

Tunisie

Ministère de l'Agriculture

Tunisie

Etude Préliminaire du Projet Intégré de Gestion du Bassin

Versant et de Contrôle des Inondations de La Mejerda :

Analyse de l'Impact du Changement Climatique

RAPPORT FINAL

Mai 2013

Agence Japonaise de Coopération Internationale

Université Nationale de Tokyo

GE
JR
13 - 135

Tunisie

Ministère de l'Agriculture

Tunisie

Etude Préliminaire du Projet Intégré de Gestion du Bassin

Versant et de Contrôle des Inondations de La Mejerda :

Analyse de l'Impact du Changement Climatique

RAPPORT FINAL

Mai 2013

Agence Japonaise de Coopération Internationale

Université Nationale de Tokyo

République Tunisienne

Etude de la gestion intégrée du bassin versant et de la lutte contre les inondations en considérant
de l'évaluation de l'impact du changement climatique sur la Medjerda :
EVALUATION DE L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA ZONE DU
BASSIN VERSANT DE LA MEDJERDA

Table des Matières

Table des Matières	1
Abréviations	3
I Bref aperçu de la mission	6
(1) Contexte dans lequel la présente mission est exécutée, comment et pourquoi elle est exécutée	6
(2) Zone de l'étude	7
(3) Orientation principale de l'exécution de l'étude	10
II Contenu de l'étude	12
Evaluation des précipitations maximales probables, du débit de crête sans	
(1) contrôle et du débit d'inondation de conception tenant compte de l'exploitation des barrages existants	12
1 Evaluation des précipitations maximales probables et du débit de crête sans contrôle	12
1) Détermination des précipitations maximales probables	13
2) Evaluation du débit de crue sans contrôle	31
2 Prévission de la crue de conception	42
1) Considération de l'exploitation du barrage de Sidi Salem	42
2) Crue de conception en aval du barrage en tenant compte de l'exploitation du barrage	42
(2) Analyse de l'impact du changement climatique sur le bassin versant de la Medjerda	44
1 Sélection de scénarios d'émission du gaz à effet de serre	44
2 Sélection de modèles MCG	45
3 Correction de biais du résultat des modèles MCG	49
4 Evaluation du changement des précipitations	57
5 Evaluation des changements de crues de conception	60

(3)	Optimisation de l'exploitation des barrages	63
1	Modèle hydrologique	64
2	Système d'optimisation globale	64
3	Approche « Rolling horizon »	65
4	Procédure ISOS	65
5	Procédure ISOS	65
III	Conclusion et propositions	70
	Référence	71
	Annexes et diagrammes joints	72

Abréviations

Abréviations	Anglais	Français	Japonais
AfWCCI	GEOSS African Water Cycle Coordination Initiative	Initiative Africaine de la Coordination du Cycle de l'Eau	アフリカ水循環調整イニシアチブ
AIEM	Advanced Integral Equation Model	Modèle Avancé d'Equation Intégrale	表面散乱モデル
AMSR-E	Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS	Radiomètre Avancé à Balayage en Hyperfréquence	改良型高性能マイクロ波放射計
BATS	Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme	Processus d'Echange entre la Biosphère et l'Atmosphère	陸面過程モデル
CMIP3	The 3rd phase of Coupled Model Intercomparison Project	La 3 ^e phase du Projet d'Inter-comparaison de Modèles Couplés	第3次モデル相互比較プロジェクト
C/P	Counterpart	Homologue	カウンターパート
DB	Database	Base de données	データベース
DEM	Digital Elevation Model	Modèle Numérique d'Altitude	数値標高モデル
DHM	Distributed Hydrological Model	Modèle Hydrologique Distribué	分布型水循環モデル
DMRT	Dense Medium Radiative Transfer	Modèle de Transfert Radiatif de Matériau Dense	放射伝達モデル
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations	Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture	国際連合食糧農業機関
FPAR	Fraction of Photosynthetic Active Radiation	Fraction de Rayonnement de Photosynthèse	光合成有効放射吸収率
F/R	Final Report	Rapport Final	ファイナル・レポート
GBHM	Geomorphology-Based Hydrological Model	Modèle Hydrologique à base de géomorphologie	分布型流出モデル
GCM	General Circulation Model	Modèle de la Circulation Générale	大気循環モデル
GEO	Group on Earth Observations	Groupe sur l'Observation de la Terre	地球観測作業部会
GEOSS	Global Earth Observation System of Systems	Réseau Mondial des Systèmes d'Observation de la Terre	全球地球観測システム
GOJ	Government of Japan	Gouvernement du Japon	日本国政府

GPS	Global Positioning System	Système de Positionnement Global (GPS)	全球測位システム
GSMaP	Global Satellite Mapping of Precipitation	Global Satellite Mapping of Precipitation	全球降水マップ
IC/R	Inception Report	Rapport de Commencement	インセプション・レポート
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC)	気候変動に関する政府間パネル
IT/R	Interim Report	Rapport Intérimaire	インテリム・レポート
JCC	Joint Coordinating Committee	Comité de Coordination Conjoint	合同調整委員会
JICA	Japan International Cooperation Agency	Agence Japonaise de Coopération Internationale	国際協力機構
LAI	Leaf Area Index	Indice de Surface Foliaire	葉面積指数
LDAS-UT	Land Data Assimilation System by Coupling AMSR-E and SiB2	Système d'assimilation des données à la surface des terres émergées et Biosphère Simple 2	陸面データ同化
LSM	Land Surface Model	Modèle de la Surface de Terre	地表面モデル
M/M	Men Month	Homme Mois	人/月
NCDC	National Climatic Data Center	Centre National de Données Climatologiques	アメリカ国立気候データセンター
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration	Administration Nationale Océanique et Atmosphérique	米国海洋大気庁
PDM	Project Design Matrix	Matrice de Conception du Projet	プロジェクト・デザイン・マトリックス
PO	Plan of Operation	Plan d'Exécution	実行計画
P/R	Progress Report	Rapport d'Avancement	プロGRESS・レポート
R/D	Record of Discussions	Procès-Verbaux	協議議事録
RMSE	Root Mean Squared Error	Erreur Quadratique Moyenne	2乗平均平方根誤差
RTM	Radiative Transfer Model	Modèle de Transfert Radiative	放射伝達モデル
SiB2	Simple Biosphere 2	Biosphère Simple 2	単純植生モデル2
SWI	Soil Wetness Index	Indice d'Humidité de Sol	土壌湿潤指数
USGS	United States Geological Survey	Commission Géologique des Etats-Unis	アメリカ地質調査所
WEB-DHM	Water and Energy Budget based Distributed	Modèle Hydrologique Distribué, basé sur le budget	分布型水循環モデル

	Hydrological Model	d'eau et d'énergie	
WMO	World Meteorological Organization	Organisation Météorologique Mondiale	世界気象機関
WRF	Weather Research and Forecasting. Model	Modèle Recherche Et Prévision Météo	次世代メソスケール数値天気予報モデルシステム
WSP	Water Security Plan	Plan de Sécurité de l'Eau	水の安全保障計画

I. Bref Aperçu de la Mission

(1) Contexte dans lequel la présente mission est exécutée, comment et pourquoi elle est exécutée.

