligée. Cependant, contrairement aux modèles M2, M4 et M5 dans lesquels les valeurs de M avaient tendance à se stabiliser à mesure que P_5 augmentait, comme le montre la Figure 5.4, les valeurs de M avec le modèle M3 ont été amplifiées avec une augmentation de P_5 , ce qui est physiquement incohérent.

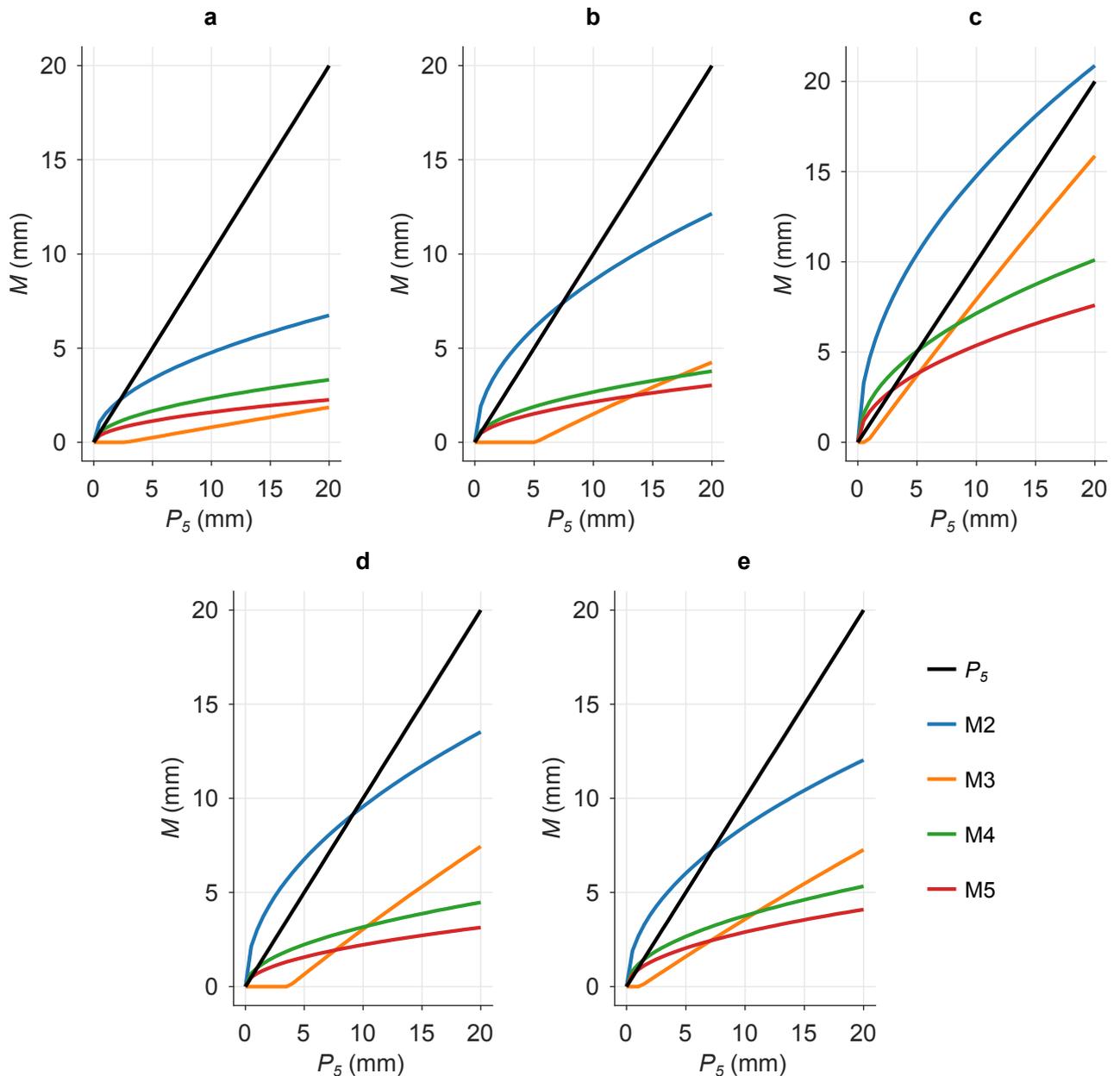


Figure 5.4 Les résultats d'humidité initiale (M) en fonction P_5 : a) le bassin versant d'El Kébir, b) le bassin versant de Timgad, c) le bassin versant de Zerdassas, d) le bassin versant d'Allalah et e) le bassin versant de Boubhir.

Les Figures 5.5–5.9 illustrent le comportement des modèles en termes du coefficient de ruissellement (Cr) pour les cinq bassins versants pour des données hypothétiques. En effet, les paramètres optimaux donnés dans le Tableau 5.2 ont été utilisés pour simuler les Cr sous différents scénarios de P_5 : scénario sec, modérément humide, humide et extrêmement humide

(c'est-à-dire $P_5 = 0, 10, 50$ et 100 mm). Ainsi, nous serions en mesure de vérifier la fiabilité, la cohérence et la stabilité des structures des différents modèles.

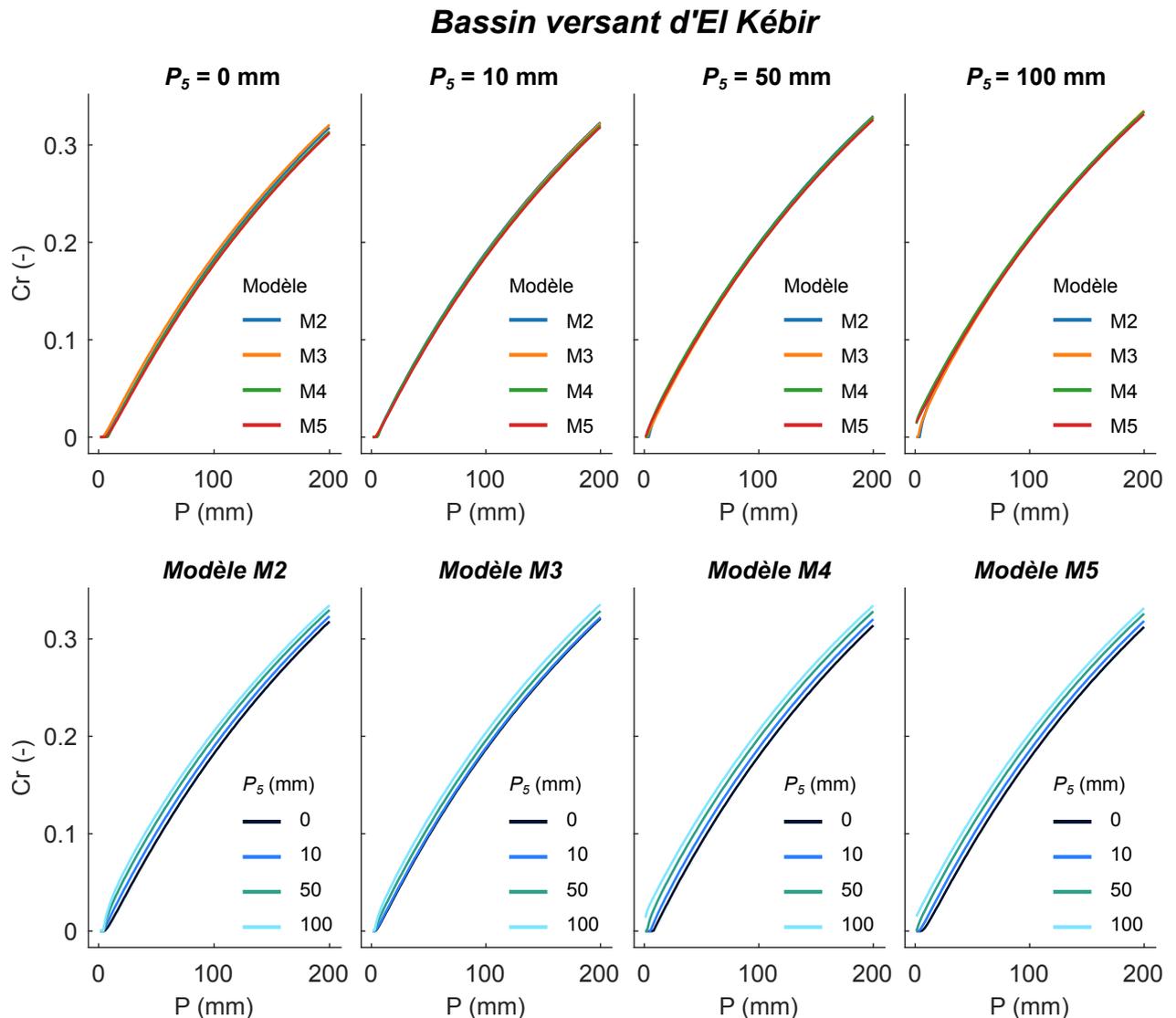


Figure 5.5 Comparaison des comportements des modèles en termes des coefficients de ruissellements (Cr) pour le bassin versant d'El Kébir sous différents scénarios d'humidité antécédente.

Pour le bassin versant d'El Kébir, nous avons constaté que les courbes des coefficients de ruissellements des différents modèles ont été quasi indiscernables comme le montre la Figure 5.5, indiquant que les modèles se sont comportés de manière similaire pour tous les scénarios. Néanmoins, pour le cas extrêmement humide, les modèles M4 et M5 ont eu une réponse hydrologique plus rapide que les modèles M2 et M3 pour les faibles précipitations.

En outre, les courbes représentant l'effet de P_5 sur le comportement des modèles révèlent qu'ils avaient pratiquement le même degré de sensibilité aux conditions d'humidité antécédentes. En fait, pour tous les modèles, l'écart entre les courbes des Cr était régulier et peu évident, indiquant que la totalité des modèles ont été peu sensibles aux conditions d'humidité antérieures pour le bassin versant d'El Kébir. Ceci est corroboré par la figure 5.4a,

qui indique que les valeurs de M ont été considérablement réduites par rapport à P_5 pour le bassin versant d'El Kébir.

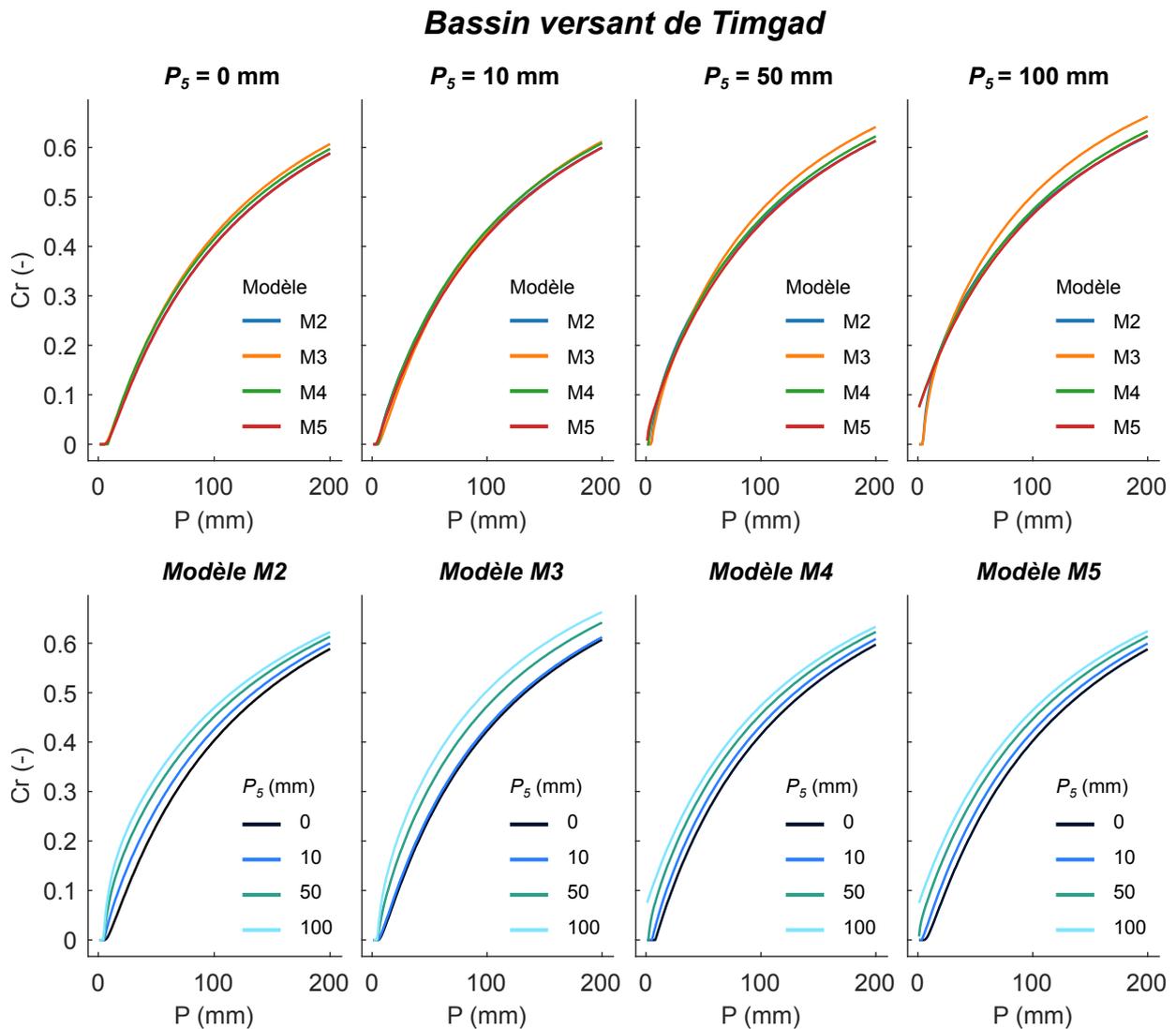
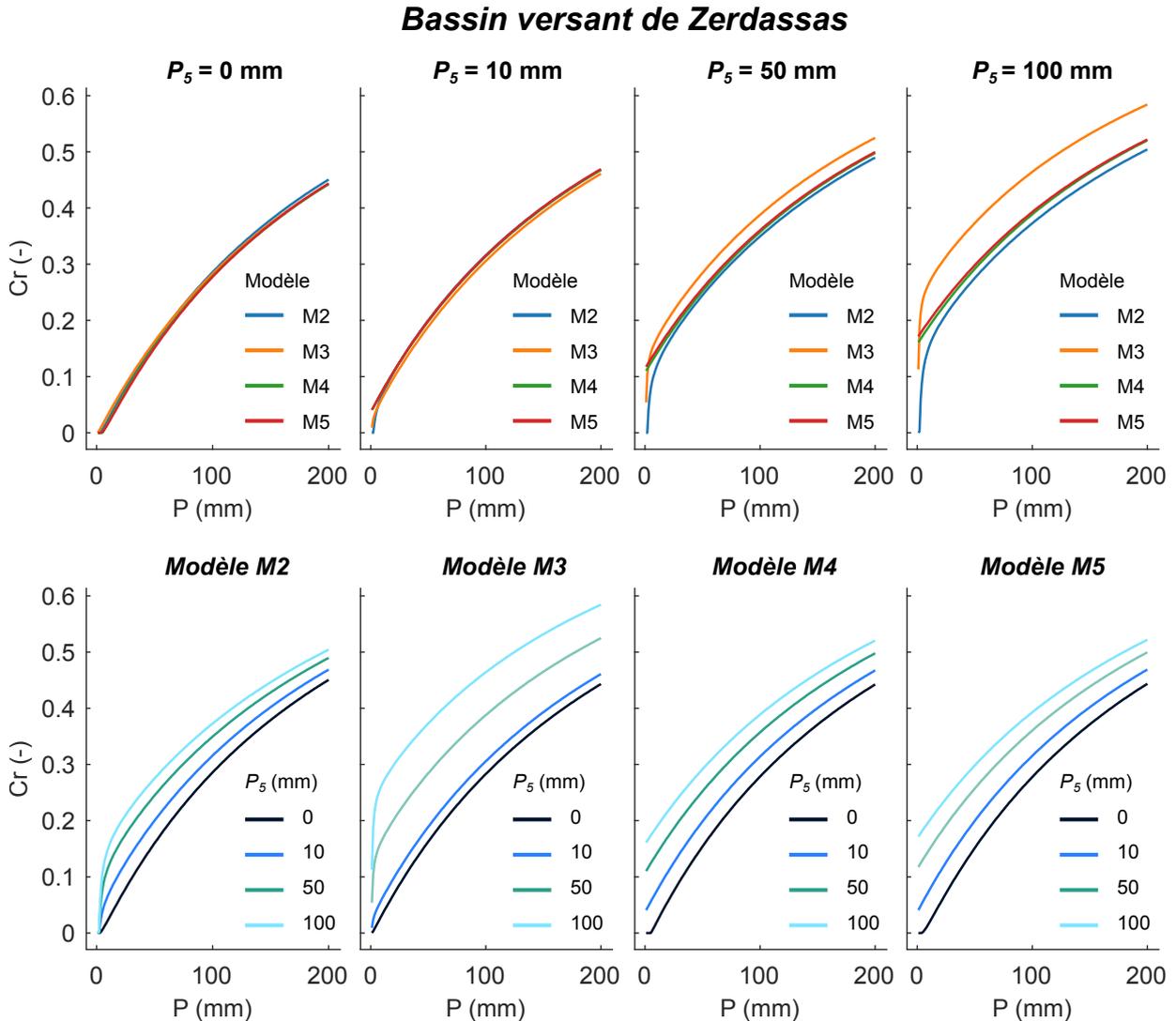


Figure 5.6 Comparaison des comportements des modèles en termes des coefficients de ruissellements (Cr) pour le bassin versant de Timgad sous différents scénarios d'humidité antécédente.

Comme indiqué dans la Figure 5.6, les courbes des Cr des différents modèles ont été relativement proches pour le scénario sec pour le bassin versant de Timgad. De même, les courbes de Cr des différents modèles se sont rapprochées d'avantage pour le cas modérément humide. Néanmoins, une disparité entre les résultats des modèles a été observée une fois que P_5 avait atteint un certain seuil, en particulier pour le modèle M3, où les courbes des valeurs des Cr simulées (en orange) ont divergé des courbes des autres modèles. Cette déviation est devenue plus prononcée à mesure que P_5 augmentait, où la courbe du Cr du modèle M3 a commencé à diverger des courbes des autres modèles pour le scénario extrêmement humide. D'autre part, d'après les figures illustrant la sensibilité des modèles à P_5 , nous constatons que le modèle M2 a montré une forte sensibilité pour les faibles valeurs de P , où les écarts entre les courbes de Cr simulés étaient plus prononcés, mais qui tendaient à se rapprocher à mesure que P augmentait. En d'autres termes, les taux de changement de Cr avec le modèle M2 ont

été relativement importants à de faibles valeurs de P , ce qui s'explique conceptuellement par l'allure de la courbe du modèle M2 de la Figure 5.4b, mais ces fluctuations sont physiquement incongrues.



Pour le bassin versant de Zerdassas, le même constat peut être fait que pour le bassin versant de Timgad, où les courbes Cr des quatre modèles pour les scénarios sec et modérément humide ont été relativement proches, comme le montre la Figure 5.7. Nous notons que tous les modèles ont été sensibles à P_5 mais à différents degrés. Cependant, les courbes des modèles M2, M4 et M5 étaient presque identiques dans les scénarios humides et extrêmement humides, tandis que les courbes du modèle M3 ont divergé de manière significative. De plus, les disparités importantes entre les courbes des Cr simulés du modèle M3 montrent qu'il est fortement influencé par P_5 . De surcroît, chacun des modèles M2 et M3 a révélé une cassure notable des courbes des Cr simulés pour les faibles valeurs de P à mesure que P_5 augmentait. Ces incohérences ont été causées par les modules d'humidités, qui ont produit des valeurs de

M relativement importantes pour ces deux modèles. En revanche, les modèles M4 et M5 ont montré qu'ils ont été plus stables pour tous les scénarios d'humidité antérieure.

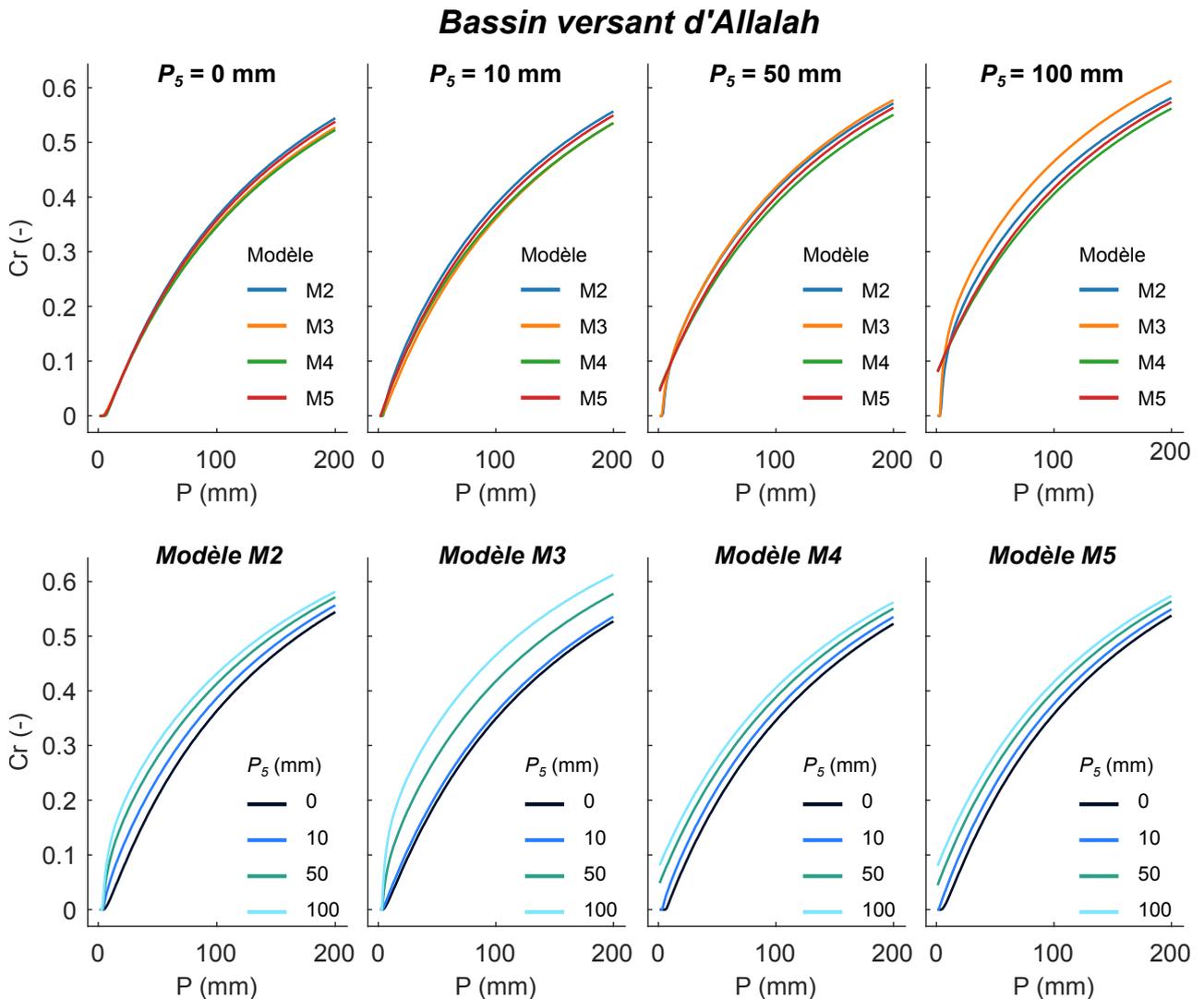


Figure 5.8 Comparaison des comportements des modèles en des coefficients de ruissellements (Cr) pour le bassin versant d'Allalah sous différents scénarios d'humidité antécédente.