La moitié du territoire de la République Tunisienne est placée sous un climat semi-aride. Les précipitations annuelles moyennes du tout le territoire sont très faibles. Elles ne sont que de 500 mm. Mais la région nord de la Tunisie, y compris le bassin versant de la Medjerda, subit, périodiquement à l'intervalle de quelques années pendant la saison des pluies de septembre à mars, de fortes précipitations qui provoquent des inondations à cause de crues subites. Surtout ces dernières années, des averses se sont produites fréquemment en 2000, 2003, 2004, 2005, 2009 et 2012 et les grandes inondations à la suite de ces fortes pluies ont causé des dégâts importants dans le bassin aval de la Medjerda au nord du pays. Surtout, au moment de la grande inondation de janvier 2003, il y a eu 10 morts et 27 000 sinistrés ainsi que des dommages socio-économiques importants comme la perte de produits agricoles, des dégâts aux bâtiments, l'interruption de transport, etc. à cause de l'eau qui a stagné pendant plus d'un mois. Aussi tout récemment, en février 2012, une forte précipitation dans la région nord-ouest a provoqué des inondations dans plusieurs bassins versants de la Medjerda et il y a eu 6 morts ainsi que d'autres dégâts importants. L'impact de ces grandes inondations ne se limite pas seulement aux dégâts matériels comme la perte de produits agricoles, la destruction d'infrastructures et de bâtiments mais il y a une répercussion socio-économique comme l'augmentation de la pauvreté etc. à cause de la stagnation des activités économiques et des désastres. Ainsi, elle constitue un risque de freinage pour le développement de ce pays.

Le gouvernement tunisien s'est déjà engagé à lutter contre les inondations. Ainsi le « 11^e plan quinquennal du développement socio-économique (de 2007 à 2011) » a fait de la mitigation des dommages dû aux inondations de la zone urbaine la priorité et des mesures préventives contre les l'inondation de la zone urbaine comme l'aménagement du réseau fluvial, le nettoyage du réseau existant, etc. ont été programmés. On compte sur ces projets qui peuvent éventuellement créer l'effet de synergie avec des projets d'urbanisation et de développement des transports urbains.

Pour améliorer la situation du bassin versant de la Medjerda qui subit des inondations graves, la JICA a mis en œuvre « l'Étude sur le plan de gestion intégrée des ressources hydrauliques du bassin versant de la Medjerda » (ci-dessous appelée « étude du développement ») pour une période de 26 mois entre 2006 et 2008. Dans cette étude, le plan directeur pour la gestion intégrée des ressources hydrauliques du bassin versant a été établi en mettant l'accent sur la protection du bassin de la Medjerda contre les inondations à l'aide des constructions contre les inondations telles que digues et étangs, ainsi que des mesures n'utilisant pas de constructions y compris la mise en place des systèmes d'alerte des inondations et d'évacuation, le renforcement de la capacité d'organisations et la mise en vigueur des régulations sur l'utilisation des plaines d'inondation. En 2009, le gouvernement tunisien a adressé une requête pour la mise en œuvre

d'une étude de faisabilité (étude FS) sur le projet proposé dans l'étude du développement indiqué ci-dessus et c'est dans ce contexte que « l'Etude préliminaire du projet pour la gestion intégrée du bassin versant de la Medjerda et la lutte contre les inondations » (ci-dessous « étude préliminaire ») a eu lieu entre septembre 2010 et mai 2012. Dans cette étude préliminaire, nous avons collecté des informations de base et examiné des mesures fondamentales possibles à l'égard du bassin situé le plus à l'aval (zone D2), jugé par le plan directeur comme la région qui bénéficiera des effets économiques les plus importants.

Sur la base du résultat de l'étude préliminaire, il a été décidé que « l'Etude préliminaire de la gestion intégrée du bassin versant et de la lutte contre les inondations en considérant l'évaluation de l'impact du changement climatique sur la Medjerda » (ci-dessous « étude préliminaire II ») sera mise en œuvre à partir du juillet 2012 afin de compléter le contenu de l'étude préliminaire précédente et d'établir un projet d'activités plus détaillé. Par contre, étant donné que l'analyse du débit d'écoulement d'inondations vers le bassin versant de la Medjerda n'est pas facile puisqu'il s'agit d'une région particulière connaissant fréquemment des inondations suite aux pluies diluviennes en raison du mousson méditerranéen malgré sa position en zone semi-aride et que la région d'Afrique du Nord, comprenant le bassin cité, est considérée par le 4^e Rapport de l'IPCC comme assez sensible au changement climatique dans le futur, nous avons décidé d'effectuer, de façon séparée de cette étude préparatoire II, l'analyse du débit d'inondations ainsi que l'analyse de l'impact du changement climatique futur sur les distributions de précipitations et d'inondations (ci-dessous « l'évaluation de l'impact du changement climatique ») qui nécessiteront des techniques plus spéciales.

Cette étude correspond à l'étude de l'évaluation de l'impact du changement climatique indiquée ci-dessus et concerne trois piliers d'étude suivants :

- (1) Définition du débit de crue de conception tenant compte de précipitations de conception, de débit de crête sans contrôle et de l'exploitation des barrages existants
- (2) Évaluation de l'impact du changement climatique futur
- (3) Examen sur l'exploitation optimisée d'ouvrages hydrauliques

Parmi ces éléments, le résultat de l'article (1) a été transféré pour l'usage dans l'étude préliminaire II et a servi de précondition pour examiner les spécifications du plan d'activités préparé via l'étude préliminaire II ainsi que l'efficacité du projet. De surplus, nous avons pu obtenir des connaissances importantes à travers les piliers (2) et (3) pour contribuer à la gestion future des inondations de la Medjerda par le gouvernement tunisien.

L'organigramme de l'ensemble des activités sont indiqué dans la Figure I-1-1.

(2) Zone de l'étude

La zone de l'étude est en principe le bassin aval de la Medjerda de la République tunisienne (Aliana, Maneuver, Bizerte). Cependant, étant donné que le réservoir d'eau fait l'objet de

« l'étude concernant l'exploitation optimale des ouvrages hydrauliques », le barrage de Sidi Salem qui se trouve dans le bassin moyen de la Medjerda, est inclus dans la zone de l'étude (Voir les Figures I-(2)-1 et I-(2)-2).

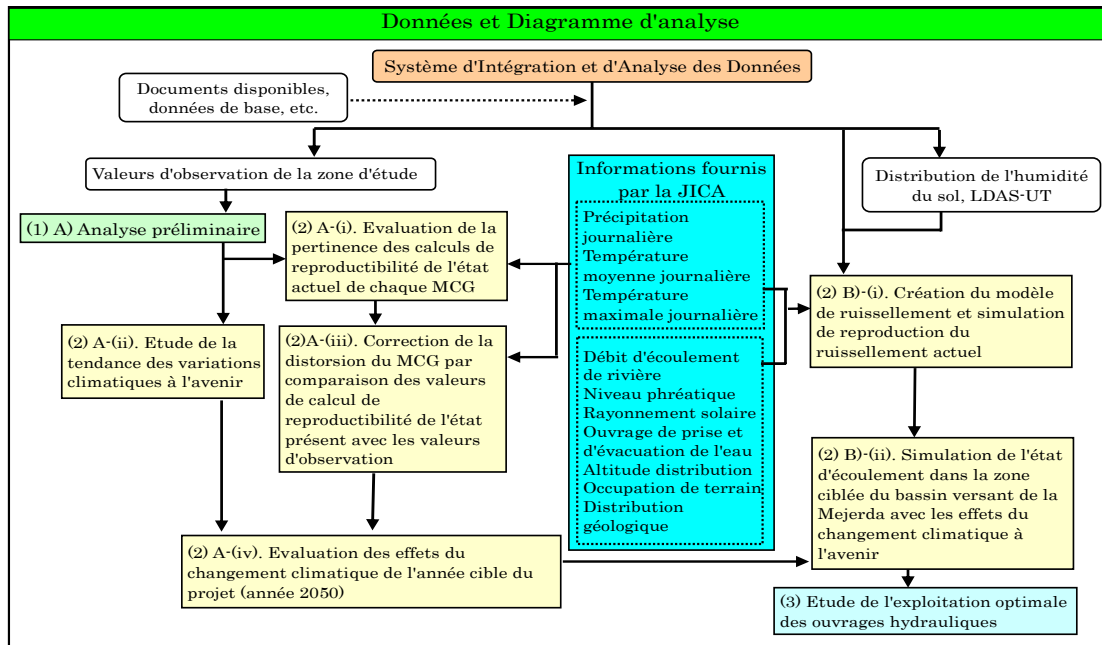


Figure I-(1)-1 Diagramme du processus des travaux de « l’Evaluation de l’Impact du Changement Climatique sur la Zone du Bassin Versant de la Medjerda »

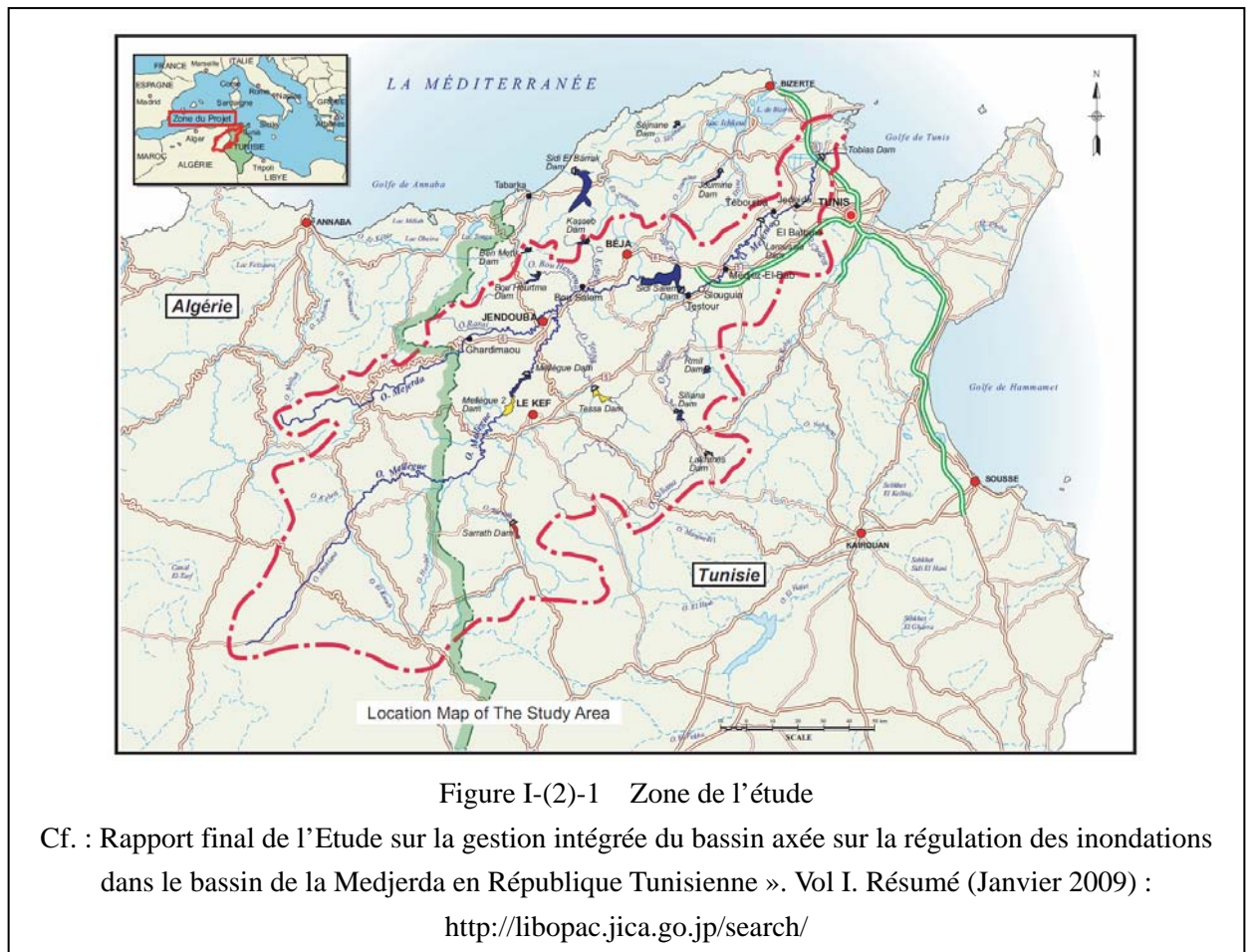


Figure I-(2)-1 Zone de l'étude

Cf. : Rapport final de l'Etude sur la gestion intégrée du bassin axée sur la régulation des inondations dans le bassin de la Medjerda en République Tunisienne ». Vol I. Résumé (Janvier 2009) :

<http://libopac.jica.go.jp/search/>

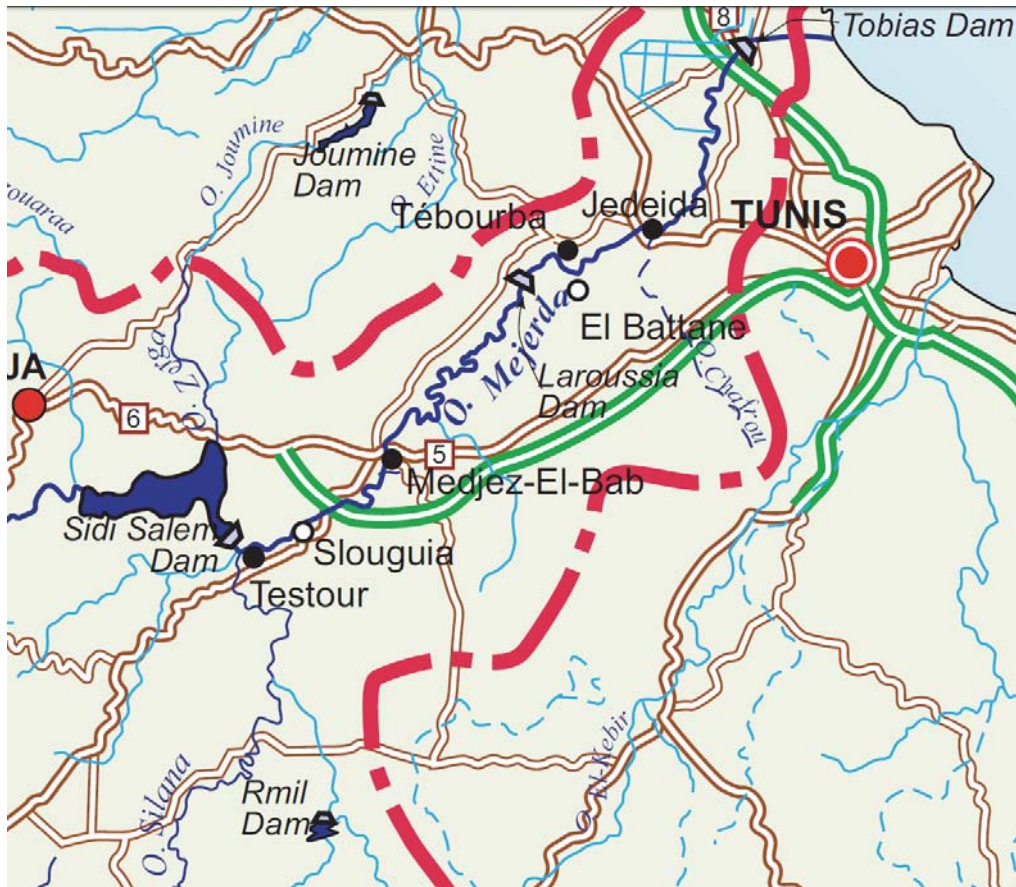


Figure I-(2)-2 Plan d'agrandissement de la zone du bassin-aval

(3) Orientation principale de l'exécution de l'étude

1. Evaluation des précipitations maximales probables, du débit de crête sans contrôle et du débit d'inondation de conception tenant compte de l'exploitation des barrages existants

Dans le cadre de l'estimation des précipitations maximales probables, nous tenons compte des propriétés variables de la durée de précipitations et de la répartition spatio-temporelle de précipitations, en plus de la distribution de probabilité des précipitations. Pour faire l'analyse de l'écoulement afin d'estimer le débit de crête sans contrôle, il est indispensable de représenter d'une manière précise l'état de l'eau dans le sol situé sur le bassin, qui affecte considérablement l'accroissement du débit du fleuve ou le débit de pointe même si les précipitations sont les mêmes, parce qu'il est nécessaire de mettre en œuvre une analyse continue à long terme en commençant par le niveau d'eau bas et jusqu'au niveau de la crue et également de prévoir l'écoulement d'eau à l'aide des valeurs observées afin d'assurer une meilleure exploitation des ouvrages hydrauliques lors de l'évaluation de l'impact du changement climatique sur les ressources hydrologiques. Il est également nécessaire d'être capable de tenir compte des distributions de la topographie, du sol, des végétations et des conditions climatiques et il est

donc essentiel d'utiliser le modèle hydrologique distribué puisqu'il nous permettra de calculer la quantité d'eau du sol ainsi que le débit d'écoulement vers le fleuve sans avoir à effectuer le réglage à long terme. En outre, nous allons considérer l'exploitation du barrage existant de Sidi Salem pour définir le débit de crue de conception.