Comme le montre la Figure 5.8, les quatre modèles ont fonctionné de manière similaire pour la situation sèche du bassin versant d'Allalah. Toutefois, un début de divergence s'est développé pour ces situations à mesure que P avait augmenté. Pour les cas humide et relativement humide, la disparité entre les résultats des différents modèles s'est accentuée. En outre, pour le scénario extrêmement humide, des cassures des courbes Cr des modèles M2 et M3 ont été observées pour des faibles valeurs de P . De plus, la courbe de Cr du modèle M3 s'est éloigné de celles des autres modèles.

D'autre part, nous avons constaté que les modèles n'ont pas été très sensibles à P_5 , sauf pour le modèle M3 qui a montré une sensibilité plus prononcée et pour le modèle M2 pour des faibles valeurs de P .

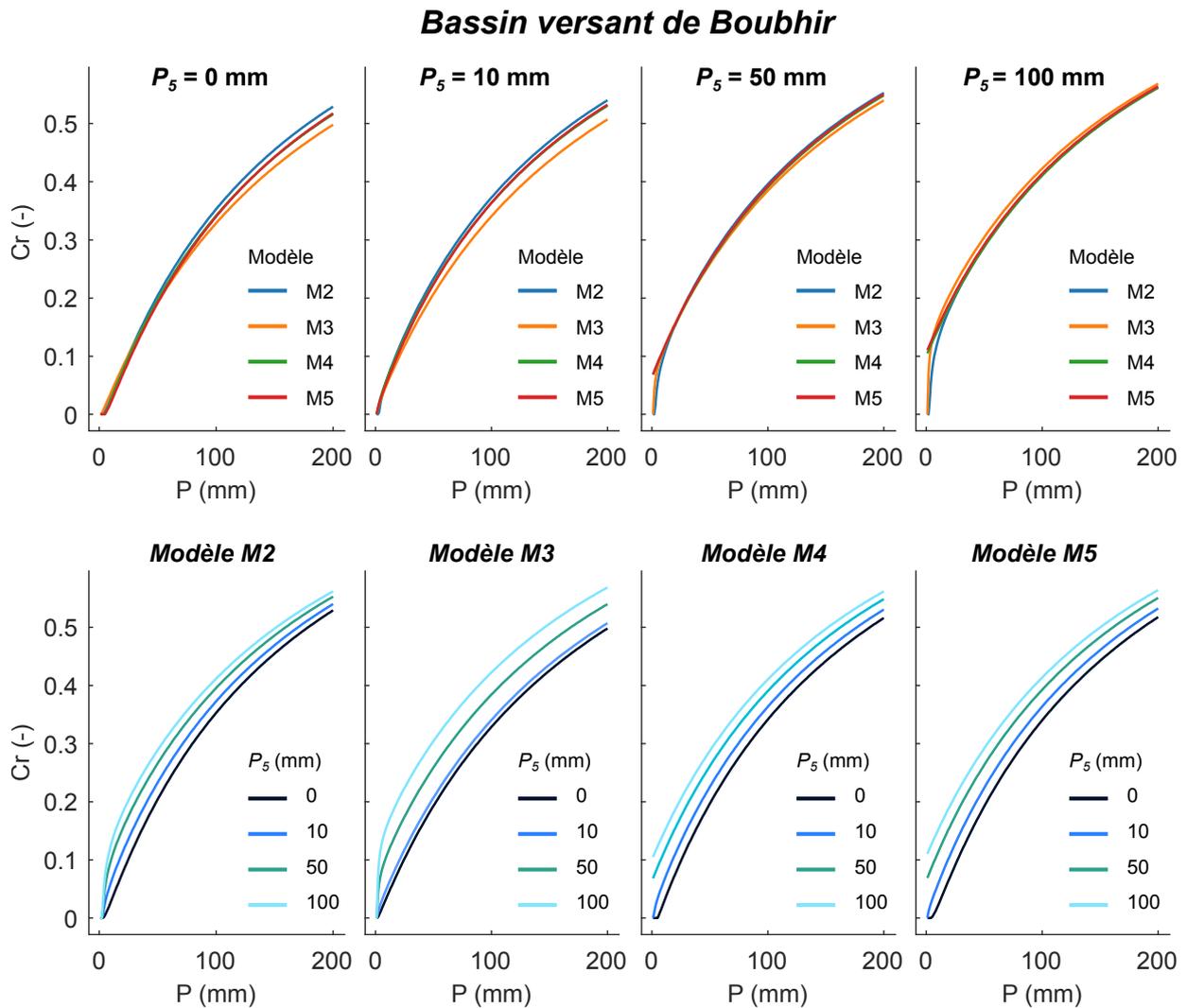


Figure 5.9 Comparaison des comportements des modèles en termes des coefficients de ruissellements (Cr) pour le bassin versant de Boubhir sous différents scénarios d'humidité antécédente.

Outre les cassures des courbes des Cr des modèles M2 et M3 pour les cas humide et extrêmement humide pour les faibles valeurs de P , les modèles s'étaient comportés d'une manière similaire, comme l'illustre la Figure 5.9. Toutefois, le modèle M3 a sous-évalué les Cr pour les scénarios sec et modérément humide par rapport aux autres modèles.

Pour résumer, les résultats susmentionnés indiquent que les structures des modèles M2 et M3 étaient instables et donnaient des résultats incohérents pour des valeurs élevées de P_5 ainsi que pour de faibles valeurs de P . Les modèles M4 et M5 ont eu des comportements similaires dans tous les bassins versants et se sont avérés plus stables. Ainsi, la procédure SMA continue (Structure B de la Figure 4.2) a assuré une structure de modèle plus stable sous différentes valeurs de P_5 . D'autre part, nous avons étudié la sensibilité à l'humidité antécédente des différents bassins versants ; nous avons observé que l'humidité antécédente avait un faible effet sur les modèles dans le bassin versant d'El Kébir, tandis qu'elle avait une forte influence sur les modèles dans le bassin versant de Zerdassas. Les bassins versants de Timgad, Allalah et Boubhir, par contre, ont montré le même niveau de sensibilité des modèles.

Par ailleurs, nous avons noté différentes plages de fluctuation de C_r pour chacun des bassins hydrographiques avec les modèles, reflétant des différences dans les perméabilités des bassins hydrographiques. Cette différence s'explique par les valeurs de capacité maximale de rétention du sol (S) obtenues pour chaque bassin, qui conceptualise les perméabilités de ces derniers. En fait, La notion de C_r à la fois variable et proportionnel à P est, en effet, l'un des concepts fondamentaux de la méthode SCS-CN, que l'on retrouve également dans les modèles SCS-CN modifiés. L'ordre des bassins versants en ordre décroissant de perméabilité était le suivant : bassin de Timgad, bassin d'Allalah, bassin de Boubhir, bassin de Zerdassas et enfin le bassin versant d'El Kébir.

Les modèles M2, M3, M4 et M5 sont des modèles conceptuels globaux qui ne cherchent pas nécessairement à décrire la complexité et l'hétérogénéité du bassin, et sont basés sur des paramètres qui n'ont pas de correspondance directe a priori sur le terrain. De nombreux modèles de cette catégorie, en revanche, ont fait l'objet d'études de régionalisation et ont été mis en œuvre dans des bassins non jaugés où des relations entre les paramètres et les descripteurs de bassins versants ont pu être établies. Étant donné que la plupart des paramètres des modèles conceptuels représentent chacun un processus particulier, ils pourraient théoriquement être déterminés directement ou indirectement par des mesures (Zhang et al. 2015). La technique de régionalisation, en revanche, n'est pas toujours facile à appliquer, car les relations mathématiques ne sont pas toujours évidentes. Perrin (2000) a tenté d'établir des équations de prédétermination pour les paramètres du modèle GR4J en utilisant des régressions linéaires multiples sur un large échantillon de bassins versants. Cependant, il a souligné le fait qu'on demeure dans l'incapacité d'identifier toutes les caractéristiques qui puissent être pertinentes pour le modèle considéré tout en représentant le véritable comportement d'un bassin vis-à-vis de la transformation pluie-débit. En conséquence, il a préconisé l'utilisation de relations de prédétermination comme estimateurs initiaux des paramètres, qui seraient ensuite affinés à l'aide d'une procédure d'optimisation sur un nombre très limité de données. La présente Thèse n'a aucunement l'intention d'établir des équations de prédétermination des paramètres du fait de la taille réduite de l'échantillon de bassins versants. Cependant, une analyse a été menée visant d'abord à identifier les liens potentiels entre les paramètres du modèle et les caractéristiques des bassins versants, puis de tenter d'apporter une explication physique de la variation des paramètres. Toutefois, cette analyse doit se faire avec précaution, car des associations hasardeuses peuvent parfois induire en erreur. Cette analyse est une ébauche d'une éventuelle étude ultérieure de la régionalisation.

Sur la base des travaux d'Assaye et al. (2021), nous avons sélectionné trois catégories de descripteurs de bassins versants, à savoir la couverture terrestre (occupation du sol), les caractéristiques géologiques et les caractéristiques hydrogéologiques (section 3.2.1). Les résultats de l'analyse de corrélation sont illustrés dans la Figure 5.10.

La perméabilité des bassins versants s'est avérée plus élevée lorsque les sols sont dominés par les cultures (bassins d'El Kébir), alors qu'elle était réduite lorsque les bois étaient présents (bassin de Zerdassas). En revanche, la perméabilité était élevée pour des formations géologiques sédimentaires, notamment les formations sédimentaires du Crétacé et les

formations sédimentaires du Trias à Jurassique. Elle est également amplifiée lorsque le sous-sol contient du karst fracturé (Figure 3.7).

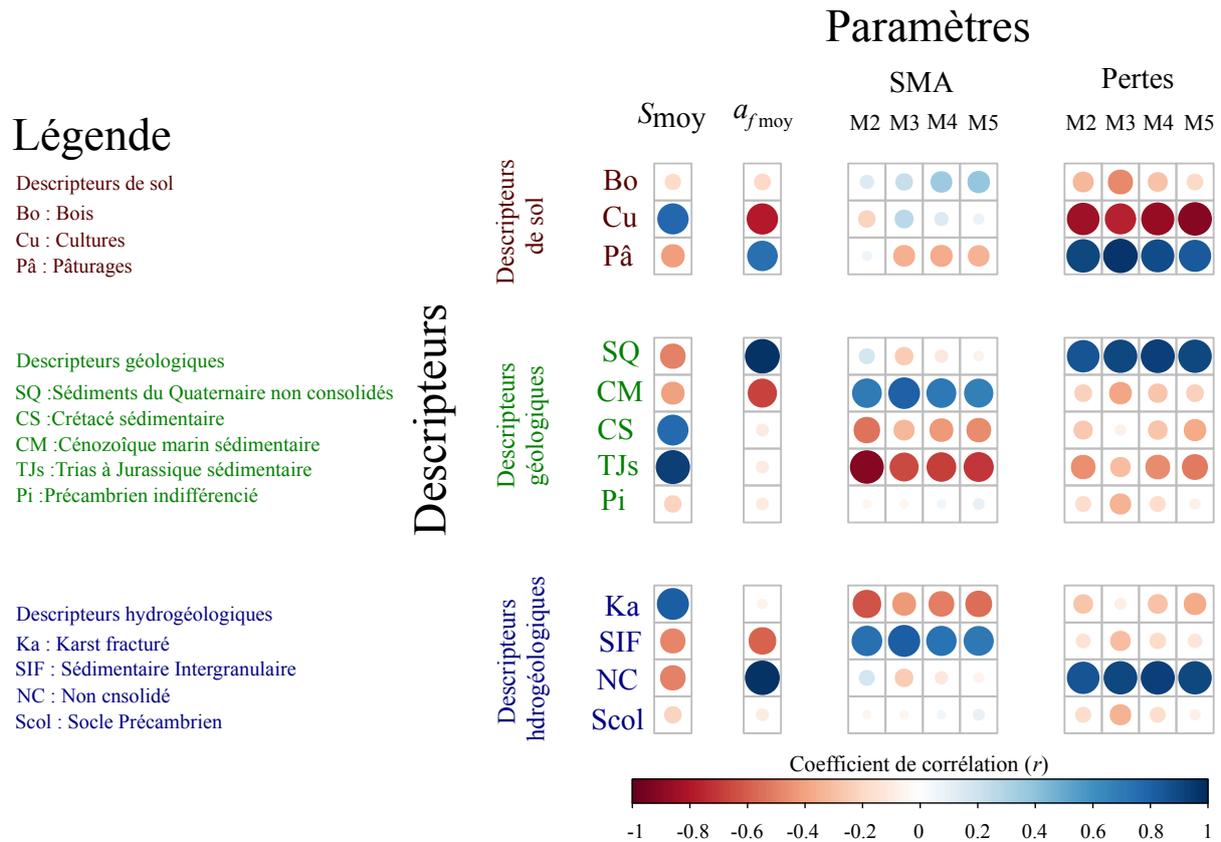


Figure 5.10 Les résultats de corrélation par catégorie de descripteurs

La présence de formations géologiques non consolidées a eu un effet significatif sur le paramètre du module de séparation d'écoulement a_f , qui était plus élevé pour le bassin versant de Timgad, dont le sous-sol contient un taux élevé de sédiments quaternaires non-consolidés. En réalité, la nature non-consolidée du sous-sol facilite son interaction avec la surface.

Chaque modèle utilise des techniques différentes pour le calcul des pertes initiales et la prise en compte de l'humidité antécédente (SMA). Cependant, des corrélations quasi-identiques ont été trouvées entre les paramètres de ces processus et certains descripteurs de bassin versant. Pour le processus de pertes, des corrélations positives significatives ont été détectées entre les paramètres et le taux de pâturages dans les bassins, ainsi que la présence de sédiments du quaternaires qui sont de nature non-consolidés. D'autre part, nous avons noté une corrélation négative substantielle avec les taux de cultures dans les bassins versants. Toutefois, compte tenu de la nature du processus, nous ne pouvons pas apporter une explication physique logique; elle est plutôt attribuable à la structure des modèles, qui emploient implicitement le paramètre S pour l'évaluation des pertes. Par ailleurs, malgré le fait que certaines corrélations ont été observées, nous n'avons pas été en mesure de fournir une explication rationnelle des fluctuations des paramètres du processus SMA. Néanmoins, nous avons noté une corrélation négative entre les paramètres et la prévalence de karst fissuré dans les bassins versants, indiquant la contribution de ce dernier au ressuyage rapide et la perte d'humidité des sols.

5.4. Les performances hydrométriques des modèles

La capacité des modèles à prédire les volumes de crues observés est indiquée par leurs performances volumétriques. Les performances hydrométriques, quant à elles, évaluent la capacité des modèles à reproduire les hydrogrammes observés. En fait, ce n'est pas parce qu'un modèle de production assure une bonne performance en termes de critères volumétriques (c'est-à-dire, MAE, BIAS et PBIAS) qu'il assure également de bonnes performances en termes de critères hydrométriques.

Cependant, dans la modélisation des crues éclair, l'accent est mis sur les débits, en particulier les débits de pointe et le moment de leur apparition, plutôt que sur les volumes de crues. En conséquence, malgré que les modèles M2 et M3 soient avérés instables à des valeurs P_5 élevées, nous avons décidé de les maintenir en plus des modèles M4 et M5 pour examiner leur performance hydrométrique (NRMSE, PPEAK, KGE, et KGE')

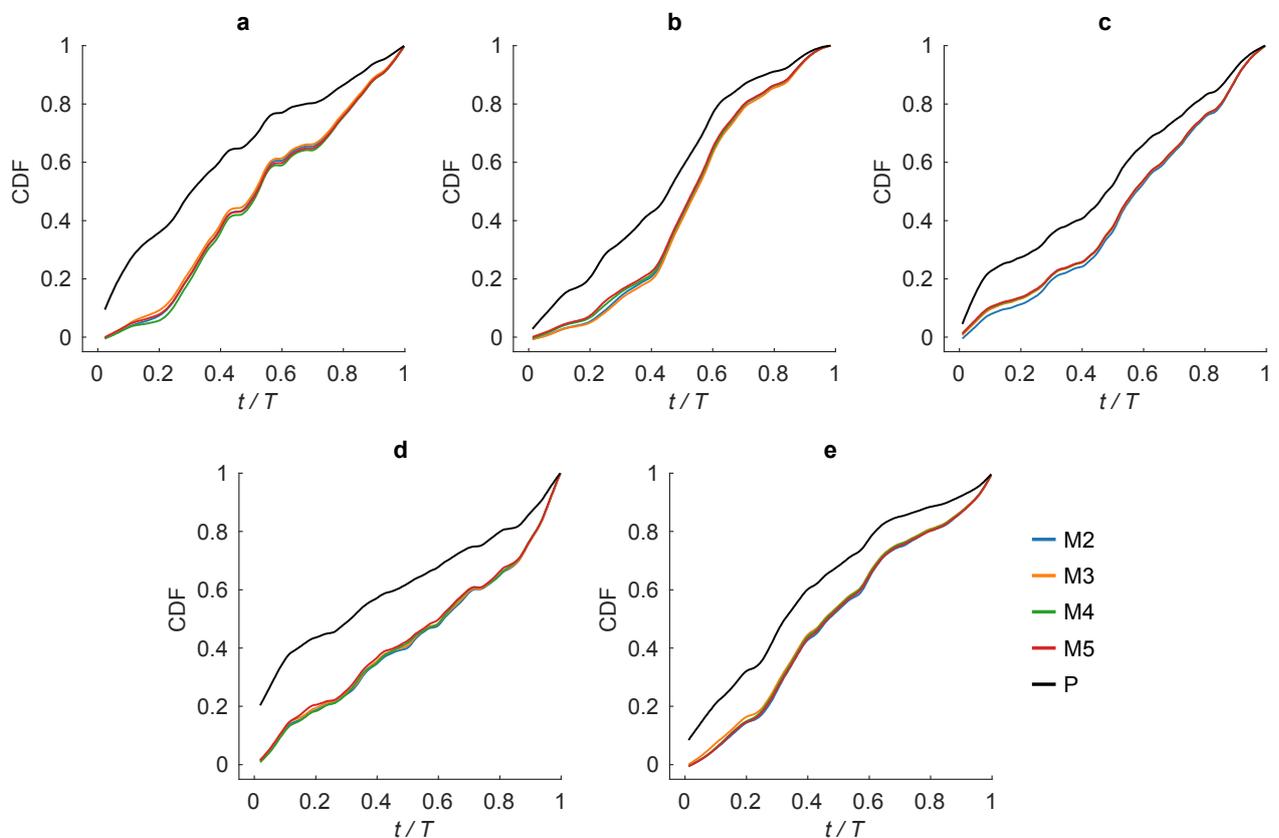


Figure 5.11 Les fonctions des densités cumulées des pluies brutes et nettes des différents modèles : a) le bassin versant d'El Kébir, b) le bassin versant de Timgad, c) le bassin versant de Zerdassas, d) le bassin versant d'Allalah et e) le bassin versant de Boubhir.

La Figure 5.11 montre que, bien que les modèles aient fourni des résultats volumétriques identiques, la distribution des pluies nettes calculées pour un événement spécifique variait d'un modèle à l'autre du fait de leurs structures différentes, affectant la forme de l'UH correspondante et les paramètres du modèle de transfert, en l'occurrence le modèle NASH. En outre, la forme de l'UH est également affectée par les paramètres du modèle de séparation des débits de base.

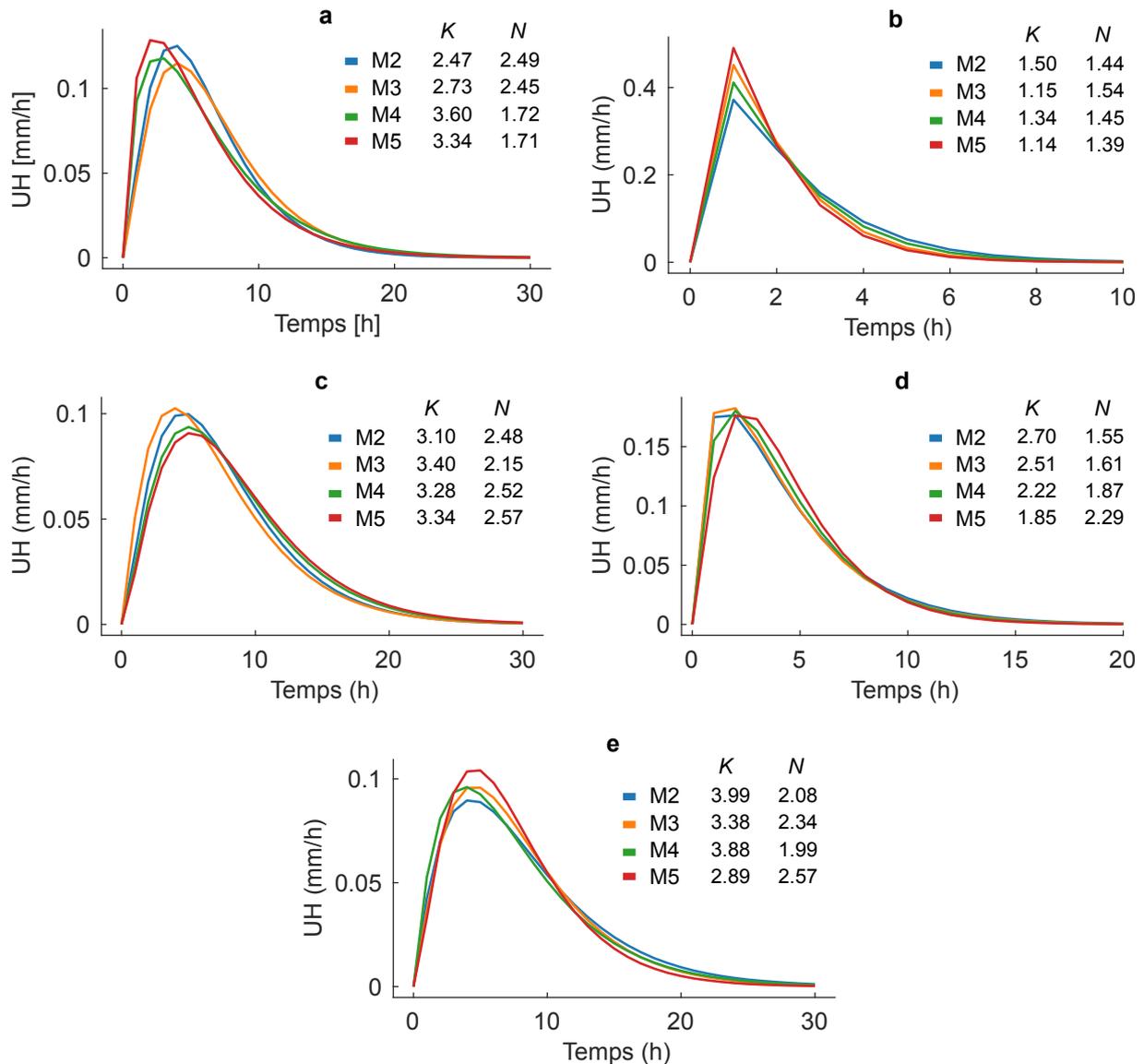


Figure 5.12 Comparaison des allures des HU des différents modèles : a) le bassin versant d'El Kébir, b) le bassin versant de Timgad, c) le bassin versant de Zerdassas, d) le bassin versant d'Allalah et e) le bassin versant de Boubhir.

Nous avons obtenu différentes valeurs des paramètres du modèle de NASH (c'est-à-dire K et N) pour chacun des modèles de production dans tous les bassins versants, comme le montre la Figure 5.12. En fait, compte tenu des différences des répartitions des précipitations nettes ainsi que des volumes générés par les modèles de production à chaque épisode pluvieux, ce résultat était attendu. C'est-à-dire que les paramètres du modèle de transfert sont impactés à la fois par la structure du modèle de production et par les volumes qu'il produit. En conséquence, les formes des HU générés sont affectées directement par les erreurs volumétriques et structurelles, et indirectement par P_5 . Ceci reflète la propagation des erreurs depuis le modèle de production vers le modèle de transfert. En outre, les allures des HU ont été aléatoires d'un bassin versant à un autre, et nous notons aucun schéma particulier pour les modèles. Par exemple, l'HU du modèle M5 a eu le pic le plus important pour le bassin versant de Timgad (Figure 5.12b), mais ce n'était pas le cas pour Zerdassas.