2. Évaluation de l'impact du changement climatique futur

Pour l'évaluation de l'impact du changement climatique, il est courant d'utiliser le modèle de la circulation générale (ci-dessous modèle MCG). Cependant, le modèle MCG comporte de l'incertitude et des biais notamment sur les valeurs estimées des précipitations, puisqu'il y a des aspects non éclaircis sur différents processus physiques et biochimiques et qu'il ne permettra pas d'avoir suffisamment de résolution spatiale pour représenter les processus variés en raison du manque de la compétence du calculateur. Par conséquent, il n'est pas adéquat de faire des évaluations quantitatives utilisant un seul modèle MCG et il est pour le moment indispensable d'examiner la similitude des résultats obtenus et de considérer la variabilité de l'estimation à l'aide de plusieurs modèles MCG qui nous permettront de représenter les propriétés climatiques des zones ciblées d'une manière appropriée.

En outre, comme l'échelle spatiale ciblée par l'analyse de la circulation hydrologique est généralement plus petite que les dimensions du quadrillage du modèle MCG, il faut procéder à la réduction d'échelle spatiale et également à la correction de biais à l'aide des données observées pour mener à bien des analyses quantitatives. Des approches dynamiques via le modèle non-hydrostatique à la méso-échelle sont également souvent utilisées, mais la réduction dynamique d'échelle de plusieurs modèles MCG a le désavantage d'être coûteux. Il y a un nombre important de stations d'observation de précipitations sur les bassins ciblés dans cette étude, ce qui nous permet d'avoir recours aux données à long terme. C'est pour cette raison que nous allons représenter les distributions spatiales en faisant des extrapolations et des interpolations spatiales des valeurs sorties des modèles dont les biais ont été corrigés correspondant à chaque station d'observation des précipitations.

3. Examen sur l'exploitation optimisée d'ouvrages hydrauliques

Nous allons mettre en œuvre des examens sur l'optimisation de l'exploitation d'ouvrages hydrauliques existants. Cette méthode a pour but d'optimiser les fonctions d'évaluation, se focalisant sur la longueur des cours d'eau du bassin versant de la Medjerda, utilisant le temps prévu d'arrivée de la crue comme lead-time (délai) pour prévoir les inondations, prévoyant le débit d'afflux dans le barrage du Sidi Salem et mettant l'accent sur l'atténuation des dommages causés par les inondations.

II. Contenu de l'étude

(1) Evaluation des précipitations maximales probables, du débit de crête sans contrôle et du débit d'inondation de conception tenant compte de l'exploitation des barrages existants

Dans ce rapport, nous avons évalué les précipitations maximales probables, le débit de crête sans contrôle et le débit d'inondation de conception suivant le diagramme ci-dessous.

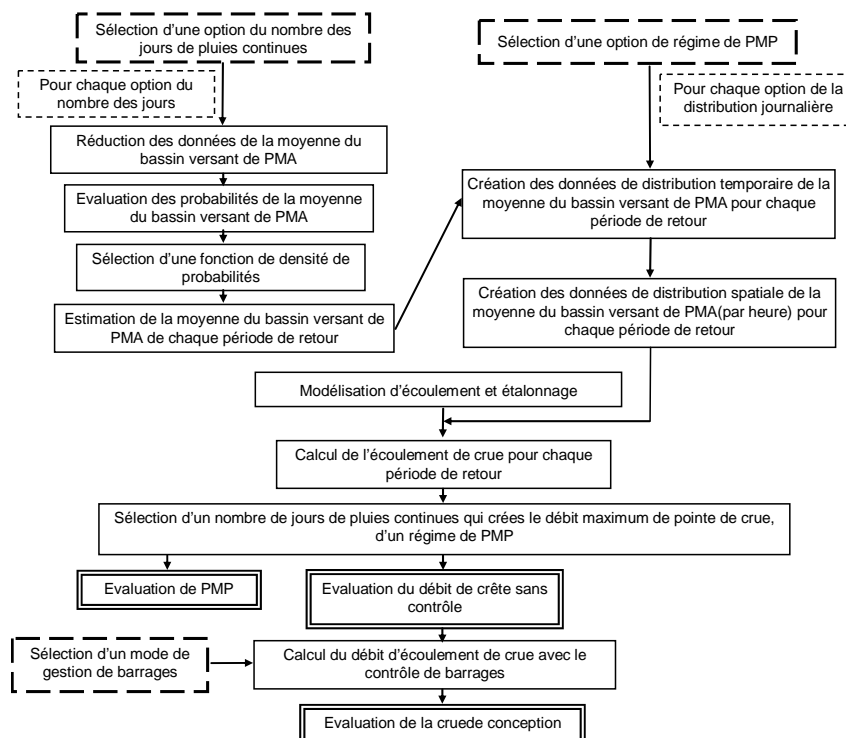


Figure II-(1)-1 Diagramme du processus d'évaluation des précipitations maximales probables, du débit de crête sans contrôle et de la crue de conception

1. Evaluation des précipitations maximales probables et du débit de crête sans contrôle

Pour faire cette opération, premièrement, nous avons étudié des inondations dans le passé qui se sont produites dans le bassin versant de la Medjerda, fixé les 2 seuils de pluie journalière et déterminé les 2 nombres de jours de pluie continue qui dépassent respectivement ces seuils. Deuxièmement, nous avons évalué les précipitations maximales probables sur la base de l'analyse des probabilités avec des moyennes des précipitations du bassin versant, relatives à chaque nombre de jours de pluie continue. Troisièmement, nous avons divisé les précipitations maximales probables par jour, proportionnellement aux précipitations journalières moyennes du bassin versant lors des inondations dans le passé, et décomposé par heure pour utiliser le résultat de calcul pour évaluer l'écoulement de crue. A la fin, nous avons créé un jeu des grilles de données de précipitations par heure au moyen de la distribution spatiale des inondations dans le

passé.

Par ailleurs, nous avons ajusté le modèle hydrologique distribué, basé sur le budget d'eau et d'énergie (WEB-DHM) qui peut représenter les différentes caractéristiques comme la géologie, le sol, l'occupation du terrain dans le bassin versant de la Medjerda et la distribution hydrologiques sur la base des données d'observation. Nous avons accordé une attention particulière à la reproductibilité des caractéristiques de l'écoulement de crue de ce modèle. Ensuite nous avons introduit les précipitations maximales probables dans ce modèle pour évaluer le débit de crue. Nous avons considéré la valeur maximale parmi toutes les valeurs du débit de crue correspondant à chaque nombre des jours de pluie continue et à la distribution spatio-temporelle des précipitations comme le débit de crête sans contrôle.