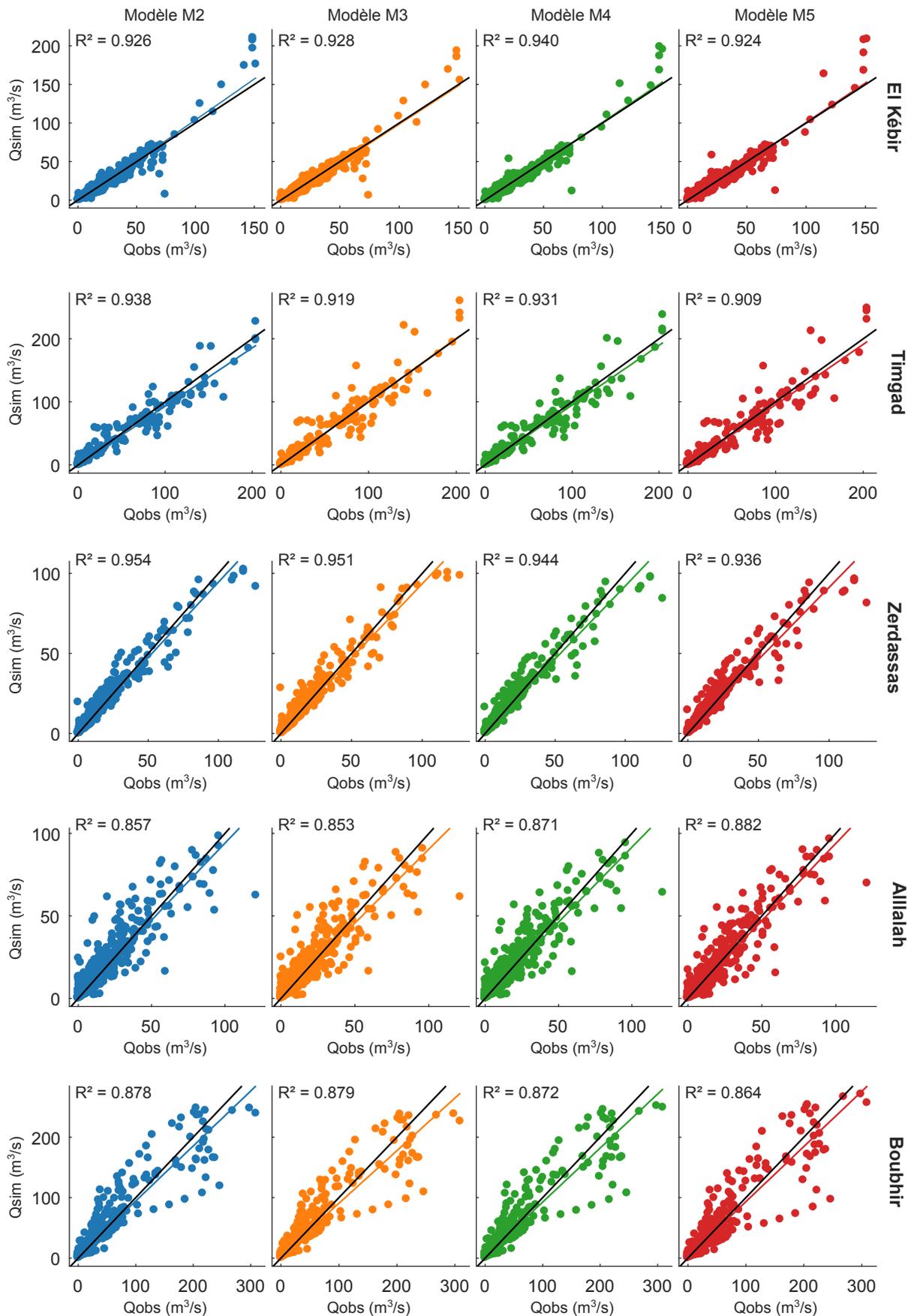


Figure 5.13 Les nuages de points des débits simulés versus les débits observés pour tous les modèles couplés au modèle de transfert de NASH.

La Figure 5.13 montre les débits simulés des modèles production couplés au modèle de transfert de NASH en fonction des débits observés pour tous les bassins versants. Tous les modèles ont globalement bien fonctionné et produit des résultats visuellement équivalents, selon le coefficient de détermination (R^2). Cependant, des résultats différents ont été obtenus en termes de critères de performance globaux. En fait, le Tableau 5.3 présente les valeurs globales des critères de performances calculées par moyenne arithmétique des valeurs dérivées pour chaque événement, afin d'établir une évaluation globale des performances des modèles.

Tableau 5.3 Les résultats globaux des modèles basés sur leur capacité à reproduire les allures des hydrogrammes de crues.

Bassin versant	Modèle	Critère de performance global				
		KGE [-]	KGE' [-]	NRMSE [-]	PPEAK [%]	TPEAK [h]
El Kébir	M2	0.79	0.75	0.28	9.6	1.59
	M3	0.75	0.73	0.30	13.3	1.88
	M4	0.83	0.81	0.26	9.7	1.00
	M5	0.81	0.79	0.28	10.4	1.00
Timgad	M2	0.82	0.74	0.45	17.5	0.50
	M3	0.77	0.73	0.49	23.1	0.50
	M4	0.83	0.75	0.44	17.1	0.50
	M5	0.83	0.78	0.47	17.7	0.50
Zerdassas	M2	0.86	0.84	0.24	12.2	1.47
	M3	0.82	0.81	0.26	15.4	2.94
	M4	0.84	0.81	0.26	14.4	1.53
	M5	0.84	0.81	0.27	15.6	1.65
Allalah	M2	0.81	0.81	0.48	13.2	1.20
	M3	0.79	0.78	0.50	12.3	1.27
	M4	0.82	0.82	0.44	11.3	1.17
	M5	0.79	0.78	0.43	11.6	1.20
Boubhir	M2	0.79	0.75	0.24	15.0	2.28
	M3	0.76	0.72	0.25	15.8	2.28
	M4	0.82	0.78	0.24	14.5	1.83
	M5	0.80	0.76	0.25	13.8	2.17

Note: Les valeurs en gras montrent les modèles statistiquement plus efficaces basés sur un critère spécifique.

Selon les critères de performances globaux présentés dans le Tableau 5.3, nous avons constaté que les modèles ont produit des résultats satisfaisants. En effet, pour tous les bassins versants, des valeurs moyennes des critères de performance KGE et KGE' supérieures à 0,7 ont été rapportées avec tous les modèles. De même, des résultats statistiquement comparables des critères NRMSE, |PPEAK|, et |TPEAK| ont été observés. Certains modèles se sont, toutefois, mieux comportés que d'autres sur la base d'un ou plusieurs critères selon le bassin versant. Le modèle M4 a été le plus efficace pour les bassins versants d'El Kébir, de Timgad, d'Allalah et de Boubhir, tandis que le modèle M2 était le plus efficace pour le bassin versant de Zerdassas,

selon le critère de performance KGE. De plus, selon le critère de performance KGE', le modèle M4 a produit les meilleurs résultats pour les bassins versants d'El Kébir, Allalah et Boubhir, tandis que les modèles M5 et M2 ont produit les meilleurs résultats pour les bassins de Timgad et Zerdassas, respectivement. Par ailleurs, le modèle M4 a été le plus performant selon le critère de performance NRMSE pour les bassins versants d'El Kébir, de Timgad et de Boubhir, alors que les modèles M2 et M5 ont été les plus performants, respectivement, pour les bassins versants de Zerdassas et d'Allalah. De surcroît, d'après le critère | PPEAK |, le modèle M2 a été le meilleur pour les bassins versants d'El Kébir et de Zerdassas, cependant, le modèle M4 a été le plus efficace pour les bassins versants de Timgad et d'Allalah, en revanche, pour le bassin versant de Boubhir, le modèle M5 a surpassé les autres modèles. Or, en termes de temps d'apparition des débits de pointe, qui est mesuré par le critère de performance | TPEAK |, le modèle M4 a surpassé les autres modèles dans la plupart des bassins versants, à l'exception du bassin versant de Zerdassas, où le modèle M2 a été le plus efficace. Néanmoins, le modèle M3 n'a été efficace pour aucun critère dans aucun bassin versant.

En définitive, compte tenu de ces résultats globaux, nous n'étions pas en mesure d'identifier le meilleur modèle qui répond à tous les critères de performances pour tous les bassins versants en même temps. En conséquence, les Figures 5.14–5.17 ont été établies, sous forme de diagrammes en boîtes et à violon, pour offrir une évaluation approfondie des performances du modèle pour chaque événement, en termes des critères de performances KGE, KGE', NRMSE et PPEAK.

En effet, selon la Figure 5.14, nous constatons que le modèle M3 a donné des résultats en termes du critère de performance KGE inférieurs à 0.6 pour certains événements dans tous les bassins versants, notamment pour le bassin versant de Boubhir où le critère de performance KGE a atteint une valeur 0.06 (Figure 5.14e). De plus, les autres modèles (c'est-à-dire, M2, M4 et M5) se sont bien comportés et ont donné des valeurs satisfaisantes du critère de performance KGE pour la plupart des événements. Par ailleurs, d'après les distributions présentées dans la Figure 5.14f, le modèle M4 a présenté une plus forte densité des valeurs du critère de performance KGE au voisinage de la valeur optimale (c'est-à-dire, 1), suivi de près par les modèles M5 et M2.

De surcroît, le constat similaire peut être fait avec le critère de performance KGE', qui est une modification plus restrictive du critère de performance KGE, comme le montre la Figure 5.15. En effet, le modèle M3 avait les valeurs les plus basses du critère de performance KGE', qui a même atteint une valeur négative pour le bassin versant d'Allalah (Figure 5.15d). De plus, nous constatons que le modèle M5 a des plages interquartiles plus étroites, ce qui implique qu'il était plus résilient. La Figure 5.15f, d'autre part, montre que le modèle M4 a la densité la plus élevée des valeurs du critère de performance KGE' à proximité de la valeur optimale. Les modèles M5 et M2, en revanche, ont des densités satisfaisantes et comparables à celle du modèle M4.

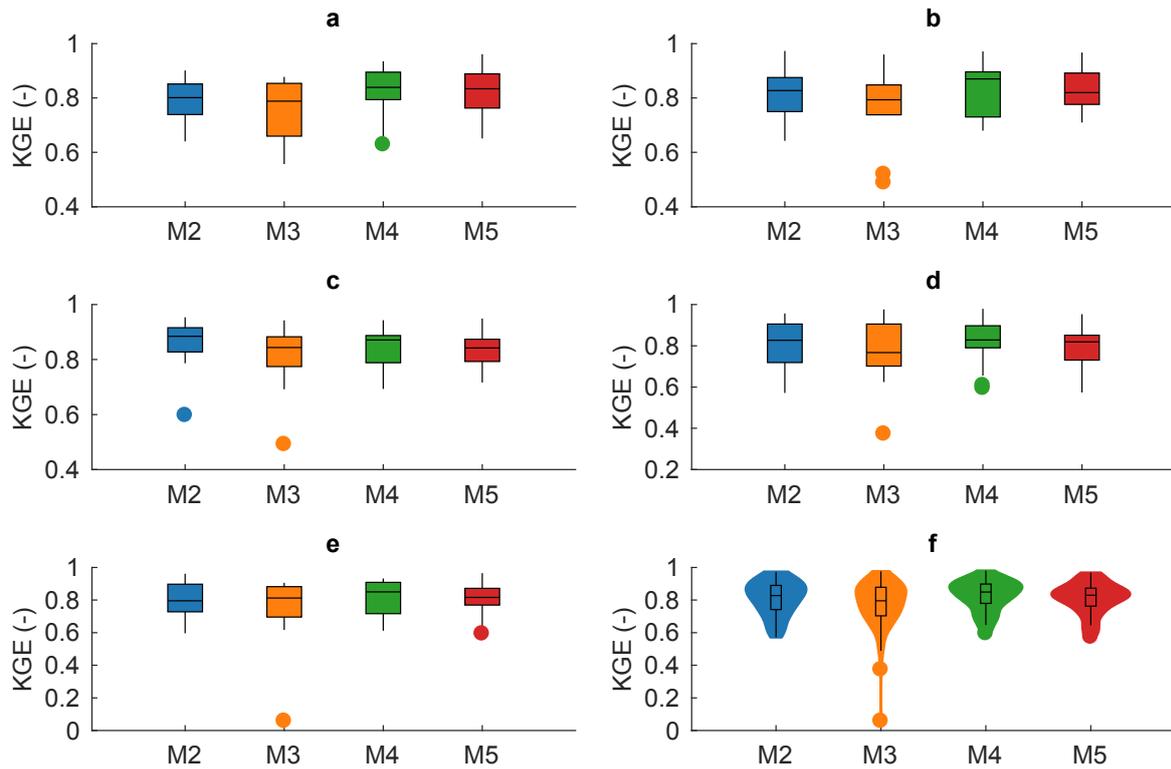


Figure 5.14 Comparaison des résultats des modèles en termes du critère KGE : a) le bassin versant d'El Kebir, b) le bassin versant de Timgad, c) le bassin versant de Zerdassas, d) le bassin versant d'Allah, e) le bassin versant de Boubhir et f) tous les bassins versants confondus.

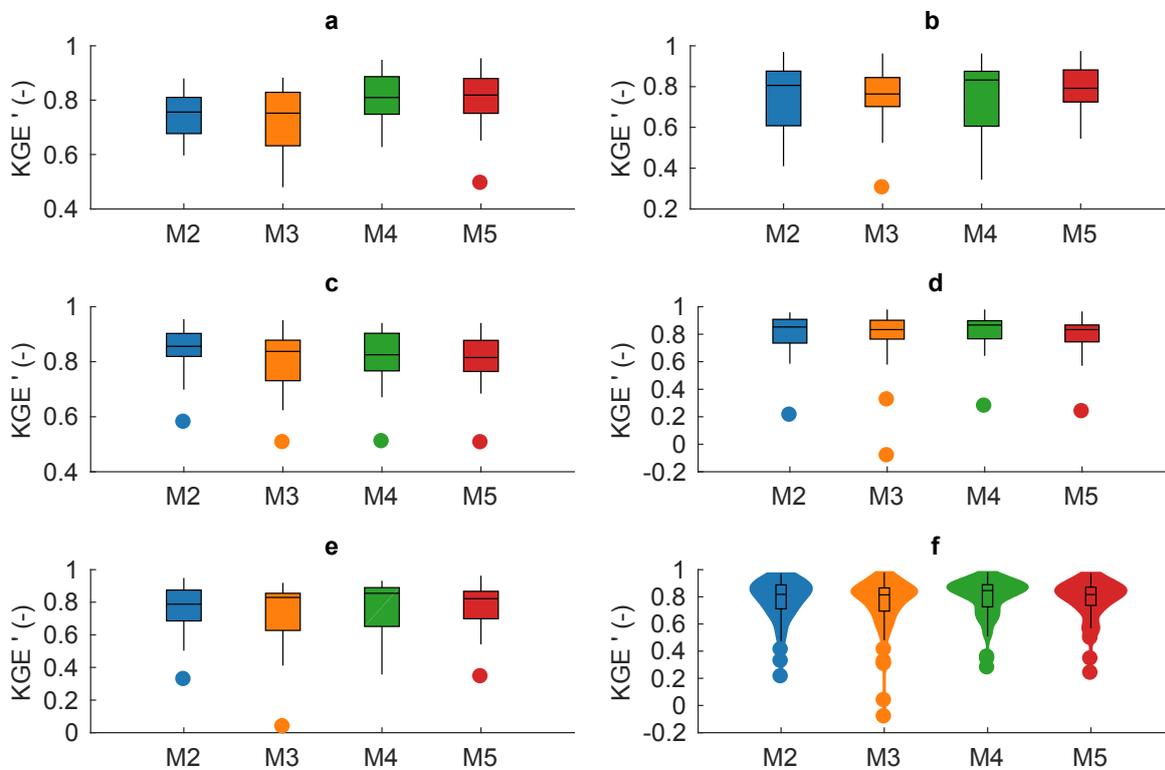


Figure 5.15 Comparaison des résultats des modèles en termes du critère KGE' : a) le bassin versant d'El Kebir, b) le bassin versant de Timgad, c) le bassin versant de Zerdassas, d) le bassin versant d'Allah, e) le bassin versant de Boubhir et f) tous les bassins versants confondus.

Sur la base du critère de performance NRMSE (Figure 5.16), le modèle M5 a surpassé les autres modèles pour le bassin versant d'Allalah, fournissant les valeurs les plus faibles du critère de performance NRMSE ainsi que des plages interquartiles plus courtes. Le modèle M4, en revanche, a été plus efficace dans les bassins versants d'El Kébir, Timgad et Boubhir, tandis que le modèle M2 a été plus efficace dans le bassin versant de Zerdassas. Par ailleurs, selon la Figure 5.16f, qui montre la performance des 94 événements confondus, que les modèles M4 et M5 avaient des densités importantes au voisinage de 0 (valeur optimale du critère NRMSE). Le modèle M5, en revanche, produit une densité plus uniforme autour de zéro. Cependant, Les modèles M5, M2 et M3 avaient des valeurs extrêmes plus élevées que celles du modèle M4.

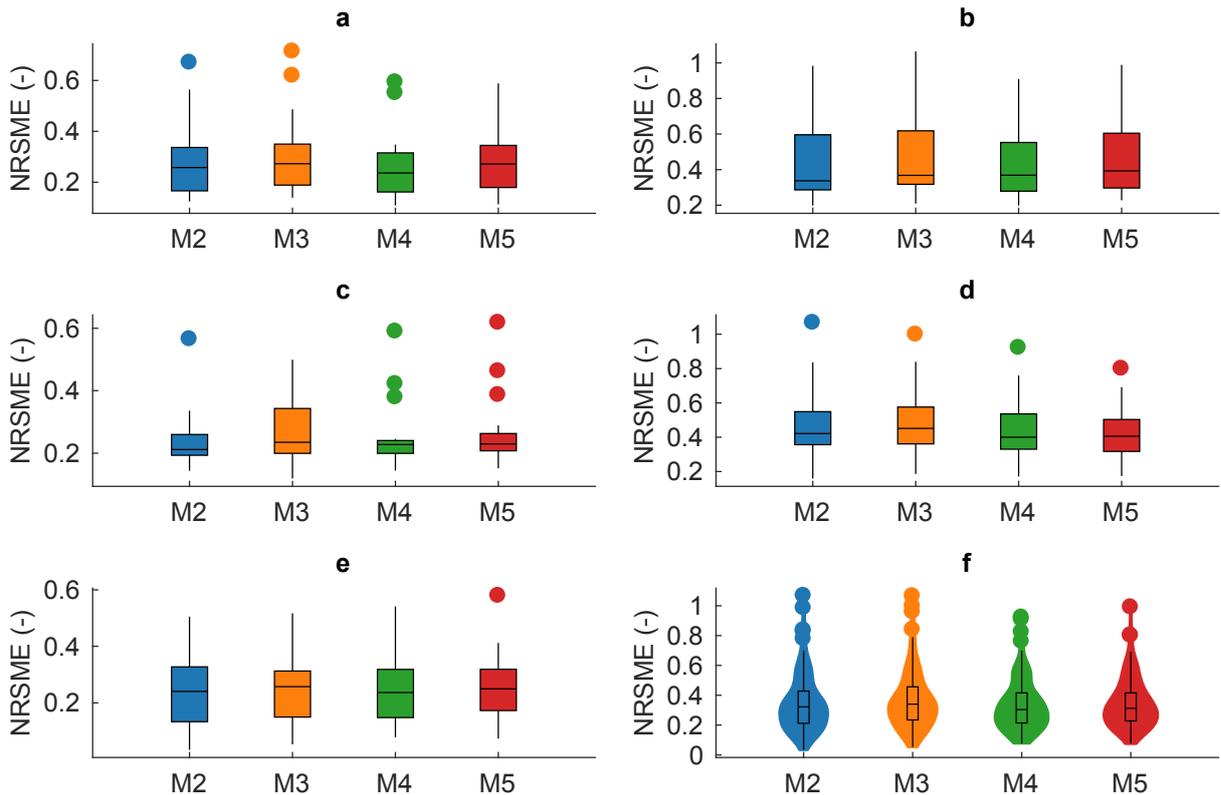


Figure 5.16 Comparaison des résultats des modèles en termes du critère NRMSE : a) le bassin versant d'El Kebir, b) le bassin versant de Timgad, c) le bassin versant de Zerdassas, d) le bassin versant d'Allalah, e) le bassin versant de Boubhir et f) tous les bassins versants confondus.

Il convient de souligner que les critères de performances KGE, KGE' et NRMSE sont des critères de forme, ce qui signifie qu'ils évaluent la correspondance entre les hydrogrammes observés et simulés. Cependant, ils n'indiquent pas la capacité des modèles à reproduire les débits de pointe. En conséquence, le critère PPEAK a été utilisé pour pallier les lacunes des autres critères.

Selon la Figure 5.17, qui illustre les performances des modèles en termes du critère de performance PPEAK, nous constatons que le modèle M5 s'est montré plus performant que les autres modèles, notamment pour les bassins de Timgad, de Zerdassas et de Boubhir, où les valeurs extrêmes des critères de performance PPEAK étaient plus faibles et les intervalles

interquartiles étaient plus étroits. De plus, le modèle M3 a produit des valeurs extrêmes très élevées dépassant la fourchette de $\pm 50\%$. Par ailleurs, les distributions du modèle M5 étaient plus larges dans la région d'une PPEAK de zéro, en plus des valeurs extrêmes, comme le montre la Figure 5.17f. En conséquence, le modèle M5 reproduit le mieux les débits de pointe.

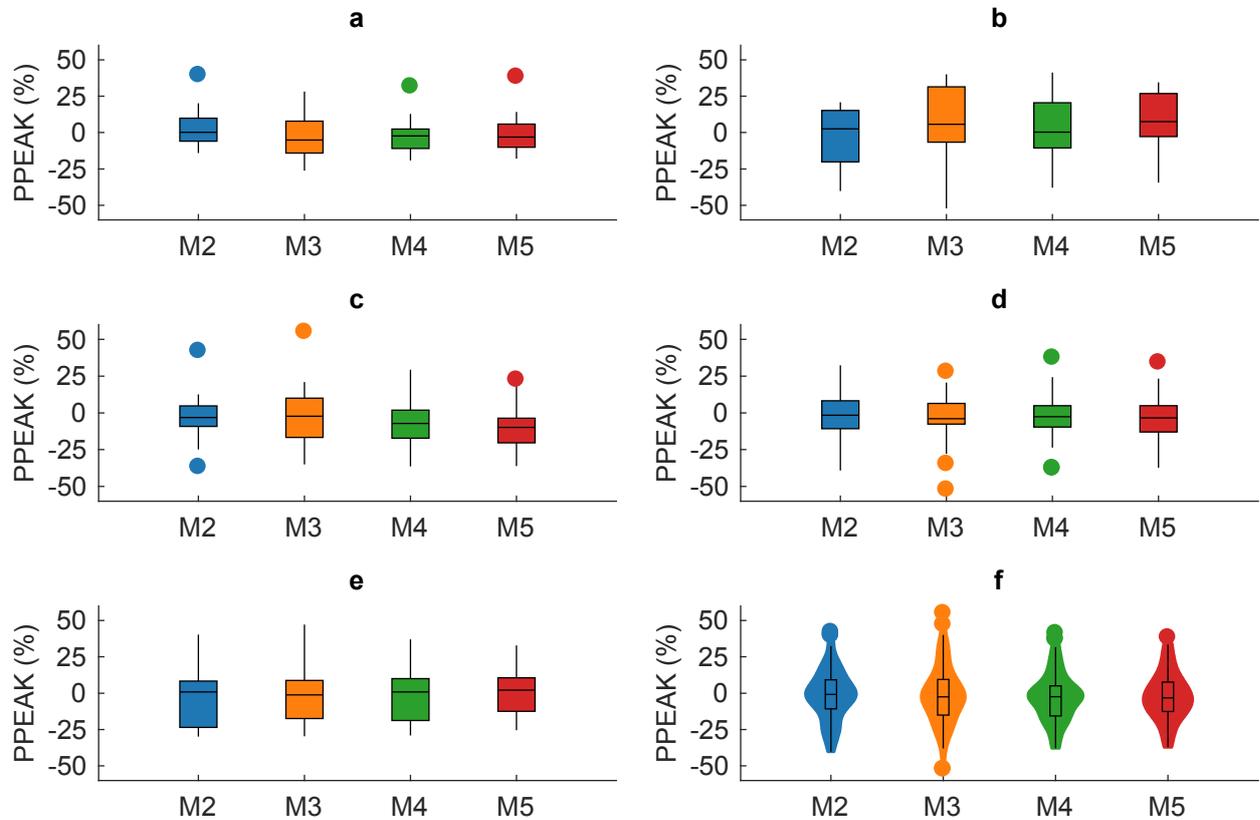


Figure 5.17 Comparaison des résultats des modèles en termes du critère PPEAK : a) le bassin versant d'El Kebir, b) le bassin versant de Tingad, c) le bassin versant de Zerdassas, d) le bassin versant d'Allalah, e) le bassin versant de Boubhir et f) tous les bassins versants confondus.

Sur la base de ces résultats, il a été difficile de définir clairement le meilleur modèle « unique » pour tous les bassins versants, principalement parce que les modèles M2, M4 et M5 ont produit de bons résultats. En effet, le choix du meilleur modèle est l'objectif traditionnel de toute étude prédictive, mais il est rare qu'un modèle unique soit le meilleur dans tous les cas (Clemen et al. 1995; Abdi et Meddi 2020b). Au lieu de cela, chaque modèle a ses forces et ses faiblesses particulières (McLeod et al. 1987; Kim et al. 2006). Par conséquent, plutôt que de sélectionner un modèle unique, l'alternative la plus appropriée consiste à agréger les résultats des sorties des modèles respectifs en faisant la moyenne, simple ou pondérée, des résultats pour affiner les faiblesses de chaque modèle. En effet, de nombreux auteurs ont utilisé le concept de combinaison (par exemple, (McLeod et al. 1987; McIntyre et al. 2005; Kim et al. 2006; Velázquez et al. 2010; Li et al. 2018). Ils ont trouvé des améliorations significatives des résultats lorsque les prédictions de différents modèles ont été combinées.

En conséquence, nous avons utilisé le concept de combinaison pour améliorer les prédictions des modèles et obtenir un compromis entre les différentes mesures de performances. Toutefois, le modèle M3 a été jugé peu fiable en raison de ses performances, il a donc été exclu de la combinaison. En fait, on a combiné les débits issus des modèles M2, M4 et M5 en utilisant la méthode de combinaison à moyenne pondérée (en anglais, Weighted Average combination (WA)) (Shamseldin et O'CONNOR 1999; Ajami et al. 2006; Abdi et Meddi 2020b). Les approches utilisées s'expriment ainsi :

$$(Q_c)_t = \sum_{i=1}^{N_m} x_i (Q_{sim})_{i,t} \quad \text{Avec} \quad \begin{cases} x_i > 0 \\ \sum x_i = 1 \end{cases} \quad (5.1)$$

où $(Q_c)_t$ est le débit simulé du modèle combiné au pas de temps t , $(Q_{sim})_{i,t}$ est le débit du $i^{\text{ème}}$ modèle au pas de temps t , et x_i sont les poids correspondants. Dans le cas où les poids sont égaux, nous retrouvons une combinaison à moyenne simple (SA), qui est un cas spécial de la méthode WA. Pour l'estimation des poids, nous avons utilisé le même concept appliqué pour le calage des modèles, à savoir l'algorithme d'optimisation NSGA-II associé à l'algorithme d'aide à la décision TOPSIS.

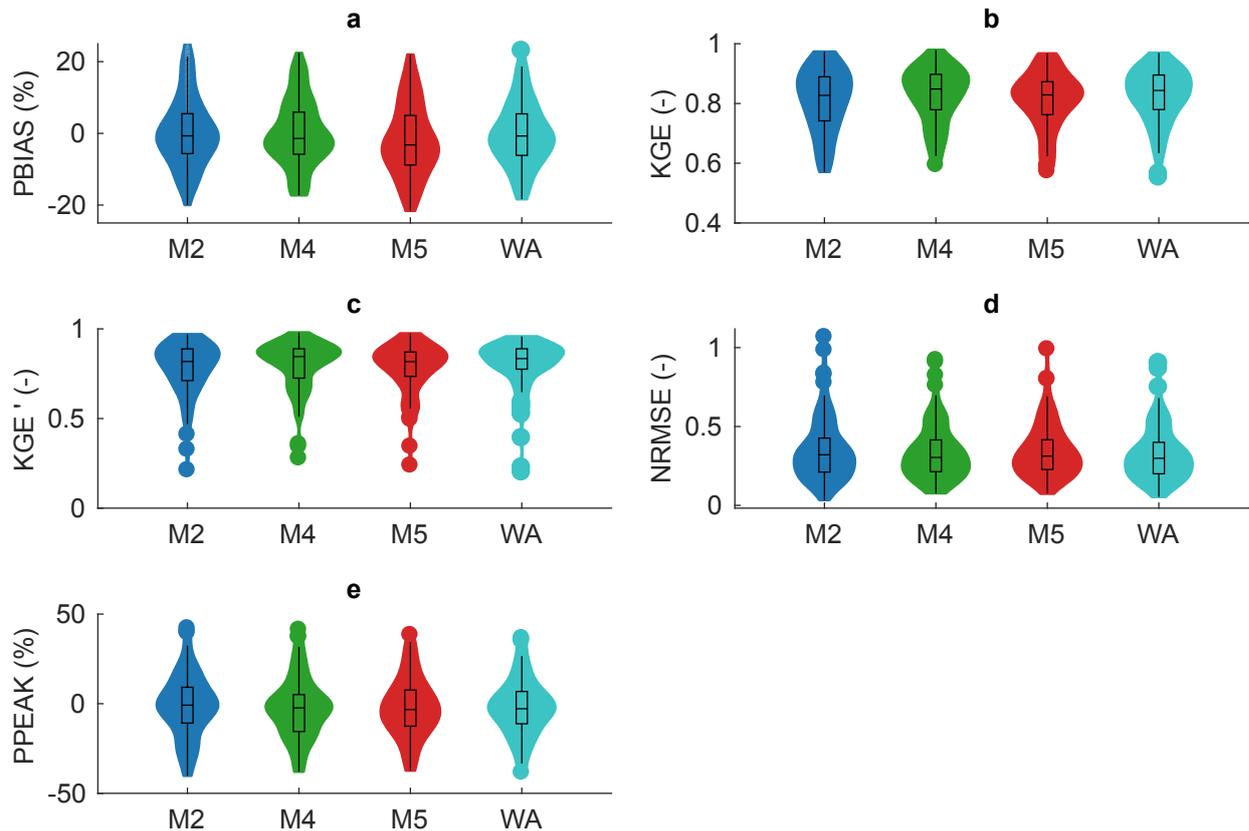


Figure 5.18 Les résultats des modèles M2, M4, M5 et du modèle hybride (WA) pour tous les bassins versants confondus.

L'approche WA, comme le montre la Figure 5.18, a établi un compromis approprié entre les critères des performances, ce qui a donné de bons résultats et des dispersions plus faibles.

La Figure 5.19 illustre les résultats de la simulation pour les événements des cinq bassins versants avec les débits de pointe les plus élevés en utilisant le modèle développé (WA), qui a reproduit avec succès la forme de l'hydrogramme de crue observé pour la plupart des événements.

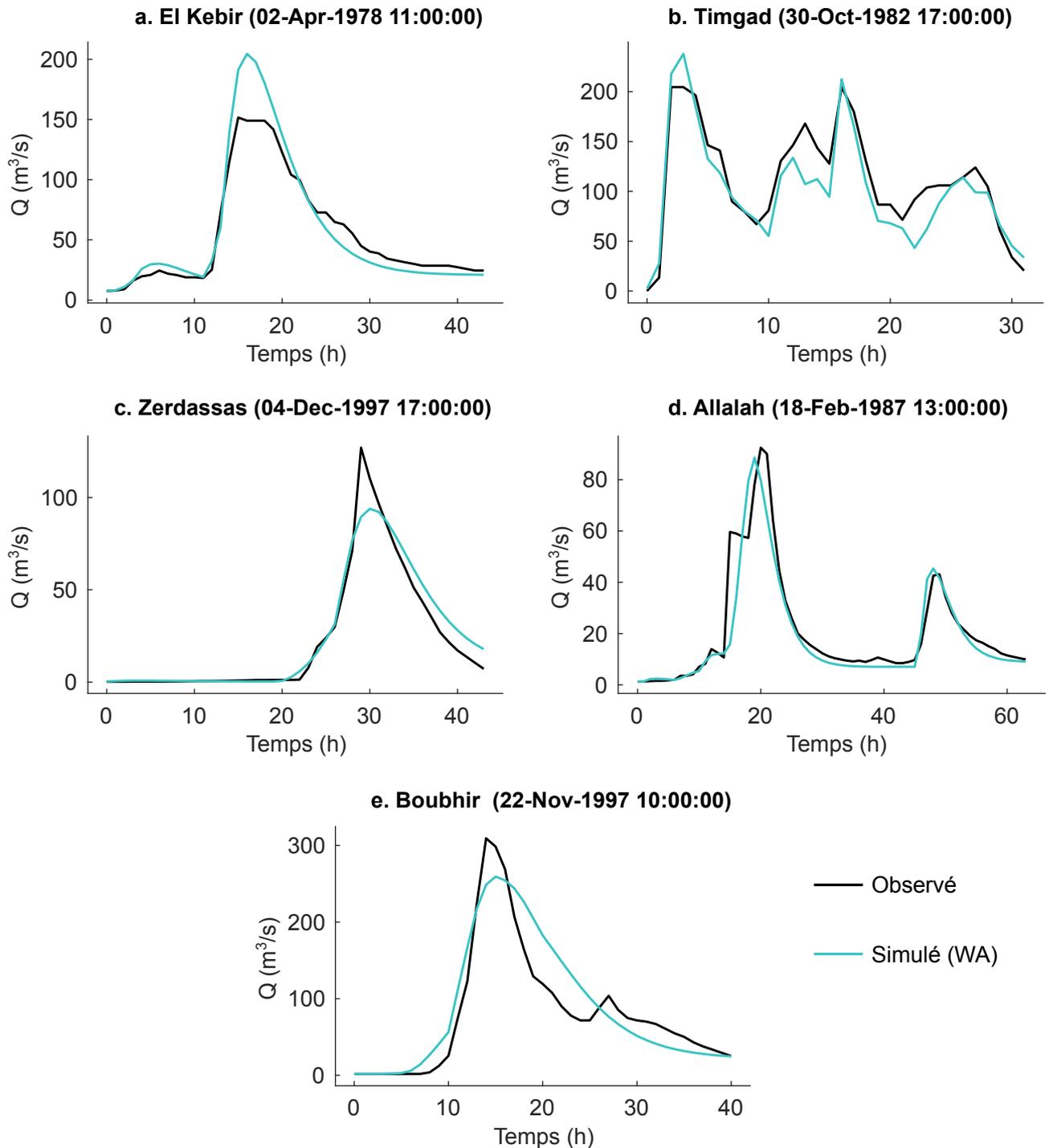


Figure 5.19 les résultats du modèle hybride (WA) pour les évènements ayant les débits de pointes les plus élevés pour chacun des bassins versants.

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons établi un cadre de diagnostic des performances et de la cohérence interne de plusieurs modèles pluie-débit. Une attention particulière a été consacrée à l'effet de l'humidité antécédente sur les performances et la stabilité structurelle de ces modèles.

À la suite de ce diagnostic multiple, nous avons pu identifier de sérieuses inconsistances dans les structures de certains modèles de production pour événements pluvieux de faible magnitude et pour des événements ayant des valeurs élevées de P_5 .

Ces problèmes d'inconsistances structurelles de certains modèles SCS-CN modifiés (c'est-à-dire, M2 et M3) n'ont pas encore été soulevés par la communauté scientifique; Cela peut être dû à l'utilisation de ces modèles qui se limite souvent à faire des prédictions volumétriques. Toutefois, la procédure SMA a été considérablement améliorée dans les modèles les plus récents (c'est-à-dire, M4 et M5), résultant en des structures plus stables sous diverses conditions.

Pour évaluer les performances des modèles, nous avons commencé par examiner leurs performances volumétriques, ce qui implique d'évaluer la capacité des modèles à prévoir les volumes totaux de crue à l'aide de critères numériques spécifiques, en l'occurrence les critères de performance BIAS, MARE, MAE et PBIAS.

Par la suite, les modèles de production aux performances satisfaisantes ont été combinés au modèle de transfert de NASH pour évaluer, d'une part, leur capacité à reproduire les formes des hydrogrammes de crues observés en utilisant les critères de performance KGE, KGE' et NRMSE, et d'autre part, leur capacité à reproduire les débits de pointe et leurs temps d'apparition en utilisant les critères de performance PPEAK et TPEAK.

Enfin, malgré le fait que certains modèles aient donné des résultats satisfaisants, aucun modèle idéal répondant à tous les critères pour l'ensemble des bassins n'a été identifié. En conséquence, nous avons combiné les résultats des modèles les plus efficaces pour développer un modèle hybride qui a fourni un compromis attrayant de tous les critères de performance.

Conclusion générale

“ Confronté à la roche, le ruisseau l'emporte toujours, non pas par la force, mais par la persévérance ” Confucius

La modélisation hydrologique des crues demeure un défi majeur à la fois scientifique et opérationnel, malgré les avancés techniques et technologiques, ainsi que et le nombre croissant des modèles conçu à cet effet.

Les modèles pluie-débit ont une importance capitale pour une planification, une gestion et un développement efficaces des ressources en eau dans un bassin versant. Cependant, la plupart de ces modèles ont été principalement développés pour des régions spécifiques avec des conditions hydro-climatiques particulières. De plus, ils sont fiables pour la région et sur la période pour laquelle ils ont été développés. Par conséquent, des précautions supplémentaires doivent être prises lors de leur utilisation dans un contexte hydro-climatique différent. En outre, la plupart de ces modèles sont continus et fonctionnent pour des pas de temps quotidiens.

Cette thèse de doctorat s'est concentrée sur l'identification de structures de modèle pluie-débit applicables pour la modélisation événementielle des crues éclair aux pas de temps horaires, dans un contexte climatique semi-aride. Pour ce faire, une recherche bibliographique a été menée afin de synthétiser les informations existantes sur les différents processus hydrologiques qui peuvent se produire dans un bassin versant, ainsi que les facteurs les régissant. De même, la modélisation hydrologique, la classification et l'inventaire des modèles, les procédures de calage et de validation et les incertitudes liées à la modélisation, ont également fait l'objet de recherche bibliographique.

L'objectif général de notre travail était d'évaluer la qualité de différents modèles pluie-débit et d'explorer les possibilités d'amélioration de leurs résultats. La recherche de modèles satisfaisants répond à deux objectifs: d'une part, elle permet de mieux expliquer le comportement hydrologique d'un bassin versant, et d'autre part, elle assure une plus grande fiabilité pour les applications qui utilisent des simulations de modèles dans un contexte opérationnel.

Deux approches distinctes ont été utilisées dans le développement des modèles. La première méthode consistait à combiner des sous-modèles (modules) interdépendants, dont chacun représentait un processus spécifique, en l'occurrence un module de séparation des écoulements, un module de production (infiltration) et un module de transfert. La seconde méthode consistait à adapter un modèle de bassin versant existant.

Concernant la première approche, cinq modèles de production ont été choisis en fonction de leur applicabilité aux données disponibles, en l'occurrence la méthode SCS-CN associée à trois niveaux de conditions d'humidité antécédentes (AMC) et quatre méthodes dérivées de la méthode SCS-CN, qui sont basées sur l'incorporation de la quantité d'humidité antécédente (AMA). Ces fonctions productions ont été couplées à la fois à un modèle de séparation des écoulements, à savoir le modèle du filtre digitale, et au modèle de transfert de NASH.

Pour la seconde approche, une structure de modèle de bassin versant du cadre SUPERFLEX, initialement développée au pas de temps journalier, a été adaptée pour un pas de temps horaire et pour une modélisation événementielle. En effet, un réservoir d'interception de capacité variable a été ajouté pour conceptualiser les pertes initiales qui se produisent au début d'un événement pluvieux. De plus, la capacité initiale du réservoir de production a été reliée à un indicateur externe, en l'occurrence P_5 . En outre, nous avons associé, parallèlement,

un modèle de séparation de écoulement, ainsi, le réservoir de routage a été considéré vide au début de chaque évènement pluvieux.

Nous avons suivi une procédure d'évaluation standardisée pour mettre les six modèles sur un pied d'égalité, en les testant dans des conditions identiques avec les mêmes données d'entrée et la même procédure d'optimisation.

Les performances des modèles ont été examinées sur un échantillon de cinq bassins versants algériens, comprenant trois bassins versants orientaux et deux bassins versants situés au Centre du pays, avec des conditions climatiques et géologiques distinctes, afin de garantir une bonne représentativité et un diagnostic robuste sous différents situations hydro-climatiques et géomorphologiques. Ainsi, nous avons constitué un ensemble de 94 évènements pour les tests de modélisation.

Nous avons adopté l'approche du test sur échantillon fractionné (the Split-Sample test), qui consiste à diviser l'échantillon des données en un ensemble de calibration et un ensemble de validation. Il s'agit sans aucun doute de la méthode la plus courante, mais il doit être effectué avec prudence dans le cadre de la modélisation événementielle en raison de la disparité des magnitudes d'évènements. En effet, une sélection trop aléatoire des ensembles de calage et de validation peut affecter le processus de calage en le faisant converger vers des minima locaux. De ce fait, l'algorithme DUPLEX, qui a permis une sélection de sous-ensembles représentatifs en maximisant les distances euclidiennes entre les sous-ensembles, a été appliqué pour la constitution des ensembles de calage et de validation. Cette approche constitue l'une des innovations méthodologiques proposée dans cette thèse de doctorat.

Le cadre de notre étude, qui s'est concentré sur la modélisation événementielle des crues, nous a incités à considérer une variété d'objectifs lors de l'optimisation des modèles. En conséquence, nous avons choisi un ensemble de critères de performance, chacun remplissant une fonction particulière, pour évaluer la qualité des modèles. Cette approche visait, d'une part, à assurer une prévision efficace des volumes de crue, des formes des hydrogrammes de crue et des débits de pointe, et d'autre part, à mettre tous les évènements sur un pied d'égalité en leur donnant des poids équivalents.

La phase d'optimisation, visant à estimer les paramètres des modèles pour chacun des bassins versants, a été menée à l'aide de la méthode des algorithmes génétiques (AG), qui fait partie des algorithmes évolutionnaires les plus populaires et les plus utilisés pour l'optimisation en hydrologie. Toutefois, l'algorithme évolutif multi-objectif basé sur le tri non dominé (NSGA-II) a été utilisé pour contourner les limites des AG pouvant apparaître lors dans les problèmes d'optimisation multicritères. Toutefois, au lieu de générer un seul ensemble de paramètres, l'optimisation multicritère génère un ensemble de paramètres appelé ensemble de solutions de Pareto, selon des compromis entre les différentes fonctions objectives.

Le choix de la meilleure solution parmi celles du front de Pareto n'est pas chose aisée. Par conséquent, nous avons eu recours à l'utilisation d'une méthode de prise de décision multicritère, en l'occurrence la méthode TOPSIS, pour sélectionner la bonne alternative parmi le nombre prédéterminé d'alternatives. Cette approche constitue également l'une des innovations méthodologiques de cette thèse.

Les résultats des six structures de modèles pluie-débit ont été analysés, à la fois en phases de calage et en phase de validation, en raison du nombre restreint des évènements. Les résultats ont été évalués en deux étapes : d'abord, les performances volumétriques des modèles ont été évaluées, puis les modèles les plus efficaces ont fait l'objet d'une évaluation des performances hydrométriques.

Le modèle M1, qui consiste en la méthode SCS-CN combinée à trois niveaux d'AMC, a été le modèle plus médiocre quant à sa capacité à prédire les volumes de crues pour l'ensemble des bassins versants étudiés. De même, il a montré des biais importants à l'échelle des évènements. Cette mauvaise performance est liée à l'incohérence du concept en lui-même, car la relation mathématique discontinue entre l'humidité antécédente (P_5) aux niveaux d'AMC induit des sauts brusques dans les valeurs de CN . En conséquence, nous concluons que le concept de l'AMC, tel qu'il est formulé, est inadéquat pour le contexte hydro-climatique semi-aride Algérien.

Sur la base de critères de performance globaux, à savoir les critères BIAS, MARE, MAE, les modèles SCS modifiés (M2, M3, M4 et M5) ainsi que le modèle de bassin versant (MBV), presque tous semblaient être efficaces. L'analyse poussée des performances au regard du critère numérique PBIAS a, en revanche, révélé une dispersion importante des valeurs de PBIAS pour le modèle MBV, ainsi que des valeurs au-delà de la plage admissible pour certains évènements. Ce manque de résilience du modèle MBV est causé soit par sa structure à réservoirs qui, du fait de sa grande complexité, ne permet pas une optimisation efficace, soit par la procédure d'intégration de P_5 , qui a été faite de manière assez rudimentaire. En conséquence, nous concluons que le concept actuel du modèle MBV nécessite plus de raffinement dans l'intégration de l'humidité antécédente avant de pouvoir être considéré comme un modèle fiable.

Les modèles M2, M3, M4 et M5 sont tous du même niveau de complexité, et ils se sont montrés plus efficaces lors de l'évaluation volumétrique. Cependant, le modèle « ultime » répondant à tous les critères pour tous les bassins versants n'a pu être identifié. De ce fait, nous avons procédé à l'analyse de la cohérence structurelle et interne de ces modèles en les testant pour différents scénarios hypothétiques d'humidité antécédente. En fait, les paramètres optimaux obtenus pour chaque bassin versant ont été utilisés pour simuler les coefficients de ruissellements sous différents scénarios. À la suite de cette analyse, nous avons pu identifier de sérieuses anomalies et inconsistances dans les structures des modèles M2 et M3, notamment pour les scénarios humide et fortement humide, où des allures des courbes de C_r comportaient des cassures importantes ainsi que des disparités pour les faibles précipitations. Les modèles M4 et M5, par contre, se sont montrés plus stables pour les différents scénarios, ce qui implique que les procédures de comptabilisation de l'humidité du sol (SMA) sous-jacentes de ces modèles ont permis de contourner les limites de modèles antérieurs quant à l'introduction de l'effet de l'humidité initiale, tout en préservant le concept original de la méthode SCS-CN stipulant que le coefficient de ruissellement et le degré de saturation du sol soient identiques.

Les modèles M2 et M3 étaient efficaces dans certains bassins versants en dépit des inconstances structurelles. Par conséquent, tous les modèles SCS-CN modifiés ont fait l'objet d'une évaluation des performances hydrométriques, qui consistait à évaluer la capacité des

modèles à reproduire, d'une part, les formes des hydrogrammes de crue observés en utilisant les critères de performance KGE, KGE' et NRMSE, et d'autre part, les débits de pointe et leurs temps d'apparition en utilisant les critères de performance PPEAK et TPEAK.

Cette analyse a indiqué que les modèles ont produit des résultats satisfaisants selon les critères de performances utilisés. Cependant, excepté le modèle M3, chaque modèle était efficace pour un critère spécifique dans un bassin en particulier. De ce fait, aucun modèle idéal répondant à tous les critères, pour l'ensemble des bassins, n'a été identifié. En conséquence, les sorties des modèles M2, M4 et M5 ont été combinées par la méthode de combinaison à moyenne pondérée (WA), ce qui a permis de réduire la faiblesse de chaque modèle et d'affiner les résultats en assurant un équilibre raisonnable entre les critères des performances.