1) Détermination des précipitations maximales probables

a. Données et portion du bassin versant

La Figure II-(1)-2 indique les points d'observation des précipitations exploitables pour cette étude et les portions du sous-bassin suivant les principaux affluents de la Medjerda. Les points d'observation des précipitations sur le bassin versant de la Medjerda collectent des données sur les précipitations journalières. Dans cette étude, nous avons utilisé dans cette étude des données des 44 points d'observation de précipitations : celles sur les précipitations journalières entre janvier 1950 et décembre 2007 pour la détermination des précipitations maximales probables et celles pour la période entre janvier 1981 et décembre 2000 pour la correction de biais des modèles pour la prévision du changement climatique, respectivement. Alors qu'il n'existe que trois points d'observation des précipitations sur le côté algérien du sous-bassin 9, il y a un nombre suffisant des points d'observation des précipitations journalières dans d'autres portions du bassin versant. Par conséquent, à l'aide de ces données, nous avons obtenu les précipitations moyennes du bassin et des sous-bassins à partir de la moyenne simple des précipitations observées et nous avons calculé la distribution des précipitations, destinée à l'analyse d'écoulement, à partir de la pondération de l'inverse du carré de la distance entre chaque grille de quadrillage de 0.05 degré couvrant le bassin versant et différents points d'observation.

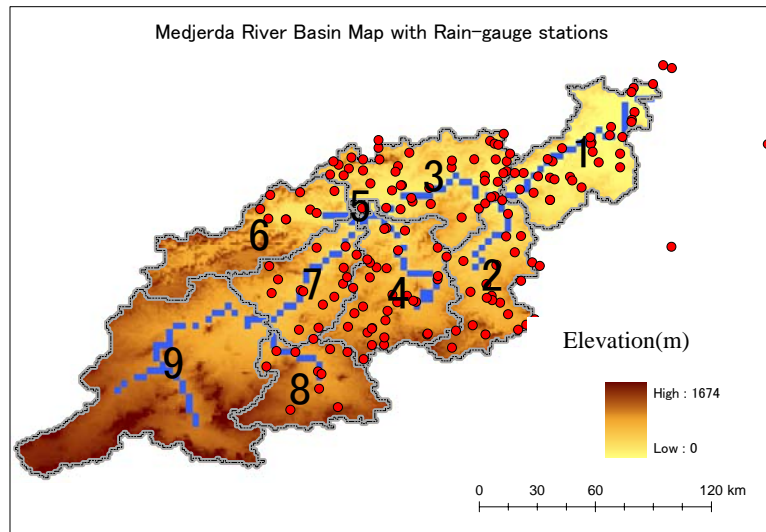


Figure II-(1)-2 Points d'observation des précipitations et portions de sous-bassins

b. Nombre de jours de pluie continue et données des précipitations maximales annuelles

La détermination du nombre de jours de pluie continue a été effectuée comme suit sur la base des données obtenues lors des inondations dans le passé (Mars 1973, Mai 2000, Janvier 2003, et Décembre 2003) :

1. Nombre de jours de pluie continue dont les précipitations journalières dépassent 20 mm/jour (barre rouge de la Figure II-(1)-3),
2. Nombre de jours de pluie continue dont les précipitations journalières dépassent 10 mm/jour (barre rose de la Figure II-(1)-3).

Nous avons aussi considéré la différence entre les portions du sous-bassin lors des pluies. Le résultat est le suivant : le nombre de jours de pluie continue dans le cas de i. (>20mm/jour) est de 4, celui dans le cas de ii. (>10 mm/jour) est de 5.

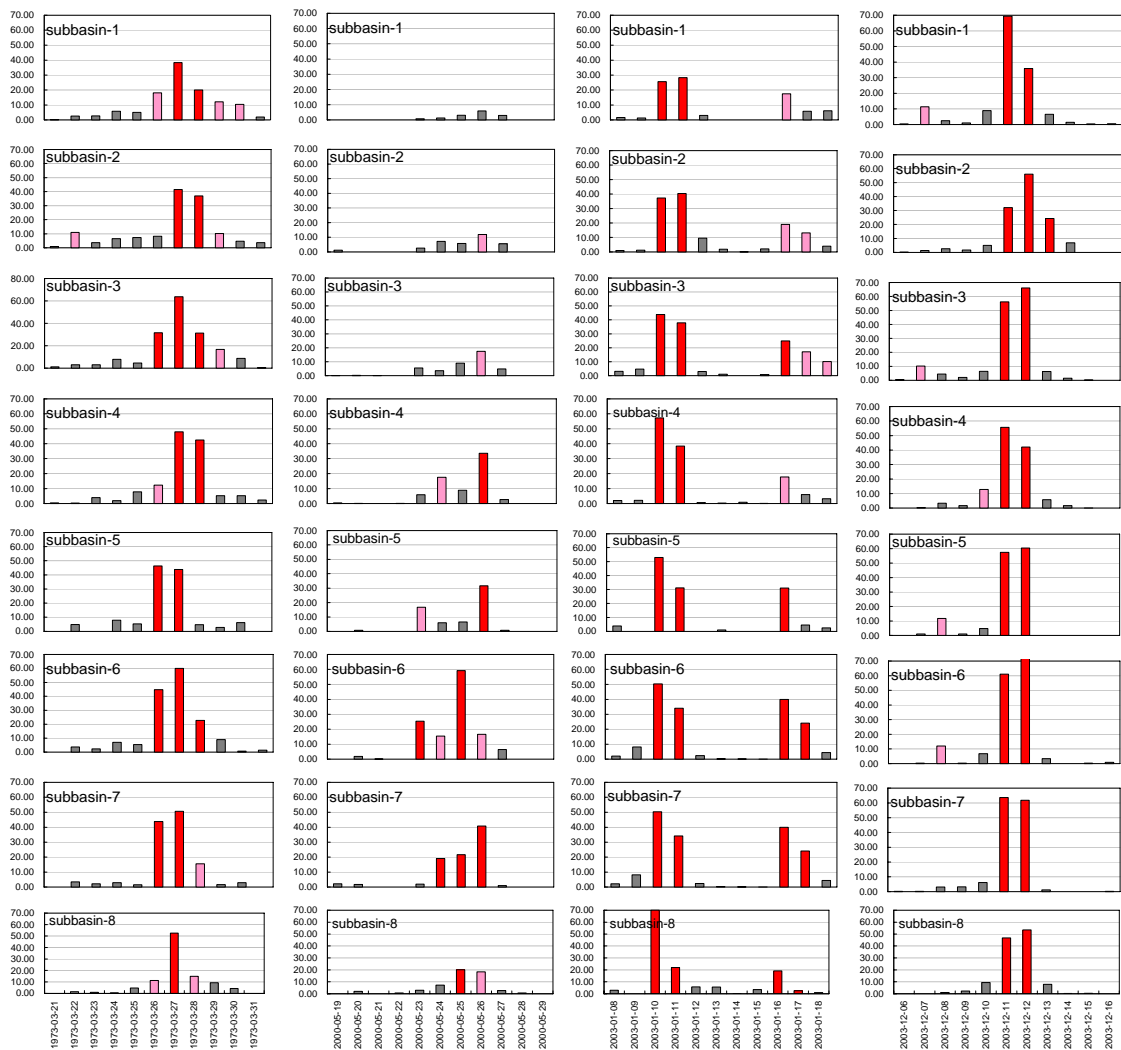


Figure II-(1)-3 Hyetogramme de la hauteur moyenne de la pluie dans chaque portion du sous-bassin (de 1 à 8) lors des 4 cas d'inondation dans le passé.

(Barre rouge : Précipitations de plus de 20 mm/jour, Barre rose : Précipitations de plus de 10 mm/jour et de moins de 20 mm/jour)

Le Tableau II-(1)-1 indique les précipitations maximales journalières, les précipitations maximales de 4 jours et les précipitations maximales de 5 jours qui ont été observées chaque année entre 1950 et 2007.