En outre, l'analyse menée pour l'identification de liens entre les paramètres de modèles et les différents descripteurs de bassin versant, en l'occurrence les descripteurs de sol, géologiques et hydrogéologiques, a révélé la présence de corrélations intéressantes, spécialement pour les paramètres reflétant la perméabilité, l'écoulement de base et les pertes initiales.

Perspectives de recherche

L'intérêt principal de nos travaux réside dans les préoccupations pratiques de gestion des risques et des ressources en eau dans la région semi-aride d'Algérie, où la plupart des oueds nécessitent des modèles performants capables de simuler les débits liés aux événements pluvieux. L'utilisation du modèle combiné comme un outil d'aide à la décision serait utile dans la conception et la gestion des barrages et des ouvrages hydrauliques dans les bassins étudiés compte tenu de ces performances. Il peut également être utilisé dans le calcul des ouvrages de protection contre les inondations. Cependant, avant d'envisager une application opérationnelle, certaines améliorations doivent être envisagées, ainsi que des vérifications supplémentaires. Nous mettons en évidence ci-dessous quelques perspectives que laissent entrevoir les résultats de cette thèse.

Le nombre réduit de bassins versants étudiés et le manque de données hydro-météorologiques au pas de temps horaire pour d'autres bassins constituent un handicap dans ce type de travaux. De plus, ils ne nous ont pas permis d'expliquer convenablement la variation des paramètres des modèles par des descripteurs morphologiques, géologiques ou pédologiques de bassins versants. Par conséquent, d'avantage de bassins versants dans d'autres régions du pays et du Maghreb devraient être étudiés pour valider la pertinence des modèles et envisager leur éventuelle régionalisation.

Les modèles M2, M4 et M5 partagent les mêmes modules de séparation des écoulements et de transfert et se différencient par leurs fonctions de productions. Cependant, la variabilité des paramètres des modules en commun reflète l'interdépendance des différents modules constituant les modèles. Ceci nous interpelle sur d'éventuels biais structuraux pouvant brider la procédure de calage. Par conséquent, nous proposons d'explorer un fondement mathématique plus solide quant à la modélisation des débits de base et aussi les éventuels échanges pouvant survenir avec le souterrain ou les bassins versants mitoyens.

Références bibliographiques

“ Les savants des temps passés et des nations révolues n’ont cessé de composer des livres. Ils l’ont fait pour léguer leur savoir à ceux qui les suivent. Ainsi demeurera vive la quête de la vérité.” Al-Khwarizmi

- [1] Abbaspour KC, Rouholahnejad E, Vaghefi S, et al (2015) A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *J Hydrol* 524:733-752. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>
- [2] Abbott MB, Bathurst JC, Cunge JA, et al (1986a) An introduction to the European Hydrological System—Systeme Hydrologique Europeen,“SHE”, 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system. *J Hydrol* 87:61-77
- [3] Abbott MB, Bathurst JC, Cunge JA, et al (1986b) An introduction to the European Hydrological System—Systeme Hydrologique Europeen,“SHE”, 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *J Hydrol* 87:45-59
- [4] Abdi I, Meddi M (2015) Modélisation pluie-débit distribuée dans deux bassins versants de l’est de l’Algérie. *LARHYSS J P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2602-7828* 7-22
- [5] Abdi I, Meddi M (2020a) Comparison of conceptual rainfall–runoff models in semi-arid watersheds of eastern Algeria. *J Flood Risk Manag e*12672. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12672>
- [6] Abdi I, Meddi M (2020b) Study on the applicability of the SCS-CN-based models to simulate floods in the semi-arid watersheds of northern Algeria. *Acta Geophys* 1-14. <https://doi.org/10.1007/s11600-020-00511-3>
- [7] Abdulkareem JH, Sulaiman WNA, Pradhan B, Jamil NR (2018) Relationship between design floods and land use land cover (LULC) changes in a tropical complex catchment. *Arab J Geosci* 11:376. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12517-018-3702-4>
- [8] Ahmadisharaf E, Tajrishy M, Alamdari N (2016) Integrating flood hazard into site selection of detention basins using spatial multi-criteria decision-making. *J Environ Plan Manag* 59:1397-1417
- [9] Ajami NK, Duan Q, Gao X, Sorooshian S (2006) Multimodel combination techniques for analysis of hydrological simulations: Application to distributed model intercomparison project results. *J Hydrometeorol* 7:755-768
- [10] Ajmal M, Waseem M, Ahn J-H, Kim T-W (2015) Improved Runoff Estimation Using Event-Based Rainfall-Runoff Models. *Water Resour Manag* 29:1995-2010. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-0924-z>
- [11] Akaike H (1974) A new look at the statistical model identification. In: Parzen E, Kunio T, Genshiro K (éd) *Selected Papers of Hirotugu Akaike*. Springer, New York, NY, p 215-222
- [12] Akbari M, Shojaeefard MH, Asadi P, Khalkhali A (2017) Hybrid multi-objective optimization of microstructural and mechanical properties of B4C/A356 composites fabricated by FSP using TOPSIS and modified NSGA-II. *Trans Nonferrous Met Soc China* 27:2317-2333
- [13] Althoff D, Rodrigues LN, da Silva DD (2022) Predicting runoff series in ungauged basins of the Brazilian Cerrado biome. *Environ Model Softw* 105315
- [14] Andréassian V, Oddos A, Michel C, et al (2004) Impact of spatial aggregation of inputs and parameters on the efficiency of rainfall-runoff models: A theoretical study using chimera watersheds. *Water Resour Res* 40:. <https://doi.org/10.1029/2003WR002854>
- [15] Arnold JG, Allen PM (1999) Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records. *JAWRA J Am Water Resour Assoc* 35:411-424. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1999.tb03599.x>
- [16] Arnold JG, Srinivasan R, Muttiah RS, Williams JR (1998) Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1. *JAWRA J Am Water Resour Assoc* 34:73-89
- [17] Arsenault R, Brissette F, Martel J-L (2018) The hazards of split-sample validation in hydrological model calibration. *J Hydrol* 566:346-362
- [18] ASCE (1993) Criteria for Evaluation of Watershed Models. *J Irrig Drain Eng* 119:429-442. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1993\)119:3\(429\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1993)119:3(429))
- [19] Asl-Rousta B, Mousavi SJ, Ehtiat M (2017) Model selection techniques in SWAT-based hydrological modelling. In: *EWRA2017-10th Word Congress on Water Resources and Environment*, Panta Rhei, Athens, Greece. p 5-9
- [20] Assaye H, Nyssen J, Poesen J, et al (2021) Curve number calibration for measuring impacts of land management in sub-humid Ethiopia. *J Hydrol Reg Stud* 35:100819. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100819>
- [21] Azad WH, Hassan MH, Ghazali NHM, et al (2020) National Flood Forecasting and Warning System of Malaysia: An Overview. In: Mohd Sidek L, Salih GHA, Boosroh MH (éd) *ICDSME 2019*. Springer Singapore, Singapore, p 264-273
- [22] Babovic V, Keijzer M (2002) Rainfall runoff modelling based on genetic programming. *Hydrol Res* 33:331-346
- [23] Balascio CC, Palmeri DJ, Gao H (1998) Use of a genetic algorithm and multi-objective

- programming for calibration of a hydrologic model. *Trans ASAE* 41:615. <https://doi.org/https://doi.org/10.13031/2013.17229>
- [24] Baltas EA, Dervos NA, Mimikou MA (2007) Determination of the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece. *Hydrol Earth Syst Sci Discuss* 11:1825-1829
- [25] Baudoin A, Chevrel M (1992) Le programme spatial français pour l'Observation de la Terre. *Int J Remote Sens* 13:1083-1101
- [26] Becker A, Serban P (1990) Hydrological models for water-resources system design and operation. Organización Meteorológica Mundial
- [27] Bennett ND, Croke BFW, Guariso G, et al (2013) Characterising performance of environmental models. *Environ Model Softw* 40:1-20
- [28] Berges J-C (2019) GPM, le programme Global Precipitation Measurement (NASA/JAXA)–fondements théoriques et accès à la base de données. *Climatologie* 16:23-51
- [29] Bergström S (1991) Principles and Confidence in Hydrological Modelling. *Hydrol Res* 22:123-136. <https://doi.org/10.2166/nh.1991.0009>
- [30] Bergström S (1992) The HBV model-its structure and applications
- [31] Bergström S (1995) The HBV model. *Comput Model watershed Hydrol* 443-476
- [32] Berthet L (2010) Prévision des crues au pas de temps horaire: pour une meilleure assimilation de l'information de débit dans un modèle hydrologique
- [33] Berthet L, Andréassian V, Perrin C, Javelle P (2009) How crucial is it to account for the antecedent moisture conditions in flood forecasting? Comparison of event-based and continuous approaches on 178 catchments. *Hydrol Earth Syst Sci* 13:819-831. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/hess-13-819-2009>
- [34] Beven K, Binley A (1992) The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrol Process* 6:279-298
- [35] Beven KJ (2011) *Rainfall-runoff modelling: the primer*. John Wiley & Sons
- [36] Beven KJ, Kirkby MJ (1979) A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrol Sci J* 24:43-69
- [37] Blasone R-S, Madsen H, Rosbjerg D (2006) Comparison of parameter estimation algorithms in hydrological modelling. In: *ModelCare 2005 Conference*. IAHS Press, p 67-72
- [38] Blöschl G, Sivapalan M (1995) Scale issues in hydrological modelling: a review. *Hydrol Process* 9:251-290
- [39] Boutaghane H (2016) Development of peri-urban catchment hydrological model with the multi-outlet approach. *Arab J Geosci* 9:1-15
- [40] Bradford RA, O'Sullivan JJ, Van der Craats IM, et al (2012) Risk perception--issues for flood management in Europe. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 12:
- [41] Braud I, Vincendon B, Anquetin S, et al (2018) 3 - The Challenges of Flash Flood Forecasting. In: *Lutoff C, Durand SBT-M in the F of EHE 1 (éd)*. Elsevier, p 63-88
- [42] Brigandi G, Aronica GT, Bonaccorso B, et al (2017) Flood and landslide warning based on rainfall thresholds and soil moisture indexes: the HEWS (Hydrohazards Early Warning System) for Sicily. *Adv Geosci* 44:79-88. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/adgeo-44-79-2017>
- [43] Bringas RV (2016) Deterministic hydrological modeling for flood risk assessment in large urban environments: application to Mexico City
- [44] Brocca L, Liersch S, Melone F, et al (2013) Application of a model-based rainfall-runoff database as efficient tool for flood risk management. *Hydrol Earth Syst Sci* 17:3159
- [45] Brocca L, Melone F, Moramarco T (2008) On the estimation of antecedent wetness conditions in rainfall-runoff modelling. *Hydrol Process* 22:629-642. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/hyp.6629>
- [46] Brocca L, Melone F, Moramarco T (2011) Distributed rainfall-runoff modelling for flood frequency estimation and flood forecasting. *Hydrol Process* 25:2801-2813. <https://doi.org/10.1002/hyp.8042>
- [47] Brocca L, Melone F, Moramarco T, Morbidelli R (2009a) Antecedent wetness conditions based on ERS scatterometer data. *J Hydrol* 364:73-87. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.10.007>
- [48] Brocca L, Melone F, Moramarco T, Singh VP (2009b) Assimilation of observed soil moisture data in storm rainfall-runoff modeling. *J Hydrol Eng* 14:153-165. [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2009\)14:2\(153\)](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2009)14:2(153))
- [49] Bruen M, Dooge JCI (1984) An efficient and robust method for estimating unit hydrograph

- ordinates. *J Hydrol* 70:1-24. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694\(84\)90110-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694(84)90110-0)
- [50] Burnash RJC, Ferral RL, McGuire RA (1973) A generalized streamflow simulation system: Conceptual modeling for digital computers. US Department of Commerce, National Weather Service, and State of California ...
- [51] Burton JS (1993) Proceedings of the Federal Interagency Workshop on Hydrologic Modeling Demands for the 90's. In: Federal Interagency Workshop on Hydrologic Modeling Demands for the 90's (1993: Fort Collins, Colo.). For sale by the Branch of Distribution
- [52] CCI Land Cover team (2017) CCI LAND COVER - S2 prototype Land Cover 20m map of Africa 2016
- [53] Cerdà V, Cerdà JL, Idris AM (2016) Optimization using the gradient and simplex methods. *Talanta* 148:641-648
- [54] Chahinian N, Moussa R, Andrieux P, Voltz M (2005) Comparison of infiltration models to simulate flood events at the field scale. *J Hydrol* 306:191-214. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.09.009>
- [55] Chang TK, Talei A, Alaghmand S, Ooi MP-L (2017) Choice of rainfall inputs for event-based rainfall-runoff modeling in a catchment with multiple rainfall stations using data-driven techniques. *J Hydrol* 545:100-108. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.12.024>
- [56] Chapman TOMG (1996) COMMON UNITGRAPHS FOR SETS OF RUNOFF EVENTS. PART 1: UNITGRAPH IDENTIFICATION FROM STREAMFLOW DATA. *Hydrol Process* 10:773-782. [https://doi.org/https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199606\)10:6<773::AID-HYP370>3.0.CO;2-S](https://doi.org/https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199606)10:6<773::AID-HYP370>3.0.CO;2-S)
- [57] Chien H, Mackay DS (2019) Assessing effects of model complexity and structure on predictions of hydrological responses using serial and parallel model design. *Hydrol Process* n/a: <https://doi.org/10.1002/hyp.13594>
- [58] Chiew FHS, Peel MC, Western AW (2002) Application and testing of the simple rainfall-runoff model SIMHYD. *Math Model small watershed Hydrol Appl* 335-367
- [59] Chow VT (1959) *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill Civ Eng Ser
- [60] Chow VT, Maidment DR, Mays LW (1988) *Applied hydrology*, McGraw-Hil. New York.
- [61] Clarke RT (1973) A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use. *J Hydrol* 19:1-20. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694\(73\)90089-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694(73)90089-9)
- [62] Clemen RT, Murphy AH, Winkler RL (1995) Screening probability forecasts: contrasts between choosing and combining. *Int J Forecast* 11:133-145
- [63] Cohen KM, Harper DAT, Gibbard PL, Fan J-X (2018) ICS international chronostratigraphic chart 2018/08
- [64] Commission Européenne (2007) Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks
- [65] Coron L, Thirel G, Delaigue O, et al (2017) The suite of lumped GR hydrological models in an R package. *Environ Model Softw* 94:166-171
- [66] Crawford NH, Linsley RK (1966) *Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV*. Palo Alto, Calif.
- [67] CRED-UNISDR (2018) Economic Losses, Poverty & DISASTERS. https://www.preventionweb.net/files/61119_credeconomiclosses.pdf
- [68] Cummings NW (1936) Evaporation from water-surfaces: Status of present knowledge and need for further investigations. *Eos, Trans Am Geophys Union* 17:507-509
- [69] Cunge JA (1969) On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method). *J Hydraul Res* 7:205-230
- [70] Dahak A, Boutaghane H (2019) Identification of flow components with the trigonometric hydrograph separation method: a case study from Madjez Ressoul catchment, Algeria. *Arab J Geosci* 12:1-10
- [71] Dalu MTB, Shackleton CM, Dalu T (2018) Influence of land cover, proximity to streams and household topographical location on flooding impact in informal settlements in the Eastern Cape, South Africa. *Int J Disaster Risk Reduct* 28:481-490. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.12.009>
- [72] Daniel EB, Camp J V, LeBoeuf EJ, et al (2011) Watershed modeling and its applications: A state-of-the-art review. *Open Hydrol J* 5:
- [73] Darand M, Amanollahi J, Zandkarimi S (2017) Evaluation of the performance of TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) estimation over Iran. *Atmos Res* 190:121-127
- [74] Daszykowski M (2016) Matlab code for the Duplex uniform subset selection algorithm

- [75] Daszykowski M, Walczak B, Massart DL (2002) Representative subset selection. *Anal Chim Acta* 468:91-103
- [76] Davies JAC, Beven K (2015) Hysteresis and scale in catchment storage, flow and transport. *Hydrol Process* 29:3604-3615. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/hyp.10511>
- [77] Dawdy DR, O'Donnell T (1965) Mathematical models of catchment behavior. *J Hydraul Div* 91:123-137
- [78] Dawson CW, Abrahart RJ, See LM (2007) HydroTest: a web-based toolbox of evaluation metrics for the standardised assessment of hydrological forecasts. *Environ Model Softw* 22:1034-1052
- [79] Deb K, Agrawal S, Pratap A, Meyarivan T (2000) A Fast Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization: NSGA-II BT - Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI. In: Schoenauer M, Deb K, Rudolph G, et al. (éd). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, p 849-858
- [80] Dilley M, Chen RS, Deichmann U, et al (2005) Natural disaster hotspots: a global risk analysis. The World Bank
- [81] Djellouli Y, Saci A (2003) Catastrophe «naturelle»: les inondations dévastatrices du 9 et 10 novembre 2001 à Bab El Oued (Alger, Algérie). *Publ l'Association Int Climatol* 23:236-242
- [82] Dong C (2018) Remote sensing, hydrological modeling and in situ observations in snow cover research: A review. *J Hydrol* 561:573-583
- [83] Donigian AS, Imhoff J (2006) History and evolution of watershed modeling derived from the Stanford Watershed Model. *Watershed Model* 21-45
- [84] Donmez C, Cilek A, Paul C, Berberoglu S (2021) Implementing a Proxy-Basin Strategy to Assess the Transposability of a Hydrological Model in Geographically Similar Catchments. *Sustainability* 13:11393
- [85] Dooge JCI (1959) A general theory of the unit hydrograph. *J Geophys Res* 64:241-256. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/JZ064i002p00241>
- [86] Duan Q, Schaake J, Andréassian V, et al (2006) Model Parameter Estimation Experiment (MOPEX): An overview of science strategy and major results from the second and third workshops. *J Hydrol* 320:3-17
- [87] Duan QY, Gupta VK, Sorooshian S (1993) Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *J Optim Theory Appl* 76:501-521
- [88] Duan S-B, Li Z-L, Li H, et al (2019) Validation of Collection 6 MODIS land surface temperature product using in situ measurements. *Remote Sens Environ* 225:16-29
- [89] Duband D, Obled C, Rodriguez JY (1993) Unit hydrograph revisited: an alternate iterative approach to UH and effective precipitation identification. *J Hydrol* 150:115-149. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694\(93\)90158-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694(93)90158-6)
- [90] Duncan HP (2019) Baseflow separation – A practical approach. *J Hydrol* 575:308-313. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.040>
- [91] Easa SM (2015a) Evaluation of nonlinear Muskingum model with continuous and discontinuous exponent parameters. *KSCE J Civ Eng* 19:2281-2290
- [92] Easa SM (2015b) Multi-criteria optimisation of the Muskingum flood model: a new approach. In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management. Thomas Telford Ltd, p 220-231
- [93] Eckhardt K (2005) How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrol Process An Int J* 19:507-515. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/hyp.5675>
- [94] Edijatno DE (1999) OLIVEIRA NASCIMENTO N, YANG X, et al. GR3J: a daily watershed model with three free parameters. *Hydrol Sci J* 44:263-277
- [95] El Fels AEA, Bachnou A, Alaa N (2017) Combination of GIS and mathematical modeling to predict floods in semiarid areas: case of Rheraya watershed (Western High Atlas, Morocco). *Arab J Geosci* 10:554. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12517-017-3345-x>
- [96] El Khalki E, Trambly Y, Saidi ME, et al (2018a) Comparison of modeling approaches for flood forecasting in the High Atlas Mountains of Morocco. *Arab J Geosci* 11:15. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12517-018-3752-7>
- [97] El Khalki EM, Trambly Y, El Mehdi Saidi M, et al (2018b) Comparison of modeling approaches for flood forecasting in the High Atlas Mountains of Morocco. *Arab J Geosci* 11:410. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3752-7>
- [98] Elliott J, Catchlove R, Sooriyakumaran S, Thompson R (2005) Recent advances in the development of flood forecasting and warning services in Australia. In: International conference

- on innovation, advances and implementation of flood forecasting technology, Tromsø, Norway. p 17-19
- [99] Estes L, Chen P, Debats S, et al (2018) A large-area, spatially continuous assessment of land cover map error and its impact on downstream analyses. *Glob Chang Biol* 24:322-337. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/gcb.13904>
- [100] Feldman AD (2000) Hydrologic modeling system HEC-HMS, Technical Reference Manual. Tech Ref Man 145. <https://doi.org/CDP-74B>
- [101] Fenicia F, Kavetski D, Savenije HHG (2011) Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling: 1. Motivation and theoretical development. *Water Resour Res* 47:. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2010WR010174>
- [102] Fenicia F, Kavetski D, Savenije HHG, et al (2014) Catchment properties, function, and conceptual model representation: is there a correspondence? *Hydrol Process* 28:2451-2467. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/hyp.9726>
- [103] Ficchi A (2017) An adaptive hydrological model for multiple time-steps: Diagnostics and improvements based on fluxes consistency
- [104] Ficchi A, Perrin C, Andréassian V (2016) Impact of temporal resolution of inputs on hydrological model performance: An analysis based on 2400 flood events. *J Hydrol* 538:454-470
- [105] Ficchi A, Perrin C, Andréassian V (2019) Hydrological modelling at multiple sub-daily time steps: Model improvement via flux-matching. *J Hydrol* 575:1308-1327
- [106] Fischer BMC, van Meerveld HJ, Seibert J (2017) Spatial variability in the isotopic composition of rainfall in a small headwater catchment and its effect on hydrograph separation. *J Hydrol* 547:755-769
- [107] Fortin J, Moussa R, Bocquillon C, Villeneuve J (1995) Hydrotel, un modèle hydrologique distribué pouvant bénéficier des données fournies par la télédétection et les systèmes d'information géographique. *Rev des Sci l'eau/Journal Water Sci* 8:97-124
- [108] Fowler K, Peel M, Western A, Zhang L (2018) Improved rainfall-runoff calibration for drying climate: Choice of objective function. *Water Resour Res* 54:3392-3408
- [109] Franchini M (1996) Use of a genetic algorithm combined with a local search method for the automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models. *Hydrol Sci J* 41:21-39. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/02626669609491476>
- [110] Garen DC, Moore DS (2005) Curve number hydrology in water quality modeling: Uses, abuses, and future directions 1. *JAWRA J Am Water Resour Assoc* 41:377-388
- [111] Gasmelseid TM (2010) Handbook of Research on Hydroinformatics: Technologies, Theories and Applications: Technologies, Theories and Applications. IGI Global
- [112] Gaume E, Bain V, Bernardara P, et al (2009) A compilation of data on European flash floods. *J Hydrol* 367:70-78. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.12.028>
- [113] Geetha K, Mishra SK, Eldho TI, et al (2007) Modifications to SCS-CN Method for Long-Term Hydrologic Simulation. *J Irrig Drain Eng* 133:475-486. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:5\(475\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:5(475))
- [114] Genereux DP, Hooper RP (1998) Oxygen and hydrogen isotopes in rainfall-runoff studies. In: *Isotope tracers in catchment hydrology*. Elsevier, p 319-346
- [115] Georgiades A, Sharma S, Kipouros T, Savill M (2019) ADOPT: An augmented set-based design framework with optimisation. *Des Sci* 5:e4. <https://doi.org/DOI: 10.1017/dsj.2019.1>
- [116] Gill MA (1977) Routing of floods in river channels. *Hydrol Res* 8:163-170
- [117] Gill MA (1978) Flood routing by the Muskingum method. *J Hydrol* 36:353-363
- [118] Gnouma R (2006) Aide à la calibration d'un modèle hydrologique distribué au moyen d'une analyse des processus hydrologiques: application au bassin versant de l'Yzeron
- [119] Golberg DE (1989) Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Addison Wesley. Reading
- [120] Goswami M, O'CONNOR KM (2007) Comparative assessment of six automatic optimization techniques for calibration of a conceptual rainfall—runoff model. *Hydrol Sci J* 52:432-449
- [121] Green WH, Ampt GA (1911) Studies on Soil Physics. *J Agric Sci* 4:1-24
- [122] Guhathakurta P, Sreejith OP, Menon PA (2011) Impact of climate change on extreme rainfall events and flood risk in India. *J earth Syst Sci* 120:359
- [123] Gupta H V, Beven KJ, Wagener T (2005) Model Calibration and Uncertainty Estimation. *Encycl. Hydrol. Sci*.
- [124] Gupta H V, Kling H, Yilmaz KK, Martinez GF (2009) Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *J Hydrol*

- 377:80-91. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- [125] Gupta HV, Perrin C, Blöschl G, et al (2014) Large-sample hydrology: a need to balance depth with breadth
- [126] Hadeid M (2018) Impact des inondations et problématique de la gestion des risques naturels en milieu urbain saharien algérien. *Les Cah d'EMAM*. <https://doi.org/10.4000/emam.1516>
- [127] Hawkins RH, Hjelmfelt AT, Zevenbergen AW (1985) Runoff Probability, Storm Depth, and Curve Numbers. *J Irrig Drain Eng* 111:330-340. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1985\)111:4\(330\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1985)111:4(330))
- [128] Hayami S (1951) On the propagation of flood waves. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University. Bulletin
- [129] Hebal A, Remini B (2011) Choix du modèle fréquentiel le plus adéquat à l'estimation des valeurs extrêmes de crues (cas du nord de L'Algérie). *Can J Civ Eng* 38:881 -892
- [130] Heris MK (2015) NSGA-II in MATLAB
- [131] Hingray B, Picouet C, Musy A (2015) *Hydrology A Science for Engineers*. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton.
- [132] Holland JH (1975) *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. Ann Arbor University of Michigan Press
- [133] Holland JH (1992) *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. MIT Press Cambridge, MA, USA
- [134] Hong Y, Zhang Y, Khan SI (2016) *Hydrologic remote sensing: capacity building for sustainability and resilience*. CRC Press
- [135] Hooke R, Jeeves TA (1961) *Journal of the Association of Computing Machinery*
- [136] Hoover MD, Hursh CR (1943) Influence of topography and soil-depth on runoff from forest land. *Eos, Trans Am Geophys Union* 24:693-698
- [137] Horton RE (1933) The Rôle of infiltration in the hydrologic cycle. *Trans Am Geophys Union* 14:446. <https://doi.org/10.1029/TR014i001p00446>
- [138] Horton RE (1939) Analysis of runoff-plat experiments with varying infiltration-capacity. *Eos, Trans Am Geophys Union* 20:693-711
- [139] Horton RE (1940) Approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. In: *Proceedings of Soil Science Society of America*. p 399-517
- [140] Hossain S, Hewa GA, Wella-Hewage S (2019) A Comparison of Continuous and Event-Based Rainfall-Runoff (RR) Modelling Using EPA-SWMM. *Water* 11:611. <https://doi.org/10.3390/w11030611>
- [141] Hrachowitz M, Savenije HHG, Blöschl G, et al (2013) A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB)—a review. *Hydrol Sci J* 58:1198-1255
- [142] Hubert P (2001) *Glossaire international d'hydrologie*. Dispon sur le site <http://www.cig.enscm.fr/~hubert/glu/aglo.htm>
- [143] Huffman GJ, Adler RF, Bolvin DT, et al (2007) The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *J Hydrometeorol* 8:38-55. <https://doi.org/10.1175/JHM560.1>
- [144] Hughes DA (2011) Regionalization of models for operational purposes in developing countries: an introduction. *Hydrol Res* 42:331-337
- [145] Humphrey GB, Gibbs MS, Dandy GC, Maier HR (2016) A hybrid approach to monthly streamflow forecasting: integrating hydrological model outputs into a Bayesian artificial neural network. *J Hydrol* 540:623-640
- [146] Hundecha Y, Bárdossy A (2004) Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model. *J Hydrol* 292:281-295
- [147] Hursh CR, Brater EF (1941) Separating storm-hydrographs from small drainage-areas into surface-and subsurface-flow. *Eos, Trans Am Geophys Union* 22:863-871
- [148] Hütt C, Koppe W, Miao Y, Bareth G (2016) Best accuracy land use/land cover (LULC) classification to derive crop types using multitemporal, multisensor, and multi-polarization SAR satellite images. *Remote Sens* 8:684
- [149] Hwang C-L, Lai Y-J, Liu T-Y (1993) A new approach for multiple objective decision making. *Comput Oper Res* 20:889-899. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0305-0548\(93\)90109-V](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0305-0548(93)90109-V)
- [150] Izzard CF (1944) The surface-profile of overland-flow. *Eos, Trans Am Geophys Union* 25:959-968
- [151] Jaiswal RK, Ali S, Bharti B (2020) Comparative evaluation of conceptual and physical rainfall-

- runoff models. *Appl Water Sci* 10:48. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1122-6>
- [152] Jakeman AJ, Hornberger GM (1993) How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model? *Water Resour Res* 29:2637-2649
- [153] Jakeman AJ, Littlewood IG, Whitehead PG (1990) Computation of the instantaneous unit hydrograph and identifiable component flows with application to two small upland catchments. *J Hydrol* 117:275-300. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694\(90\)90097-H](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694(90)90097-H)
- [154] Jha AK, Bloch R, Lamond J (2012) Cities and flooding: a guide to integrated urban flood risk management for the 21st century. The World Bank
- [155] Kalbus E, Reinstorf F, Schirmer M (2006) Measuring methods for groundwater–surface water interactions: a review. *Hydrol Earth Syst Sci* 10:873-887
- [156] Katoch S, Chauhan SS, Kumar V (2021) A review on genetic algorithm: past, present, and future. *Multimed Tools Appl* 80:8091-8126. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-10139-6>
- [157] Kavetski D, Fenicia F (2011) Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling: 2. Application and experimental insights. *Water Resour Res* 47:. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2011WR010748>
- [158] Koblouti M, Ouerdachi L, Berhail S (2015) The use of weather radar for rainfall-runoff modeling, case of Seybouse watershed (Algeria). *Arab J Geosci* 8:1-11
- [159] Keulegan GH (1944) Spatially variable discharge over a sloping plane. *Eos, Trans Am Geophys Union* 25:956-959
- [160] Kidd C, Kniveton DR, Todd MC, Bellerby TJ (2003) Satellite rainfall estimation using combined passive microwave and infrared algorithms. *J Hydrometeorol* 4:1088-1104
- [161] Kim Y-O, Jeong D, Ko IH (2006) Combining rainfall-runoff model outputs for improving ensemble streamflow prediction. *J Hydrol Eng* 11:578-588
- [162] Kirchner JW (2009) Catchments as simple dynamical systems: Catchment characterization, rainfall-runoff modeling, and doing hydrology backward. *Water Resour Res* 45:. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2008WR006912>
- [163] Kirkby MJ, Chorley RJ (1967) THROUGHFLOW, OVERLAND FLOW AND EROSION. *Int Assoc Sci Hydrol Bull* 12:5-21. <https://doi.org/10.1080/02626666709493533>
- [164] Klemeš V (1983) Conceptualization and scale in hydrology. *J Hydrol* 65:1-23
- [165] Klemeš V (1986) Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrol Sci J* 31:13-24
- [166] Kling H, Fuchs M, Paulin M (2012) Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *J Hydrol* 424-425:264-277. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.011>
- [167] Koks EE, Jongman B, Husby TG, Botzen WJW (2015) Combining hazard, exposure and social vulnerability to provide lessons for flood risk management. *Environ Sci Policy* 47:42-52. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsci.2014.10.013>
- [168] Kostiaikov AN (1932) On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and the necessity of studying it from the dynamic point of view for the purposes of amelioration. *Trans Sixth Comm Int Soc Soil Sci* 1:7-21
- [169] Kouwen N (1988) WATFLOOD: a micro-computer based flood forecasting system based on real-time weather radar. *Can Water Resour J* 13:62-77
- [170] Krajewski WF, Lakshmi V, Georgakakos KP, Jain SC (1991) A Monte Carlo study of rainfall sampling effect on a distributed catchment model. *Water Resour Res* 27:119-128
- [171] Krøgli IK, Devoli G, Colleuille H, et al (2018) The Norwegian forecasting and warning service for rainfall- and snowmelt-induced landslides. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 18:1427-1450. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1427-2018>
- [172] Krzysztofowicz R (1999) Bayesian theory of probabilistic forecasting via deterministic hydrologic model. *Water Resour Res* 35:2739-2750. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/1999WR900099>
- [173] Kuichling E (1889) The relation between the rainfall and the discharge of sewers in populous districts. *Trans Am Soc Civ Eng* 20:1-56
- [174] Laborde JP (2000) *Éléments d'hydrologie de surface*. Univ Nice-Sophia Antipolis Fr
- [175] Lai Y-J, Liu T-Y, Hwang C-L (1994) Topsis for MODM. *Eur J Oper Res* 76:486-500
- [176] Le Moine N (2008) Le bassin versant de surface vu par le souterrain: une voie d'amélioration des performances et du réalisme des modèles pluie-débit?
- [177] Le Moine N, Andréassian V, Perrin C, Michel C (2007) How can rainfall-runoff models handle intercatchment groundwater flows? Theoretical study based on 1040 French catchments. *Water Resour Res* 43:. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2006WR005608>

- [178] Lee C-C, Tan Y-C, Chen C-H, Jim Yeh T-C (2001) Stochastic series lumped rainfall–runoff model for a watershed in Taiwan. *J Hydrol* 249:30-45. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00410-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00410-3)
- [179] Leibundgut C, Maloszewski P, Külls C (2011) Tracers in hydrology. John Wiley & Sons
- [180] Li J, Wong DWS (2010) Effects of DEM sources on hydrologic applications. *Comput Environ Urban Syst* 34:251-261
- [181] Li Z, Yu J, Xu X, et al (2018) Multi-model ensemble hydrological simulation using a BP Neural Network for the upper Yalongjiang River Basin, China. *Proc Int Assoc Hydrol Sci* 379:335
- [182] Liang X (1994) A two-layer variable infiltration capacity land surface representation for general circulation models. Ph D Thesis
- [183] Liang X, Xie Z, Huang M (2003) A new parameterization for surface and groundwater interactions and its impact on water budgets with the variable infiltration capacity (VIC) land surface model. *J Geophys Res Atmos* 108:
- [184] Lin Y-K, Chang P-C, Yeng LC-L, Huang S-F (2019) Bi-objective optimization for a multistate job-shop production network using NSGA-II and TOPSIS. *J Manuf Syst* 52:43-54
- [185] Linsley RK (1982) Rainfall-runoff models-an overview. In: *Proceedings of the international symposium on rainfall-runoff modelling*, edited by: Singh, VP, Water Resources Publications, Littleton, CO. p 3-22
- [186] Liong S-Y, Chan WT, ShreeRam J (1995) Peak-flow forecasting with genetic algorithm and SWMM. *J Hydraul Eng* 121:613-617. [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1995\)121:8\(613\)](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:8(613))
- [187] Liu D (2020) A rational performance criterion for hydrological model. *J Hydrol* 590:125488
- [188] Llasat MC, Llasat-Botija M, Prat MA, et al (2010) High-impact floods and flash floods in Mediterranean countries: the FLASH preliminary database. *Adv Geosci* 23:47-55. <https://doi.org/10.5194/adgeo-23-47-2010>
- [189] Longobardi A, Villani P, Grayson RB, Western AW (2003) On the relationship between runoff coefficient and catchment initial conditions. In: *Proceedings of MODSIM*. Citeseer, p 867-872
- [190] Lyne V, Hollick M (1979) Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling. In: *Institute of Engineers Australia National Conference*. p 89-93
- [191] Madsen H (2000) Automatic calibration of a conceptual rainfall–runoff model using multiple objectives. *J Hydrol* 235:276-288. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00279-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00279-1)
- [192] Madsen H (2003) Parameter estimation in distributed hydrological catchment modelling using automatic calibration with multiple objectives. *Adv Water Resour* 26:205-216
- [193] Meref N, Seddini A (2018) Modeling of flood generation in semi-arid catchment using a spatially distributed model: case of study Wadi Mekerra catchment (Northwest Algeria). *Arab J Geosci* 11:116
- [194] Massari C, Brocca L, Barbetta S, et al (2014a) Using globally available soil moisture indicators for flood modelling in Mediterranean catchments. *Hydrol Earth Syst Sci* 18:839-853. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/hess-18-839-2014>
- [195] Massari C, Brocca L, Ciabatta L, et al (2015) The Use of H-SAF Soil Moisture Products for Operational Hydrology: Flood Modelling over Italy. *Hydrology* 2:2-22. <https://doi.org/10.3390/hydrology2010002>
- [196] Massari C, Brocca L, Moramarco T, et al (2014b) Potential of soil moisture observations in flood modelling: Estimating initial conditions and correcting rainfall. *Adv Water Resour* 74:44-53. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.08.004>
- [197] Mathevet T (2005) Quels modèles pluie-débit globaux au pas de temps horaire? Développements empiriques et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants
- [198] Mawdsley JA, Tagg AF (1981) Identification Of Unit Hydrographs From Multi-Event Analysis. *J Hydrol* 49:315-327. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(81\)80016-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022-1694(81)80016-9)
- [199] Maysara G, Ahmad S, Zhong L, Wael E-D (2020) Hybrid Hydrological Data-Driven Approach for Daily Streamflow Forecasting. *J Hydrol Eng* 25:4019063. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001866](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001866)
- [200] McCarthy GT (1938) The unit hydrograph and flood routing. In: *proceedings of Conference of North Atlantic Division, US Army Corps of Engineers, 1938*. p 608-609
- [201] McDonnell JJ, Stewart MK, Owens IF (1991) Effect of Catchment-Scale Subsurface Mixing on Stream Isotopic Response. *Water Resour Res* 27:3065-3073. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/91WR02025>
- [202] McEnery J, Ingram J, Duan Q, et al (2005) NOAA's advanced hydrologic prediction service:

- building pathways for better science in water forecasting. *Bull Am Meteorol Soc* 86:375-386
- [203] McGuire K, McDonnell J (2007) Stable Isotope Tracers in Watershed Hydrology. *Stable Isot. Ecol. Environ. Sci.* 334-374
- [204] McIntyre N, Lee H, Wheeler H, et al (2005) Ensemble predictions of runoff in ungauged catchments. *Water Resour Res* 41:W12434. <https://doi.org/10.1029/2005WR004289>
- [205] McLeod AI, Noakes DJ, Hipel KW, Thompson RM (1987) Combining hydrologic forecasts. *J Water Resour Plan Manag* 113:29-41
- [206] Meddi M, Hubert P (2003) Impact de la modification du régime pluviométrique sur les ressources en eau du Nord-Ouest de l'Algérie. In: Servat . E., Najem W, Leduc C, Shakeel A (éd) IAHS publication. Wallingford, UK ., p 229-235
- [207] Meddi M, Toumi S, Assani AA (2017) Application of the L-moments approach to the analysis of regional flood frequency in Northern Algeria. *Int J Hydrol Sci Technol* 7:77. <https://doi.org/10.1504/IJHST.2017.080959>
- [208] Mei Y, Anagnostou EN (2015) A hydrograph separation method based on information from rainfall and runoff records. *J Hydrol* 523:636-649. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.083>
- [209] Melsen L, Teuling A, Torfs P, et al (2016a) Representation of spatial and temporal variability in large-domain hydrological models: case study for a mesoscale pre-Alpine basin. *Hydrol Earth Syst Sci* 20:2207-2226
- [210] Melsen LA, Teuling AJ, Torfs PJF, et al (2016b) HESS Opinions: The need for process-based evaluation of large-domain hyper-resolution models. *Hydrol Earth Syst Sci* 20:1069-1079
- [211] Merz R, Parajka J, Blöschl G (2009) Scale effects in conceptual hydrological modeling. *Water Resour Res* 45:
- [212] Michel C (1983) Que peut-on faire en hydrologie avec modèle conceptuel à un seul paramètre? *La Houille Blanche* 39-44
- [213] Michel C, Andréassian V, Perrin C (2005) Soil Conservation Service Curve Number method: How to mend a wrong soil moisture accounting procedure? *Water Resour Res* 41:. <https://doi.org/10.1029/2004WR003191>
- [214] Mishra SK, Jain MK, Suresh Babu P, et al (2008) Comparison of AMC-dependent CN-conversion Formulae. *Water Resour Manag* 22:1409-1420. <https://doi.org/10.1007/s11269-007-9233-5>
- [215] Mishra SK, Sahu RK, Eldho TI, Jain MK (2006) An improved I a S relation incorporating antecedent moisture in SCS-CN methodology. *Water Resour Manag* 20:643-660. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11269-005-9000-4>
- [216] Mishra SK, Singh VP (2002a) SCS-CN-Based Hydrologic Simulation Package. In: Singh VP, Frevert DK (éd) *Mathematical Models in Small Watershed Hydrology and Applications*. Water Resources Publications, Littleton, CO, p 391-464
- [217] Mishra SK, Singh VP (2002b) SCS-CN method. Part I: Derivation of SCS-CN-based models. *Acta Geophys Pol* 50:457-477
- [218] Mishra SK, Singh VP (2003) *Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, ISBN 1-4020-1132-6.
- [219] Mishra SK, Singh VP (2013) *Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology*. Springer Science & Business Media
- [220] Mishra SK, Singh VP, Sansalone JJ, Aravamathan V (2003) A Modified SCS-CN Method: Characterization and Testing. *Water Resour Manag* 17:37-68. <https://doi.org/10.1023/A:1023099005944>
- [221] Mishra SK, Singh VP, Singh PK (2018a) Revisiting the Soil Conservation Service Curve Number Method. In: *Hydrologic Modeling*. Springer, p 667-693
- [222] Mishra SK, Singh VP, Singh PK (2018b) Revisiting the Soil Conservation Service Curve Number Method BT - *Hydrologic Modeling*. In: Singh VP, Yadav S, Yadava RN (éd). Springer Singapore, Singapore, p 667-693
- [223] Monteith JL (1965) Evaporation and environment. In: *Symposia of the society for experimental biology*. Cambridge University Press (CUP) Cambridge, p 205-234
- [224] Mora CR, Schimleck LR (2008) On the selection of samples for multivariate regression analysis: application to near-infrared (NIR) calibration models for the prediction of pulp yield in *Eucalyptus nitens*. *Can J For Res* 38:2626-2634
- [225] Moradkhani H, Sorooshian S (2009) General review of rainfall-runoff modeling: model calibration, data assimilation, and uncertainty analysis. In: *Hydrological modelling and the water cycle*. Springer, p 1-24

- [226] Moramarco T, Pandolfo C, Singh VP (2008) Accuracy of kinematic wave and diffusion wave approximations for flood routing. I: Steady analysis. *J Hydrol Eng* 13:1078-1088
- [227] Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, et al (2007) Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans ASABE* 50:885-900
- [228] Morin G, Fortin JP, Charbonneau R (1975) Utilisation du modèle hydrophysiographique CEQUEAU pour l'exploitation des réservoirs artificiels. *IAHS Publ* 115:176-184
- [229] Motavita DF, Chow R, Guthke A, Nowak W (2019) The comprehensive differential split-sample test: A stress-test for hydrological model robustness under climate variability. *J Hydrol* 573:501-515
- [230] Mouelhi S (2003) Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier
- [231] Mouelhi S, Michel C, Perrin C, Andréassian V (2006) Linking stream flow to rainfall at the annual time step: the Manabe bucket model revisited. *J Hydrol* 328:283-296
- [232] Moussa R, Chahinian N (2009) Comparison of different multi-objective calibration criteria using a conceptual rainfall-runoff model of flood events. *Hydrol Earth Syst Sci* 13:519-535. <https://doi.org/10.5194/hess-13-519-2009>
- [233] Moussa R, Chahinian N, Bocquillon C (2007) Distributed hydrological modelling of a Mediterranean mountainous catchment - Model construction and multi-site validation. *J Hydrol* 337:35-51. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.01.028>
- [234] Mulvany TJ (1850) On the use of self registering rain and flood gauges. In: *Inst. Civ. Eng. Proc.* 4. Dublin, Ireland, p 1-8
- [235] NASA/METI/AIST/Japan Spacesystems, U.S./Japan ASTER Science Team (2009) ASTER Global Digital Elevation Model [Data set]. doi: <https://doi.org/10.5067/ASTER/ASTGTM.002>.
- [236] Nash JE (1957) The form of the instantaneous unit hydrograph. *Int Assoc Sci Hydrol Publ* 3:114-121
- [237] Nelder JA, Mead R (1965) A simplex method for function minimization. *Comput J* 7:308-313
- [238] Ngo AT (2014) Evaluation environnementale du risque d'inondation dans le delta du fleuve Ha Thanh (centre Viêt-Nam)
- [239] Nguyen QS (2019) A distributed parsimonious event-based model for flood forecasting in Mediterranean catchments: efficiency of the model and spatial variability of the parameters. 191
- [240] Nourani V, Hosseini Baghanam A, Adamowski J, Kisi O (2014) Applications of hybrid wavelet-Artificial Intelligence models in hydrology: A review. *J Hydrol* 514:358-377. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.057>
- [241] O'Connell PE (1991) A Historical Perspective. In: Bowles DS, O'Connell PE (éd) *Recent Advances in the Modeling of Hydrologic Systems*. Springer Netherlands, Dordrecht, p 3-30
- [242] Obléd C, Zin I, Hingray B (2009) Choix des pas de temps et d'espace pour des modélisations parcimonieuses en hydrologie des crues. *La Houille Blanche* 81-87
- [243] Oudin L (2004) Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global
- [244] Oudin L, Hervieu F, Michel C, et al (2005) Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model?: Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. *J Hydrol* 303:290-306. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026>
- [245] Paquet E (2004) Evolution du modèle hydrologique MORDOR: modélisation du stock nival à différentes altitudes. *La Houille Blanche* 75-82
- [246] Paudyal GN (2002) Forecasting and warning of water-related disasters in a complex hydraulic setting—the case of Bangladesh. *Hydrol Sci J* 47:S5-S18
- [247] Pearce AJ (1976) Magnitude and frequency of erosion by Hortonian overland flow. *J Geol* 84:65-80
- [248] Pechlivanidis IG, Jackson B, McMillan H, Gupta H (2014) Use of an entropy-based metric in multiobjective calibration to improve model performance. *Water Resour Res* 50:8066-8083
- [249] Pechlivanidis IG, Jackson BM, McIntyre NR, Wheater HS (2011) Catchment scale hydrological modelling: a review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications. *Glob NEST J* 13:193-214
- [250] Peel MC, Finlayson BL, McMahon TA (2007) Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol earth Syst Sci* 11:1633-1644
- [251] Penman HL (1948) Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc R Soc London Ser A Math Phys Sci* 193:120-145