Tableau II-(1)-1 Précipitations maximales journalières, Précipitations maximales de 4 jours, et Précipitations maximales de 5 jours pour chaque année entre 1950 et 2007

year	1 jour [mm]	4 jours [mm]	5 jours [mm]
1950	28.73	42.97	52.75
1951	23.53	56.14	66.31
1952	36.16	82.43	89.58
1953	44.70	77.57	77.79
1954	20.89	47.24	52.01
1955	25.94	52.09	54.41
1956	31.70	67.17	70.45
1957	43.04	78.11	80.77
1958	28.65	48.60	54.77
1959	30.91	65.86	68.86
1960	14.91	26.12	26.30
1961	26.18	48.52	48.55
1962	33.92	78.14	85.82
1963	22.85	48.32	51.25
1964	46.59	76.36	76.62
1965	12.29	35.59	40.94
1966	23.51	56.43	56.65
1967	12.77	36.05	38.85
1968	19.40	41.16	43.68
1969	40.49	82.83	100.18
1970	27.44	51.80	51.92
1971	32.58	61.63	62.46
1972	30.66	52.38	55.62
1973	50.16	111.97	118.64
1974	23.70	59.18	63.01
1975	34.98	75.66	77.32
1976	27.94	73.75	75.85
1977	16.96	40.34	42.70
1978	17.18	41.33	50.54
1979	37.09	77.08	77.92
1980	24.46	46.89	47.35
1981	10.55	50.65	52.58
1982	25.16	52.66	59.18
1983	20.08	44.01	44.43
1984	38.84	98.02	100.38
1985	13.74	97.34	104.47
1986	17.18	39.91	42.86
1987	20.94	40.97	41.84
1988	25.64	43.93	46.41
1989	15.28	38.84	40.13
1990	32.22	67.36	81.41
1991	26.22	46.13	54.58
1992	34.84	63.26	65.54
1993	10.88	25.44	31.28
1994	17.44	45.78	51.92
1995	13.39	35.09	41.02
1996	26.58	66.93	70.17
1997	20.30	45.03	47.59
1998	28.55	45.39	47.51
1999	21.24	42.77	49.64
2000	21.27	49.47	62.63
2001	22.33	35.14	35.56
2002	22.09	45.86	49.93
2003	55.02	126.41	128.40
2004	43.05	72.08	76.72
2005	35.98	65.04	69.11
2006	33.69	60.36	68.52
2007	26.12	76.65	86.48

c. Sélection d'une fonction de densité de probabilité pour l'analyse des probabilités de la hauteur moyenne de précipitations maximales annuelles sur la zone du bassin versant

Nous avons sélectionné une fonction de densité de probabilité appropriée pour évaluer les précipitations maximales probables pour chaque période de retour sur la base du Tableau II-(1)-1, Précipitations maximale de 4 jours dans l'année et Précipitations maximales de 5 jours dans l'année. Nous avons utilisé les 11 fonctions suivantes (toutes pour les moyennes annuelles maximales) : Distribution exponentielle (Exp), Distribution Gumbel (Gumbel), Distribution du maximum double exponentielle (SqrtEto), Distribution généralisée des valeurs extrêmes (Gev), Distribution de Pearson III (LogP 3), Méthode Iwai, Méthode Ishihara/Takase (IshiTaka), Log normale à 3 paramètres (méthode quantile)(LN3Q), Log normale à 3 paramètres (Slade II) (LN3PM), Log normale de paramètres (μ , σ)(Slade I, méthode des moments L), Log normale de paramètres (μ , σ)(Slade I, méthode des moments)(LN2PM). Le résultat est présenté dans les Tableaux II-(1)-2 et II-(1)-3. Le degré de conformité de chaque fonction de densité de probabilité est présenté dans les Figures II-(1)-4 et 5.

Nous avons évalué le résultat de l'évaluation par SLSC (critères des moindres carrés classiques : évaluation de degré de conformité) ainsi que par la méthode du jackknife (évaluation de la stabilité). Nous avons appris que l'erreur de la distribution de maximum double exponentielle (SqrtEto), estimée par la méthode du jackknife, est considérablement plus petite que les autres et que SLSC est d'environ 0,03 qui sont une valeur très faible. La présente analyse a été faite pour les données de la période de l'année 1950 à l'année 2007. Le résultat de SqrtEto de cette analyse est très proche de celui de l'étude visant la période entre 1968 et 2005 dans « l'Etude de la gestion intégrée de l'eau du bassin versant de la Medjerda » (JICA, 2009). Par conséquent, nous avons décidé d'adopter la distribution de maximum double exponentielle (SqrtEto) à cause de sa stabilité.

Tableau II-(1)-2 Résultat de l'analyse des probabilités des précipitations maximales de 4 jours dans chaque année

Type de fonction	Distribution exponentielle		Exp											
SLSC(99%)	X-COR(99%)	P-COR(99%)	Log-vraisemblance	pAIC	SLSC(50%)	X-COR(50%)	P-COR(50%)							
0.038	0.983	0.947	-237.7	479.4	0.053	0.984	0.977							
Période de retour	400	200	150	100	80	50	30	20	10	5	3	2		
Valeur hydrologique probable	168.6	153.2	146.8	137.8	132.9	122.5	111.1	102.2	86.8	71.4	60.1	51.1		
Valeur d'estimation Jackknife	168.6	153.2	146.8	137.8	132.9	122.5	111.1	102.2	86.8	71.4	60.1	51.1		
Erreur de valeur d'estimation Jackknife	14.9	13.2	12.4	11.4	10.8	9.6	8.3	7.3	5.6	3.9	2.9	2.2		
Type de fonction	Distribution Gumbel		Gumbel											
SLSC(99%)	X-COR(99%)	P-COR(99%)	Log-vraisemblance	pAIC	SLSC(50%)	X-COR(50%)	P-COR(50%)							
0.026	0.992	0.992	-250.6	505.1	0.045	0.986	0.979							
Période de retour	400	200	150	100	80	50	30	20	10	5	3	2		
Valeur hydrologique probable	144.5	133.4	128.9	122.2	118.7	111.1	102.8	96.2	84.7	72.7	63.1	54.6		
Valeur d'estimation Jackknife	144.5	133.4	128.9	122.2	118.7	111.1	102.8	96.2	84.7	72.7	63.1	54.6		
Erreur de valeur d'estimation Jackknife	12.1	10.9	10.3	9.6	9.2	8.3	7.4	6.6	5.3	4.1	3.1	2.4		
Type de fonction	Distribution de maximum double exponentielle		SqrEto											
SLSC(99%)	X-COR(99%)	P-COR(99%)	Log-vraisemblance	pAIC	SLSC(50%)	X-COR(50%)	P-COR(50%)							
0.031	0.991	0.994	-250.8	505.6	0.057	0.985	0.979							
Période de retour	400	200	150	100	80	50	30	20	10	5	3	2		
Valeur hydrologique probable	182.2	163.1	155.3	144.5	138.7	126.8	114.4	104.9	89.3	74.3	63.2	53.9		
Valeur d'estimation Jackknife	182.2	163	155.1	144.4	138.6	126.7	114.3	104.8	89.2	74.1	63.1	53.8		
Erreur de valeur d'estimation Jackknife	3.8	3.6	3.6	3.4	3.4	3.2	3.1	3	2.8	2.5	2.4	2.2		
Type de fonction	Distribution généralisée des valeurs		Gay											
SLSC(99%)	X-COR(99%)	P-COR(99%)	Log-vraisemblance	pAIC	SLSC(50%)	X-COR(50%)	P-COR(50%)							
0.024	0.993	0.993	-250.3	506.7	0.042	0.986	0.976							
Période de retour	400	200	150	100	80	50	30	20	10	5	3	2		
Valeur hydrologique probable	158.1	143.1	137	129.7	124.2	114.9	105	97.4	84.6	71.9	62.2	53.8		
Valeur d'estimation Jackknife	155.1	141.6	136	128.1	123.8	114.8	105.2	97.6	84.8	72	62.2	53.8		
Erreur de valeur d'estimation Jackknife	29.8	22.4	19.8	16.4	14.7	11.7	9	7.3	5.3	4.1	3.4	2.8		
Type de fonction	Log Pearson type III		LogP3											
SLSC(99%)	X-COR(99%)	P-COR(99%)	Log-vraisemblance	pAIC	SLSC(50%)	X-COR(50%)	P-COR(50%)							
0.028	0.993	0.993	-250.3	506.7	0.047	0.993	0.993							
Période de retour	400	200	150	100	80	50	30	20	10	5	3	2		
Valeur hydrologique probable	151.9	138.5	133.1	125.6	121.5	113	103.9	96.8	84.7	72.3	62.7	54.1		
Valeur d'estimation Jackknife	149	136.7	131.7	124.5	120.7	112.6	103.8	96.8	84.8	72.4	62.7	54.1		
Erreur de valeur d'estimation Jackknife	24.3	19.1	17.2	14.7	13.5	11.1	8.9	7.4	5.4	4	3.2	2.6		
Type de fonction	Methode Iwai		Iwai											
SLSC(99%)	X-COR(99%)	P-COR(99%)	Log-vraisemblance	pAIC	SLSC(50%)	X-COR(50%)	P-COR(50%)							
0.029	0.993	0.993	-250.4	506.7	0.05	0.986	0.979							
Période de retour	400	200	150	100	80	50	30	20	10	5	3	2		
Valeur hydrologique probable	144.7	133.3	128.6	122	118.3	110.7	102.5	95.9	84.5	72.5	63	54.5		
Valeur d'estimation Jackknife	152.6	139.5	134.2	126.7	122.7	114.1	104.9	97.7	85.2	72.4	62.4	53.7		
Erreur de valeur d'estimation Jackknife	24.5	20.1	18.3	16	14.8	12.4	10	8.3	5.8	3.8	2.8	2.3		
Type de fonction	Methode Ishihara/Takase		IshiTaka											
SLSC(99%)	X-COR(99%)	P-COR(99%)	Log-vraisemblance	pAIC	SLSC(50%)	X-COR(50%)	P-COR(50%)							
0.03	0.993	0.993	-250.3	506.7	0.049	0.986	0.977							
Période de retour	400	200	150	100	80	50	30	20	10	5	3	2		
Valeur hydrologique probable	148.7	136.2	131.1	124	120.1	112	103.2	96.3	84.4	72.2	62.6	54.1		
Valeur d'estimation Jackknife	147.5	135.7	130.8	124	120.2	112.4	103.8	96.9	85	72.6	62.8	54.1		
Erreur de valeur d'estimation Jackknife	21.1	17	15.5	13.5	12.5	10.4	8.5	7.2	5.4	4.1	3.4	2.8		
Type de fonction	methode quantile		LN3Q											
SLSC(99%)	X-COR(99%)	P-COR(99%)	Log-vraisemblance	pAIC	SLSC(50%)	X-COR(50%)	P-COR(50%)							
0.03	0.993	0.993	-250.4	506.7	0.048	0.986	0.978							
Période de retour	400	200	150	100	80	50	30	20	10	5	3	2		
Valeur hydrologique probable	151.1	138.1	132.8	125.5	121.4	113.1	104.1	97	84.8	72.3	62.6	54		
Valeur d'estimation Jackknife	157.7	143.4	137.6	129.6	125.2	116.1	106.3	98.7	85.7	72.5	62.4	53.6		
Erreur de valeur d'estimation Jackknife	20.7	17.3	15.9	14.1	13.1	11.2	9.3	7.8	5.7	3.9	2.9	2.4		
Type de fonction	Slide II		LN3PM											
SLSC(99%)	X-COR(99%)	P-COR(99%)	Log-vraisemblance	pAIC	SLSC(50%)	X-COR(50%)	P-COR(50%)							
0.029	0.993	0.993	-250.3	506.7	0.049	0.986	0.978							
Période de retour	400	200	150	100	80	50	30	20	10	5	3	2		
Valeur hydrologique probable	147.5	135.4	130.4	123.4	119.6	111.7	103.1	96.2	84.5	72.3	62.7	54.2		
Valeur d'estimation Jackknife	145.2	134	129.4	122.9	119.3	111.7	103.4	96.8	85.1	72.9	63.1	54.3		
Erreur de valeur d'estimation Jackknife	20.6	16.7	15.3	13.3	12.3	10.4	8.5	7.2	5.4	4.1	3.4	2.8		
Type de fonction	Slide I, methode des moments		LN2LM											
SLSC(99%)	X-COR(99%)	P-COR(99%)	Log-vraisemblance	pAIC	SLSC(50%)	X-COR(50%)	P-COR(50%)							
0.029	0.991	0.992	-250.5	505	0.053	0.986	0.979							
Période de retour	400	200	150	100	80	50	30	20	10	5	3	2		
Valeur hydrologique probable	140.7	130.1	125.8	119.7	116.3	109.2	101.4	95.2	84.3	72.7	63.3	54.8		
Valeur d'estimation Jackknife	139.9	129.5	125.2	119.2	115.8	108.8	101.1	94.9	84.1	72.6	63.2	54.7		
Erreur de valeur d'estimation Jackknife	14.7	12.8	12	10.9	10.3	9.2	7.9	7	5.4	4	3	2.4		
Type de fonction	Slide I, methode des moments		LN2PM											
SLSC(99%)	X-COR(99%)	P-COR(99%)	Log-vraisemblance	pAIC	SLSC(50%)	X-COR(50%)	P-COR(50%)							
0.03	0.991	0.992	-250.5	505	0.054	0.986	0.979							
Période de retour	400	200	150	100	80	50	30	20	10	5	3	2		
Valeur hydrologique probable	140.2	129.8	125.4	119.4	116	108.5	101.2	95	84.1	72.6	63.3	54.8		
Valeur d'estimation Jackknife	140	129.6	125.3	119.3	115.9	108.9	101.2	95	84.1	72.6	63.2	54.7		
Erreur de valeur d'estimation Jackknife	14.2	12.4	11.6	10.6	10	8.9	7.7	6.8	5.3	3.9	3	2.4		

Tableau II-(1)-3 Résultat de l'analyse des probabilités des précipitations maximales de 5 jours dans chaque année