- [252] Penna D, van Meerveld HJ (2019) Spatial variability in the isotopic composition of water in small catchments and its effect on hydrograph separation. *Wiley Interdiscip Rev Water* 6:e1367
- [253] Pereira JLJ (2021) TOPSIS for Meta-heuristics (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/91120-topsis-for-meta-heuristics>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved August 12, 2021.
- [254] Perrin C (2000) Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative Towards an improved version of a lumped rainfall-runoff model through a comparative approach. 1-18
- [255] Perrin C, Michel C, Andréassian V (2001) Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *J Hydrol* 242:275-301
- [256] Perrin C, Michel C, Andréassian V (2003) Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *J Hydrol* 279:275-289. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7)
- [257] Perrin C, Oudin L, Andréassian V, et al (2007) Impact of limited streamflow data on the efficiency and the parameters of rainfall-runoff models. *Hydrol Sci J* 52:131-151. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.1.131>
- [258] Perumal M, Price RK (2013) A fully mass conservative variable parameter McCarthy–Muskingum method: Theory and verification. *J Hydrol* 502:89-102
- [259] Petersen MS (2001) Impacts of flash floods. In: *Coping with flash floods*. Springer, p 11-13
- [260] Philip JR (1957) The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. *Soil Sci* 83:345-358
- [261] Pilon PJ (2002) Guidelines for reducing flood losses. United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR)
- [262] Plate EJ (2002) Flood risk and flood management. *J Hydrol* 267:2-11
- [263] Plate EJ (2009) HESS Opinions: "Classification of hydrological models for flood management". *Hydrol Earth Syst Sci* 13:
- [264] Ponce VM (1979) Simplified Muskingum routing equation. *J Hydraul Div* 105:85-91
- [265] Ponce VM, Hawkins RH (1996) Runoff curve number: Has it reached maturity? *J Hydrol Eng* 1:11-19. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1996\)1:1\(11\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1996)1:1(11))
- [266] Priestley CHB, Taylor RJ (1972) On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon Weather Rev* 100:81-92
- [267] Pushpalatha R, Perrin C, Le Moine N, et al (2011) A downward structural sensitivity analysis of hydrological models to improve low-flow simulation. *J Hydrol* 411:66-76
- [268] Puzyn T, Mostrag-Szlichtyng A, Gajewicz A, et al (2011) Investigating the influence of data splitting on the predictive ability of QSAR/QSPR models. *Struct Chem* 22:795-804. <https://doi.org/10.1007/s11224-011-9757-4>
- [269] Quick MC, Pipes A (1977) UBC WATERSHED MODEL/Le modèle du bassin versant UCB. *Hydrol Sci J* 22:153-161
- [270] Radcliff C, Ford WI, Nazari S, Shepard C (2021) Impact of water source dynamics on dissolved reactive phosphorus loadings in heterogeneous karst agroecosystems with phosphatic limestones. *Hydrol Process* 35:e14422
- [271] Rao R V, Lakshmi RJ (2021) Ranking of Pareto-optimal solutions and selecting the best solution in multi- and many-objective optimization problems using R-method. *Soft Comput Lett* 100015. <https://doi.org/10.1016/j.socl.2021.100015>
- [272] Reed PM, Hadka D, Herman JD, et al (2013) Evolutionary multiobjective optimization in water resources: The past, present, and future. *Adv Water Resour* 51:438-456
- [273] Refsgaard JC (1997) Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models. *J Hydrol* 198:69-97. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03329-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03329-X)
- [274] Refsgaard JC, Knudsen J (1996) Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. *Water Resour Res* 32:2189-2202
- [275] Refsgaard JC, Storm B (1996) Construction, calibration and validation of hydrological models. *Distrib Hydrol Model* 41-54
- [276] Richards LA (1931) Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics (College Park Md)* 1:318-333
- [277] Richardson B (1930) Evaporation as a function of insolation. In: *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*. ASCE, p 945-960
- [278] Roohi M, Soleymani K, Salimi M, Heidari M (2020) Numerical evaluation of the general flow

- hydraulics and estimation of the river plain by solving the Saint–Venant equation. *Model Earth Syst Environ* 6:645–658. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00718-9>
- [279] Rosenbrock H (1960) An automatic method for finding the greatest or least value of a function. *Comput J* 3:175–184
- [280] Saadi M, Oudin L, Ribstein P (2019) Random Forest Ability in Regionalizing Hourly Hydrological Model Parameters. *Water* 11:1540
- [281] Sadeghi M, Asanjan AA, Faridzad M, et al (2019) PERSIANN-CNN: Precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks–convolutional neural networks. *J Hydrometeorol* 20:2273–2289
- [282] Sadeghi M, Ghahraman B, Ziaei AN, et al (2012) Additional scaled solutions to Richards' equation for infiltration and drainage. *Soil Tillage Res* 119:60–69
- [283] Sahu RK, Mishra SK, Eldho TI (2010) An improved AMC-coupled runoff curve number model. *Hydrol Process* 24:2834–2839. <https://doi.org/10.1002/hyp.7695>
- [284] Salah L (2004) Les inondations en Algérie. In: Actes des Journées Techniques/ Risques Naturels : Inondation, Prévision, Protection. CRSTRA, Batna 15 e t16 décembre 2004
- [285] Salomon J-N (1997) L'homme face aux crues et aux inondations. Presses Univ de Bordeaux
- [286] Sardou M, Maouche S, Sabeur B, Missoum H (2018) The November 26 and 27, 1927 devastating flood event (NW Algeria): characterization and reconstruction using historical data. *Arab J Geosci* 11:229. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3590-7>
- [287] Schanze J (2006) FLOOD RISK MANAGEMENT – A BASIC FRAMEWORK BT - Flood Risk Management: Hazards, Vulnerability and Mitigation Measures. In: Schanze J, Zeman E, Marsalek J (éd). Springer Netherlands, Dordrecht, p 1–20
- [288] Schmieder J, Hanzer F, Marke T, et al (2016) The importance of snowmelt spatiotemporal variability for isotope-based hydrograph separation in a high-elevation catchment. *Hydrol Earth Syst Sci* 20:5015–5033
- [289] Schmugge TJ, Kustas WP, Ritchie JC, et al (2002) Remote sensing in hydrology. *Adv Water Resour* 25:1367–1385
- [290] Schultz GA, Engman ET (2012) Remote sensing in hydrology and water management. Springer Science & Business Media
- [291] Schumann AH (2011) Flood risk assessment and management: How to specify hydrological loads, their consequences and uncertainties. Springer Science & Business Media
- [292] Schwarz G (1978) Estimating the dimension of a model. *Ann Stat* 6:461–464
- [293] SCS (1972) SCS National Engineering Handbook. Section 4, Hydrology. In: National Engineering Handbook
- [294] Sene K (2008) Flood warning, forecasting and emergency response. Springer Science & Business Media
- [295] Seong C, Her Y, Benham BL (2015) Automatic calibration tool for hydrologic simulation program-FORTRAN using a shuffled complex evolution algorithm. *Water* 7:503–527
- [296] Shamseldin AY, O'CONNOR KM (1999) A real-time combination method for the outputs of different rainfall-runoff models. *Hydrol Sci J* 44:895–912
- [297] Shao G, Zhang D, Guan Y, et al (2020) Application of different separation methods to investigate the baseflow characteristics of a Semi-Arid Sandy Area, Northwestern China. *Water* 12:434
- [298] Sheffield J, Goteti G, Wood EF (2006) Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling. *J Clim* 19:3088–3111
- [299] Sherman LK (1932) Streamflow from rainfall by the unit-graph method. *Eng News Rec* 108:501–505
- [300] Shi Z-H, Chen L-D, Fang N-F, et al (2009) Research on the SCS-CN initial abstraction ratio using rainfall-runoff event analysis in the Three Gorges Area, China. *Catena* 77:1–7. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.11.006>
- [301] Shrestha DL, Solomatine DP (2008) Data-driven approaches for estimating uncertainty in rainfall-runoff modelling. *Int J River Basin Manag* 6:109–122
- [302] Simpson AR, Dandy GC, Murphy LJ (1994) Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization. *J water Resour Plan Manag* 120:423–443. [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1994\)120:4\(423\)](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1994)120:4(423))
- [303] Singh PK, Mishra SK, Berndtsson R, et al (2015) Development of a Modified SMA Based MSCS-CN Model for Runoff Estimation. *Water Resour Manag* 29:4111–4127. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1048-1>
- [304] Singh SKMVP (1999) BEHAVIOUR OF SCS-CN METHOD IN C-I'a-X SPECTRUM. In:

- Hydrologic Modeling: Proceedings of the International Conference on Water, Environment, Ecology, Socio-economics, and Health Engineering (WEESHE): October 18-21, 1999, Seoul National University, Seoul, Korea. Water Resources Publication, p 112
- [305] Singh VP (1988) Hydrologic systems. Volume I: Rainfall-runoff modeling. Prentice Hall, Englewood Cliffs New Jersey. 1988. 480
- [306] Singh VP (1995) Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications
- [307] Singh VP (1997) THE USE OF ENTROPY IN HYDROLOGY AND WATER RESOURCES. *Hydrol Process* 11:587-626. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199705\)11:6<587::AID-HYP479>3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199705)11:6<587::AID-HYP479>3.0.CO;2-P)
- [308] Singh VP, Frevert DK (2002) Mathematical models of small watershed hydrology and applications. Water Resources Publication
- [309] Singh VP, Frevert DK (2005) Watershed models. CRC Press
- [310] Singh VP, McCann RC (1980) Some notes on Muskingum method of flood routing. *J Hydrol* 48:343-361. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694\(80\)90125-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694(80)90125-0)
- [311] Singh VP, Woolhiser D (2002) Mathematical modeling of watershed hydrology. *J Hydrol Eng* 7:270-292
- [312] Sivapalan M, Wood EF (1986) Spatial Heterogeneity and Scale in the Infiltration Response of Catchments BT - Scale Problems in Hydrology: Runoff Generation and Basin Response. In: Gupta VK, Rodriguez-Iturbe I, Wood EF (éd). Springer Netherlands, Dordrecht, p 81-106
- [313] Sklash MG, Farvolden RN (1979) The role of groundwater in storm runoff in Special issue. *J Hydrol Amsterdam* 43:45-65
- [314] Smith K, Smith K (2013) Environmental Hazards. Routledge
- [315] Snee RD (1977) Validation of regression models: methods and examples. *Technometrics* 19:415-428
- [316] Sobhani G (1976) A review of selected small watershed design methods for possible adoption to Iranian conditions
- [317] Song X, Kong F, Zhan C, Han J (2012) Hybrid optimization rainfall-runoff simulation based on Xinanjiang model and artificial neural network. *J Hydrol Eng* 17:1033-1041
- [318] Sorooshian S, Gupta VK, Fulton JL (1983) Evaluation of maximum likelihood parameter estimation techniques for conceptual rainfall-runoff models: Influence of calibration data variability and length on model credibility. *Water Resour Res* 19:251-259
- [319] Sorooshian S, Hsu K-L, Gao X, et al (2000) Evaluation of PERSIANN system satellite-based estimates of tropical rainfall. *Bull Am Meteorol Soc* 81:2035-2046
- [320] Soulis KX, Valiantzas JD, Dercas N, Londra PA (2009) Investigation of the direct runoff generation mechanism for the analysis of the SCS-CN method applicability to a partial area experimental watershed. *Hydrol Earth Syst Sci* 13:605-615. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/hess-13-605-2009>
- [321] Sperflage JA, Georgakakos KP, Carpenter TM, et al (2004) Central America Flash Flood Guidance (CAFFG) User's Guide. HRC Ltd Distrib Rep
- [322] Stadnyk TA, Holmes TL (2020) On the value of isotope-enabled hydrological model calibration. *Hydrol Sci J* 65:1525-1538. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1751847>
- [323] Sugawara M (1969) The flood forecasting by a series storage type model
- [324] Sugawara M (1974) Tank model and its application to Bird Creek, Wollombi Brook, Bikin River, Kitsu River, Sanaga River and Nam Mune. *Res Notes Natl Res Cent Disaster Prev* 11:1-64
- [325] Sui DZ, Maggio RC (1999) Integrating GIS with hydrological modeling: practices, problems, and prospects. *Comput Environ Urban Syst* 23:33-51
- [326] Sun D, Zhang D, Cheng X (2012) Framework of national non-structural measures for flash flood disaster prevention in China. *Water* 4:272-282
- [327] Symonds MRE, Moussalli A (2011) A brief guide to model selection, multimodel inference and model averaging in behavioural ecology using Akaike's information criterion. *Behav Ecol Sociobiol* 65:13-21
- [328] Tallaksen LM (1995) A review of baseflow recession analysis. *J Hydrol* 165:349-370. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)02540-R](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)02540-R)
- [329] Talukdar S, Singha P, Mahato S, et al (2020) Land-use land-cover classification by machine learning classifiers for satellite observations—A review. *Remote Sens* 12:1135
- [330] Tang Q, Gao H, Lu H, Lettenmaier DP (2009) Remote sensing: hydrology. *Prog Phys Geogr* 33:490-509
- [331] Tavana M, Li Z, Mobin M, et al (2016) Multi-objective control chart design optimization using

- NSGA-III and MOPSO enhanced with DEA and TOPSIS. *Expert Syst Appl* 50:17-39
- [332] Thakkar JJ (2021) Technique for Order Preference and Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) BT - Multi-Criteria Decision Making. In: Thakkar JJ (éd). Springer Singapore, Singapore, p 83-91
- [333] Thielen J, Bartholmes J, Ramos M-H, De Roo A (2009) The European Flood Alert System-Part 1: Concept and development. *Hydrol Earth Syst Sci* 13:
- [334] Thornthwaite CW (1948) An approach toward a rational classification of climate. *Geogr Rev* 38:55-94
- [335] Tigkas D, Christelis V, Tsakiris G (2016) Comparative study of evolutionary algorithms for the automatic calibration of the Medbasin-D conceptual hydrological model. *Environ Process* 3:629-644
- [336] Tobiszewski M, Tsakovski S, Simeonov V, et al (2015) A solvent selection guide based on chemometrics and multicriteria decision analysis. *Green Chem* 17:4773-4785
- [337] Todd MC, Kidd C, Kniveton D, Bellerby TJ (2001) A combined satellite infrared and passive microwave technique for estimation of small-scale rainfall. *J Atmos Ocean Technol* 18:742-755
- [338] Todini E (1988) Rainfall-runoff modeling — Past, present and future. *J Hydrol* 100:341-352. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694\(88\)90191-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694(88)90191-6)
- [339] Todini E (1995) New trends in modelling soil processes from hillslope to GCM scales. In: *The role of water and the hydrological cycle in global change*. Springer, p 317-347
- [340] Todini E (1996) The ARNO rainfall—runoff model. *J Hydrol* 175:339-382
- [341] Todini E (2007) Hydrological catchment modelling: past, present and future. *Hydrol Earth Syst Sci* 11:468-482
- [342] Todini E (2011) History and perspectives of hydrological catchment modelling. *Hydrol Res* 42:73-85. <https://doi.org/10.2166/nh.2011.096>
- [343] Trambly Y, Bouaicha R, Brocca L, et al (2012) Estimation of antecedent wetness conditions for flood modelling in northern Morocco. *Hydrol Earth Syst Sci* 16:4375. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/hess-16-4375-2012>
- [344] Trambly Y, Bouvier C, Martin C, et al (2010) Assessment of initial soil moisture conditions for event-based rainfall-runoff modelling. *J Hydrol* 387:176-187. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.04.006>
- [345] Turc L (1961) Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date. *Ann Agron* 12:13-49
- [346] USDA USSCSE (1986) Urban hydrology for small watersheds. Engineering Division, Soil Conservation Service, US Department of Agriculture
- [347] Van de Giesen NC, Stomph TJ, De Ridder N (2000) Scale effects of Hortonian overland flow and rainfall—runoff dynamics in a West African catena landscape. *Hydrol Process* 14:165-175
- [348] Varado N (2004) Contribution au développement d'une modélisation hydrologique distribuée. Application au bassin versant de la Donga, au Bénin
- [349] Vehviläinen B, Huttunen M (2001) Hydrological forecasting and real time monitoring in Finland: the watershed simulation and forecasting system (WSFS)
- [350] Velázquez JA, Anctil F, Perrin C (2010) Performance and reliability of multimodel hydrological ensemble simulations based on seventeen lumped models and a thousand catchments. *Hydrol Earth Syst Sci* 14:2303-2317
- [351] Vereecken H, Schnepf A, Hopmans JW, et al (2016) Modeling soil processes: Review, key challenges, and new perspectives. *Vadose Zo J* 15:
- [352] Verma S, Mishra SK, Singh A, et al (2017a) An enhanced SMA based SCS-CN inspired model for watershed runoff prediction. *Environ Earth Sci* 76:736
- [353] Verma S, Verma RK, Mishra SK, et al (2017b) A revisit of NRCS-CN inspired models coupled with RS and GIS for runoff estimation. *Hydrol Sci J* 62:1891-1930. <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1334166>
- [354] Verma SC (1982) Modified Horton's infiltration equation. *J Hydrol* 58:383-388
- [355] Viatgé J, Berthet L, Marty R, et al (2019) Vers une production en temps réel d'intervalles prédictifs associés aux prévisions de crue dans Vigicrues en France. *La Houille Blanche-Revue Int l'eau* 63-71
- [356] Vieux BE (2001) Distributed hydrologic modeling using GIS. In: *Distributed Hydrologic Modeling Using GIS*. Springer, p 1-17
- [357] Wagener T, Wheater H, Gupta HV (2004) Rainfall-runoff modelling in gauged and ungauged catchments. World Scientific

- [358] Walker WE, Harremoës P, Rotmans J, et al (2003) Defining uncertainty: a conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support. *Integr Assess* 4:5-17
- [359] Wang D, Hagen SC, Alizad K (2013) Climate change impact and uncertainty analysis of extreme rainfall events in the Apalachicola River basin, Florida. *J Hydrol* 480:125-135
- [360] Wang QJ (1991) The genetic algorithm and its application to calibrating conceptual rainfall-runoff models. *Water Resour Res* 27:2467-2471. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/91WR01305>
- [361] Weiler M, McDonnell JJ, Tromp-van Meerveld I, Uchida T (2006) Subsurface stormflow. *Encycl Hydrol Sci*
- [362] Werner M, Cranston M, Harrison T, et al (2009) Recent developments in operational flood forecasting in England, Wales and Scotland. *Meteorol Appl A J Forecast Pract Appl Train Tech Model* 16:13-22
- [363] Willems P, Mora D, Vansteenkiste T, et al (2014) Parsimonious rainfall-runoff model construction supported by time series processing and validation of hydrological extremes—Part 2: Intercomparison of models and calibration approaches. *J Hydrol* 510:591-609
- [364] Williams DL, Goward S, Arvidson T (2006) Landsat. *Photogramm Eng Remote Sens* 72:1171-1178
- [365] WMO (2004) Associated program on flood management. Technical Support Unit (ed). Associated Programme on Flood Management Technical Document No. 1, 2nd edn.
- [366] Woodward DE, Hawkins RH, Jiang R, et al (2003) Runoff curve number method: examination of the initial abstraction ratio. In: *World water & environmental resources congress 2003*. p 1-10
- [367] Woolhiser DA, Smith RE, Giraldez J (1996) Effects of spatial variability of saturated hydraulic conductivity on Hortonian overland flow. *Water Resour Res* 32:671-678
- [368] World Meteorological Organization (2006) Preventing and Mitigating Natural Disasters. WMO No. 993, Geneva
- [369] Wu S-J, Lien H-C, Chang C-H (2012) Calibration of a conceptual rainfall-runoff model using a genetic algorithm integrated with runoff estimation sensitivity to parameters. *J Hydroinformatics* 14:497-511. <https://doi.org/https://doi.org/10.2166/hydro.2011.010>
- [370] Xie H, Shen Z, Chen L, et al (2019) Parameter estimation and uncertainty analysis: a comparison between continuous and event-based modeling of streamflow based on the hydrological simulation program—fortran (HSPF) model. *Water* 11:171
- [371] Xu C (2002) Hydrologic models. *Textb Uppsala Univ Dep Earth Sci Hydrol*
- [372] Xu C, Ke Y, Li Y, et al (2020) Data-driven configuration optimization of an off-grid wind/PV/hydrogen system based on modified NSGA-II and CRITIC-TOPSIS. *Energy Convers Manag* 215:112892
- [373] Yadav B, Perumal M, Bardossy A (2015) Variable parameter McCarthy–Muskingum routing method considering lateral flow. *J Hydrol* 523:489-499. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.068>
- [374] Yahiaoui A (2012) Inondations torrentielles. Cartographie des zones vulnérables en Algérie du Nord (cas de l’oued Mekerra, Wilaya de Sidi Bel Abbès). Thèse de doctorat: École Nationale Polytechnique El Harrach, Alger (Algérie)
- [375] Yang T, Hsu K, Duan Q, et al (2018) Method to Estimate Optimal Parameters. In: Duan Q., Pappenberger F., Thielen J., Wood A., Cloke H., Schaake J. (eds) *Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting*. Springer, Berlin, Heidelberg, p 1-39
- [376] Ye W, Bates BC, Viney NR, et al (1997) Performance of conceptual rainfall-runoff models in low-yielding ephemeral catchments. *Water Resour Res* 33:153-166
- [377] Yilmaz AG, Hossain I, Perera BJC (2014) Effect of climate change and variability on extreme rainfall intensity--frequency--duration relationships: a case study of Melbourne. *Hydrol Earth Syst Sci* 18:
- [378] Yilmaz KK, Vrugt JA, Gupta H V, Sorooshian S (2010) MODEL CALIBRATION IN WATERSHED HYDROLOGY. In: *Advances in Data-Based Approaches for Hydrologic Modeling and Forecasting*. WORLD SCIENTIFIC, p 53-105
- [379] Younis J, Anquetin S, Thielen J (2008) The benefit of high-resolution operational weather forecasts for flash flood warning. *Hydrol Earth Syst Sci* 12:1039-1051
- [380] Yusuf A, Bayhan N, Tiryaki H, et al (2021) Multi-objective optimization of concentrated Photovoltaic-Thermoelectric hybrid system via non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA II). *Energy Convers Manag* 236:114065
- [381] Zema DA, Labate A, Martino D, Zimbone SM (2017) Comparing Different Infiltration Methods of the HEC-HMS Model: The Case Study of the Mésima Torrent (Southern Italy). *L Degrad Dev*

- 28:294-308
- [382] Zeroual A, Assani AA, Meddi M (2017) Combined analysis of temperature and rainfall variability as they relate to climate indices in Northern Algeria over the 1972–2013 period. *Hydrol Res* 48:584-595. <https://doi.org/https://doi.org/10.2166/nh.2016.244>
- [383] Zeroual A, Assani AA, Meddi M, Alkama R (2019) Assessment of climate change in Algeria from 1951 to 2098 using the Köppen–Geiger climate classification scheme. *Clim Dyn* 52:227-243. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4128-0>
- [384] Zeroual A, Meddi M, Assani AA (2016) Artificial neural network rainfall-discharge model assessment under rating curve uncertainty and monthly discharge volume predictions. *Water Resour Manag* 30:3191-3205. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11269-016-1340-8>
- [385] Zhang C, Wang R, Meng Q (2015) Calibration of Conceptual Rainfall-Runoff Models Using Global Optimization. *Adv Meteorol* 2015:545376. <https://doi.org/10.1155/2015/545376>
- [386] Zhang S, Kang L, Zhou L, Guo X (2016) A new modified nonlinear Muskingum model and its parameter estimation using the adaptive genetic algorithm. *Hydrol Res* 48:17-27. <https://doi.org/10.2166/nh.2016.185>
- [387] Zhang X, Zwiers FW, Hegerl GC, et al (2007) Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends. *Nature* 448:461-465. <https://doi.org/10.1038/nature06025>
- [388] Zhao RJ, Liu XR (1995) The Xinanjiang model. *Comput Model watershed Hydrol* 215-232
- [389] Zheng F, Maier HR, Wu W, et al (2018) On Lack of Robustness in Hydrological Model Development Due to Absence of Guidelines for Selecting Calibration and Evaluation Data: Demonstration for Data-Driven Models. *Water Resour Res* 54:1013-1030. <https://doi.org/10.1002/2017WR021470>
- [390] Zhu Z, Chen Z, Chen X, He P (2016) Approach for evaluating inundation risks in urban drainage systems. *Sci Total Environ* 553:1-12. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.025>
- [391] Zucco G, Tayfur G, Moramarco T (2015) Reverse flood routing in natural channels using genetic algorithm. *Water Resour Manag* 29:4241-4267. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11269-015-1058-z>

Annexes

A. Procédure de sélection des crues

La procédure de sélection des événements de crues comprend les étapes suivantes :

1. D'abord on fixe des valeurs seuils de pluie totale (P_s) et de débit de pointe (Q_s) pour les quelles un évènement peut être retenu. On identifie les évènements de crues possibles dans la série de données brute, en utilisant un pas de temps d'investigation ou bien d'exploration (tr). En fait, un évènement de crues est sélectionnable si la condition de l'Equation (A.1) est satisfaite.

$$si \quad P(t) > 0 \quad \& \quad \sum_t^{t+tr} P(t) > P_s \quad (A.1)$$

2. Si la condition de l'équation (A.1) est satisfaite, le début de l'évènement est fixé à l'instant t . On cherche ensuite le pic de cet évènement de crue dans un intervalle d'exploration qui est le double de celui utilisé pour les pluies :

$$Q_{\max} = \max(Q[t \rightarrow t + 2 \cdot tr]) \quad (A.2)$$

Il faut souligner le fait que l'intervalle d'investigation choisi pour l'équation (A.2) ne permet pas de trouver le pic de la crue à partir de l'instant de départ t , notamment, pour les évènements longs. Cependant, à mesure que le pas de temps avance, l'Equation (A.2) permet la détection des pics de la crue, spécialement dans le cas d'évènements complexes à multi-pics.

3. Pour définir la fin de l'évènement de crue, il faut prendre en compte le débit minimum (Q_{\min}), qui reflète le débit de base du cours d'eau et qui dépend de plusieurs facteurs. Le débit de fin (Q_{fin}) de l'évènement doit se rapprocher le plus possible du débit de base pour que l'on puisse considérer que l'évènement de crue est bel et bien terminé. Ainsi nous avons établi la condition suivante :

$$PERC \times (Q_{\max} - Q_{\min}) < (Q_{\text{fin}} - Q_{\min}) \quad (A.3)$$

La fin de l'évènement est placée initialement au pas de temps du pic de la crue. Ensuite, elle est décalée dans le temps jusqu'à ce que la condition de l'Equation (A.3) ne soit plus garantie.

4. L'évènement en cours sélectionné est rejeté si l'un des critères suivants est vérifié :
 - si le débit de pointe de la crue est inférieur à débit seuil Q_s
 - si la période d'évènement chevauche une période d'évènement de crue précédemment définie. Cela indique que l'évènement de crue est complexe et que ces deux périodes doivent être jumelées.
 - si la quantité de précipitations, cumulée avant le pic de débit, est inférieure à 1mm, l'évènement en cours est ignoré. Cela permet de supprimer automatiquement les valeurs non plausibles dans les données de la paire précipitations-débit.

- si la série de débits sur la période choisie est quasi constante, selon deux conditions proposée par Ficchi (2017): (1) écart relatif absolu maximum de deux débits horaires successifs inférieur à 10% et (2) rapport débit de pointe sur débit moyen inférieur à 1.3. Ces conditions empiriques permettent d'écarter les événements qui ne sont pas de véritables crues indépendantes avec des phases crues/décrués reconnaissables, mais qui font partie des débits de récession.

B. La procédure de la méthode « Order of Preference by Similarity to Ideal Solution » (TOPSIS)

La méthode « Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution » connue sous le nom TOPSIS, est une méthode d'analyse décisionnelle multicritères. Elle compare un ensemble d'alternatives sur la base d'un critère prédéfini. Une hypothèse de TOPSIS est que les critères augmentent ou diminuent de manière monotone. La normalisation est généralement nécessaire car les critères sont souvent de dimensions incongrues dans les problèmes multicritères.

Généralement, l'ensemble du processus TOPSIS peut être encapsulé en 7 étapes :

1. Créer une matrice composée de m jeu de paramètres et de n critères de performances. Cette matrice $(x_{ij})_{m \times n}$ est généralement appelée « matrice d'évaluation »
2. La matrice $(x_{ij})_{m \times n}$ est ensuite normalisée:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m x_{kj}^2}} \quad (\text{B.1})$$

3. Calculez la matrice de décision normalisée pondérée. Il est important de noter que chaque critère doit avoir son propre poids afin que tous se résument à 1.

$$t_{ij} = r_{ij} \times w_j \quad (\text{B.2})$$

$$w_j = \frac{W_j}{\sum_{k=1}^n W_k} \quad (\text{B.3})$$

$$\sum_{k=1}^n w_j = 1 \quad (\text{B.4})$$

Où W_j est le poids original donnée au critère.

4. Déterminer la pire alternative (A_w) et la meilleure alternative (A_b):

$$t_j^w = \max_{i=1}^m (t_{ij}) \quad (\text{B.5})$$

$$t_j^b = \min_{i=1}^m (t_{ij}) \quad (\text{B.6})$$

5. Calculer la distance euclidienne entre la valeur de chaque critère de performance i et la meilleur/pire alternative :

$$d_i^w = \sqrt{\sum_{j=1}^n (t_{ij} - t_j^w)^2} \quad (\text{B.7})$$

$$d_i^b = \sqrt{\sum_{j=1}^n (t_{ij} - t_j^b)^2} \quad (\text{B.8})$$

6. Calculez la similarité avec la pire alternative :

$$S_i = \frac{d_i^w}{d_i^w + d_i^b} \quad (\text{B.9})$$

7. Classer les alternatives selon S_i

C. Illustrations graphiques des hydrogrammes et hétéogrammes de quelques événements pluie-débit

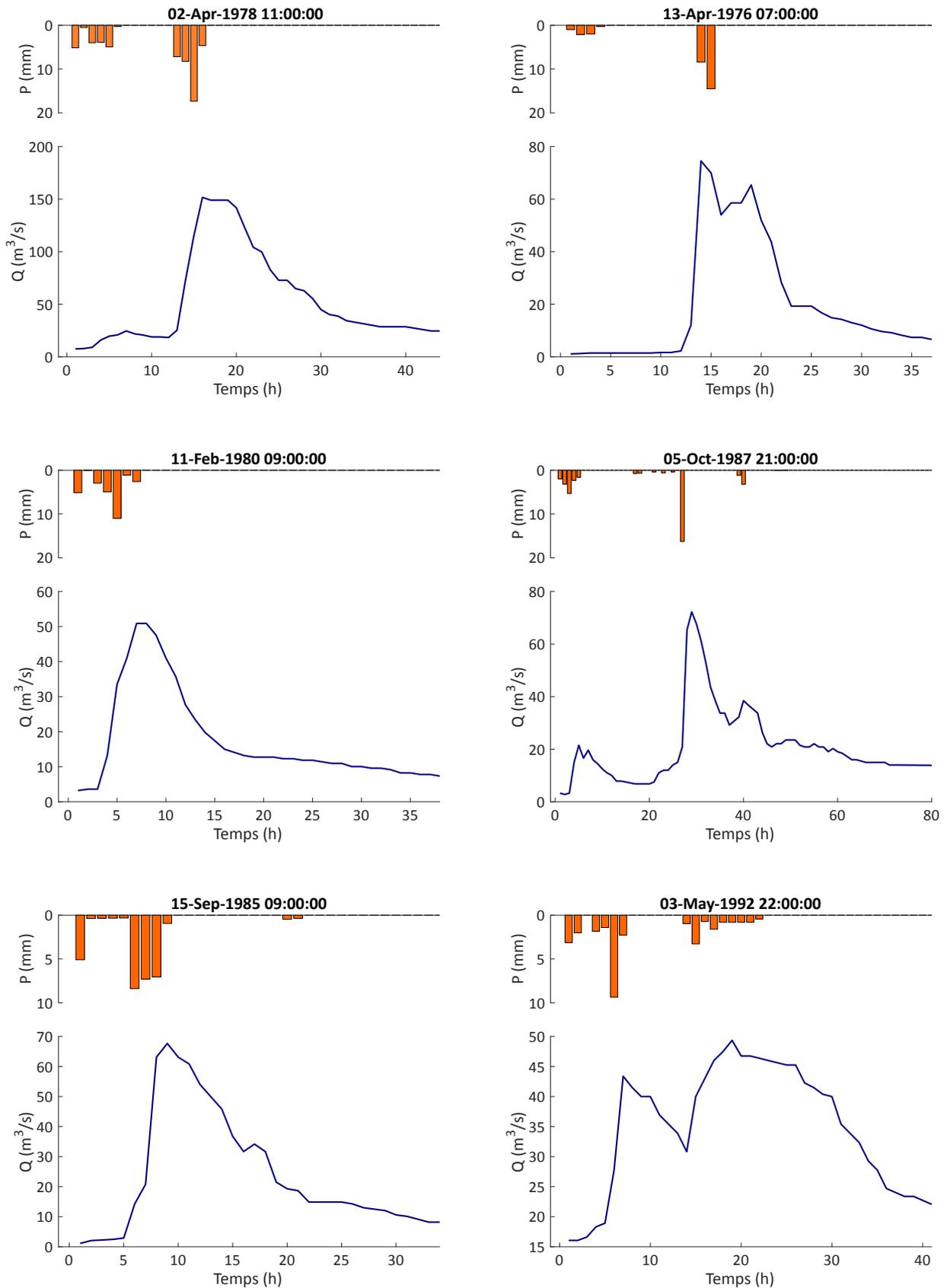


Figure C.1. Illustrations graphiques des hydrogrammes et hétéogrammes de quelques événements pluie-débit pour le bassin versant d'El Kébir

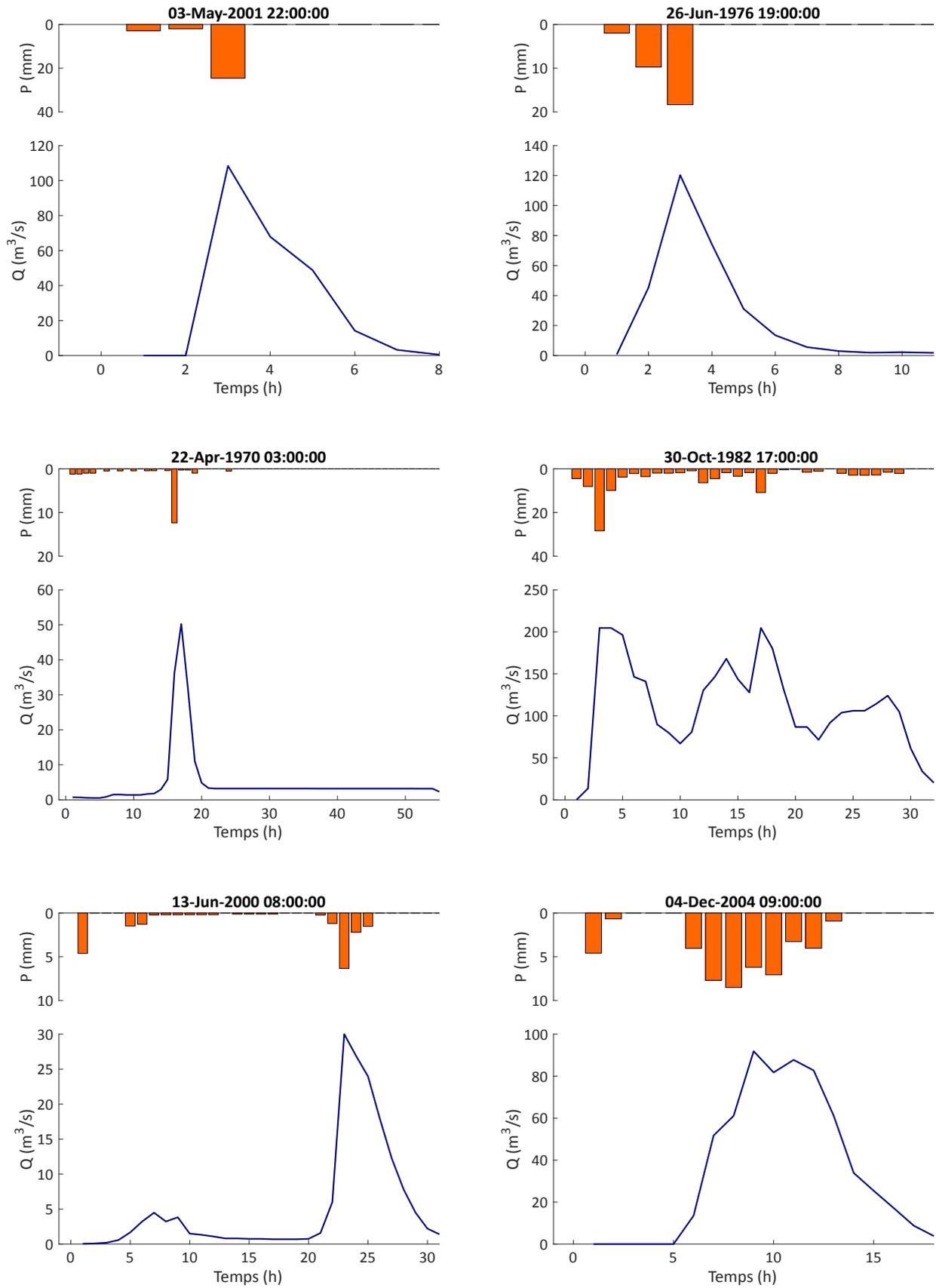


Figure C.2. Illustrations graphiques des hydrogrammes et hyétogrammes de quelques évènements pluie-débit pour le bassin versant de Timgad

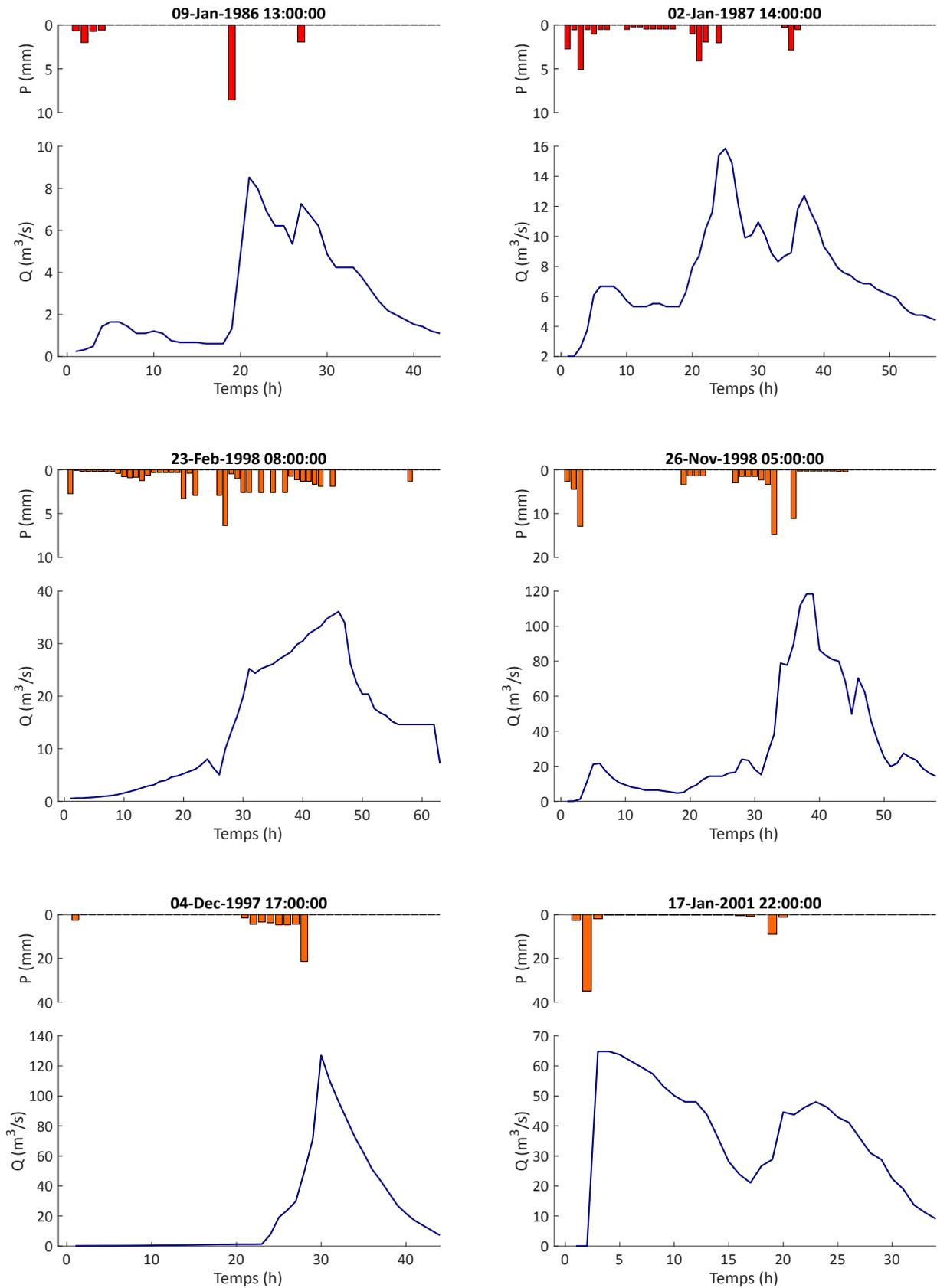


Figure C.3. Illustrations graphiques des hydrogrammes et hyétogrammes de quelques évènements pluie-débit pour le bassin versant de Zerdassas

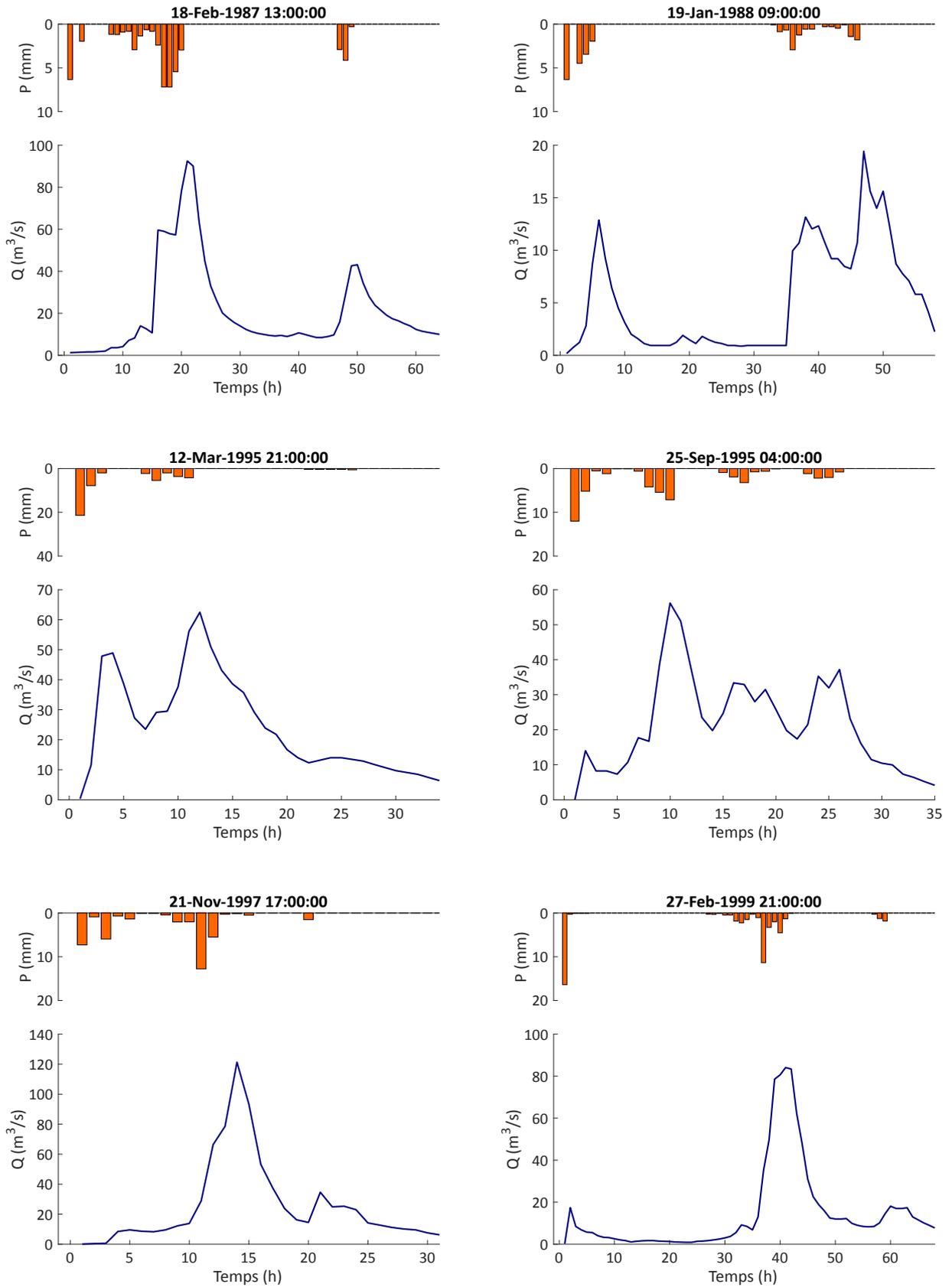


Figure C.4. Illustrations graphiques des hydrogrammes et hyétogrammes de quelques évènements pluie-débit pour le bassin versant de Allalah

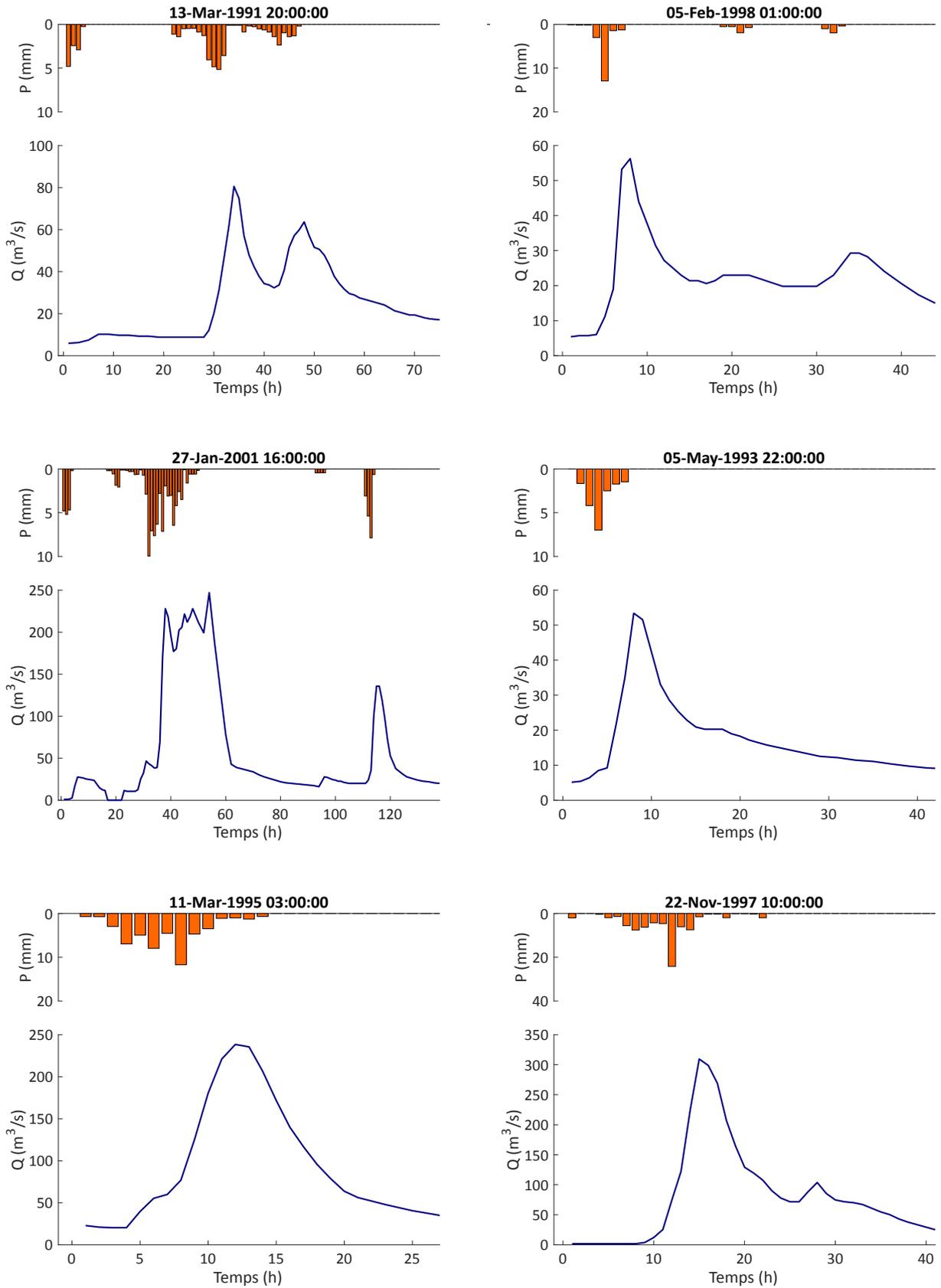


Figure C.5. Illustrations graphiques des hydrogrammes et hyétogrammes de quelques évènements pluie-débit pour le bassin versant de Boubhir