Type de fonction	Distribution exponentielle			Exp										
SLSC(99%)	X-COR(99%)	P-COR(99%)	Log-vraisemblance	pAIC	SLSC(50%)	X-COR(50%)	P-COR(50%)							
0.038	0.983	0.945	-240.4	484.8	0.052	0.99	0.984							
Période de retour	400	200	150	100	80	50	30	20	10	5	3	2		
Valeur hydrologique probable	178.2	162.1	155.4	146	140.8	129.9	118	108.6	92.5	76.4	64.5	55.1		
Valeur d'estimation Jackknife	178.2	162.1	155.4	146	140.8	129.9	118	108.6	92.5	76.4	64.5	55.1		
Erreur de valeur d'estimation Jackknife	15.2	13.4	12.6	11.6	11	9.8	8.4	7.4	5.7	4	3	2.3		
Type de fonction	Distribution Gumbel			Gumbel										
SLSC(99%)	X-COR(99%)	P-COR(99%)	Log-vraisemblance	pAIC	SLSC(50%)	X-COR(50%)	P-COR(50%)							
0.02	0.995	0.995	-253.3	510.7	0.032	0.993	0.986							
Période de retour	400	200	150	100	80	50	30	20	10	5	3	2		
Valeur hydrologique probable	152.9	141.3	136.5	129.6	125.9	117.9	109.3	102.3	90.3	77.7	67.7	58.7		
Valeur d'estimation Jackknife	152.9	141.3	136.5	129.6	125.9	117.9	109.3	102.3	90.3	77.7	67.7	58.7		
Erreur de valeur d'estimation Jackknife	12.3	11	10.5	9.7	9.3	8.4	7.5	6.7	5.4	4.2	3.2	2.5		
Type de fonction	Distribution de maximum double exponentielle			SqRTeto										
SLSC(99%)	X-COR(99%)	P-COR(99%)	Log-vraisemblance	pAIC	SLSC(50%)	X-COR(50%)	P-COR(50%)							
0.028	0.993	0.996	-253.7	511.4	0.051	0.989	0.986							
Période de retour	400	200	150	100	80	50	30	20	10	5	3	2		
Valeur hydrologique probable	189.7	169.7	161.7	150.7	144.8	132.7	120.1	110.3	94.4	78.9	67.5	57.9		
Valeur d'estimation Jackknife	189.6	169.6	161.6	150.6	144.7	132.6	119.9	110.2	94.2	78.8	67.4	57.8		
Erreur de valeur d'estimation Jackknife	4	3.8	3.7	3.6	3.5	3.4	3.2	3.1	2.9	2.7	2.5	2.3		
Type de fonction	Distribution généralisée des valeurs			Gev										
SLSC(99%)	X-COR(99%)	P-COR(99%)	Log-vraisemblance	pAIC	SLSC(50%)	X-COR(50%)	P-COR(50%)							
0	0.995	0.996	-253.3	512.5	0.033	0.991	0.984							
Période de retour	400	200	150	100	80	50	30	20	10	5	3	2		
Valeur hydrologique probable	164.3	149.4	143.4	135.1	130.5	121.1	111.2	103.4	90.2	77	66.9	58		
Valeur d'estimation Jackknife	161.8	148.1	142.5	134.5	130.2	121.1	111.3	103.6	90.4	77.1	66.9	58		
Erreur de valeur d'estimation Jackknife	27.9	21.2	18.7	15.7	14.2	11.4	8.9	7.3	5.4	4.2	3.5	2.8		
Type de fonction	Log Pearson type III			LogP3										
SLSC(99%)	X-COR(99%)	P-COR(99%)	Log-vraisemblance	pAIC	SLSC(50%)	X-COR(50%)	P-COR(50%)							
0.022	0.996	0.995	-253.3	512.5	0.035	0.996	0.995							
Période de retour	400	200	150	100	80	50	30	20	10	5	3	2		
Valeur hydrologique probable	157.3	144.1	138.8	131.4	127.3	118.8	109.7	102.5	90.2	77.4	67.4	58.5		
Valeur d'estimation Jackknife	154.5	142.4	137.4	130.4	126.5	118.4	109.5	102.5	90.3	77.6	67.5	58.5		
Erreur de valeur d'estimation Jackknife	23.3	18.4	16.6	14.2	13.1	10.8	8.7	7.3	5.4	4.1	3.3	2.7		
Type de fonction	Methode Iwai			Iwai										
SLSC(99%)	X-COR(99%)	P-COR(99%)	Log-vraisemblance	pAIC	SLSC(50%)	X-COR(50%)	P-COR(50%)							
0.025	0.996	0.996	-253.3	512.7	0.035	0.992	0.986							
Période de retour	400	200	150	100	80	50	30	20	10	5	3	2		
Valeur hydrologique probable	161.1	147.4	141.8	134	129.7	120.8	111.3	103.8	90.8	77.6	67.3	58.2		
Valeur d'estimation Jackknife	170.2	154.7	148.3	139.6	134.8	124.9	114.3	106	92	77.8	66.9	57.6		
Erreur de valeur d'estimation Jackknife	23.7	19.4	17.7	15.5	14.4	12.1	9.8	8.2	5.9	4.1	3.1	2.6		
Type de fonction	Methode Ishihara/Takase			IshiTaka										
SLSC(99%)	X-COR(99%)	P-COR(99%)	Log-vraisemblance	pAIC	SLSC(50%)	X-COR(50%)	P-COR(50%)							
0.023	0.996	0.995	-253.3	512.5	0.038	0.992	0.986							
Période de retour	400	200	150	100	80	50	30	20	10	5	3	2		
Valeur hydrologique probable	153.3	141.2	136.3	129.3	125.5	117.5	108.8	101.9	89.9	77.4	67.5	58.5		
Valeur d'estimation Jackknife	151.6	140.2	135.5	128.9	125.3	117.5	109.1	102.3	90.4	77.9	67.8	58.6		
Erreur de valeur d'estimation Jackknife	17.9	14.7	13.5	11.9	11.1	9.5	7.9	6.9	5.4	4.3	3.5	2.9		
Type de fonction	methode quantile			LN3Q										
SLSC(99%)	X-COR(99%)	P-COR(99%)	Log-vraisemblance	pAIC	SLSC(50%)	X-COR(50%)	P-COR(50%)							
0.023	0.996	0.995	-253.3	512.5	0.038	0.992	0.986							
Période de retour	400	200	150	100	80	50	30	20	10	5	3	2		
Valeur hydrologique probable	153	141	135.1	129.1	125.4	117.4	108.7	101.8	89.9	77.4	67.5	58.6		
Valeur d'estimation Jackknife	143.1	133.6	129.6	123.9	120.7	114	106.5	100.4	89.6	77.8	68.1	59.2		
Erreur de valeur d'estimation Jackknife	18.5	15.1	13.8	12.2	11.3	9.6	8	6.9	5.3	4.1	3.3	2.7		
Type de fonction	Slade II			LN3PM										
SLSC(99%)	X-COR(99%)	P-COR(99%)	Log-vraisemblance	pAIC	SLSC(50%)	X-COR(50%)	P-COR(50%)							
0.023	0.996	0.995	-253.3	512.5	0.038	0.993	0.986							
Période de retour	400	200	150	100	80	50	30	20	10	5	3	2		
Valeur hydrologique probable	152.2	140.4	135.6	128.8	125	117.2	108.6	101.8	90	77.5	67.6	58.6		
Valeur d'estimation Jackknife	149.7	138.9	134.4	128	124.4	117	108.8	102.1	90.5	78.1	68	58.8		
Erreur de valeur d'estimation Jackknife	17.5	14.4	13.3	11.7	10.9	9.4	7.9	6.9	5.4	4.3	3.5	2.9		
Type de fonction	Slade I, methode des moments			LN2LM										
SLSC(99%)	X-COR(99%)	P-COR(99%)	Log-vraisemblance	pAIC	SLSC(50%)	X-COR(50%)	P-COR(50%)							
0.023	0.995	0.994	-253.4	510.8	0.04	0.993	0.987							
Période de retour	400	200	150	100	80	50	30	20	10	5	3	2		
Valeur hydrologique probable	148.4	137.6	133.1	126.8	123.3	115.9	107.9	101.3	89.7	77.8	68	59		
Valeur d'estimation Jackknife	147.7	136.9	132.5	126.2	122.8	115.5	107.5	101.1	89.7	77.7	67.9	59		
Erreur de valeur d'estimation Jackknife	15	13.1	12.3	11.2	10.6	9.4	8.1	7.2	5.6	4.1	3.2	2.5		
Type de fonction	Slade I, methode des moments			LN2PM										
SLSC(99%)	X-COR(99%)	P-COR(99%)	Log-vraisemblance	pAIC	SLSC(50%)	X-COR(50%)	P-COR(50%)							
0.024	0.995	0.994	-253.4	510.8	0.041	0.993	0.987							
Période de retour	400	200	150	100	80	50	30	20	10	5	3	2		
Valeur hydrologique probable	147.6	136.8	132.4	126.1	122.7	115.4	107.4	101	89.7	77.7	67.9	59		
Valeur d'estimation Jackknife	147.4	136.7	132.3	126.1	122.6	115.4	107.4	101	89.7	77.7	67.9	59		
Erreur de valeur d'estimation Jackknife	14.4	12.5	11.8	10.8	10.2	9	7.8	6.9	5.4	4	3.1	2.5		

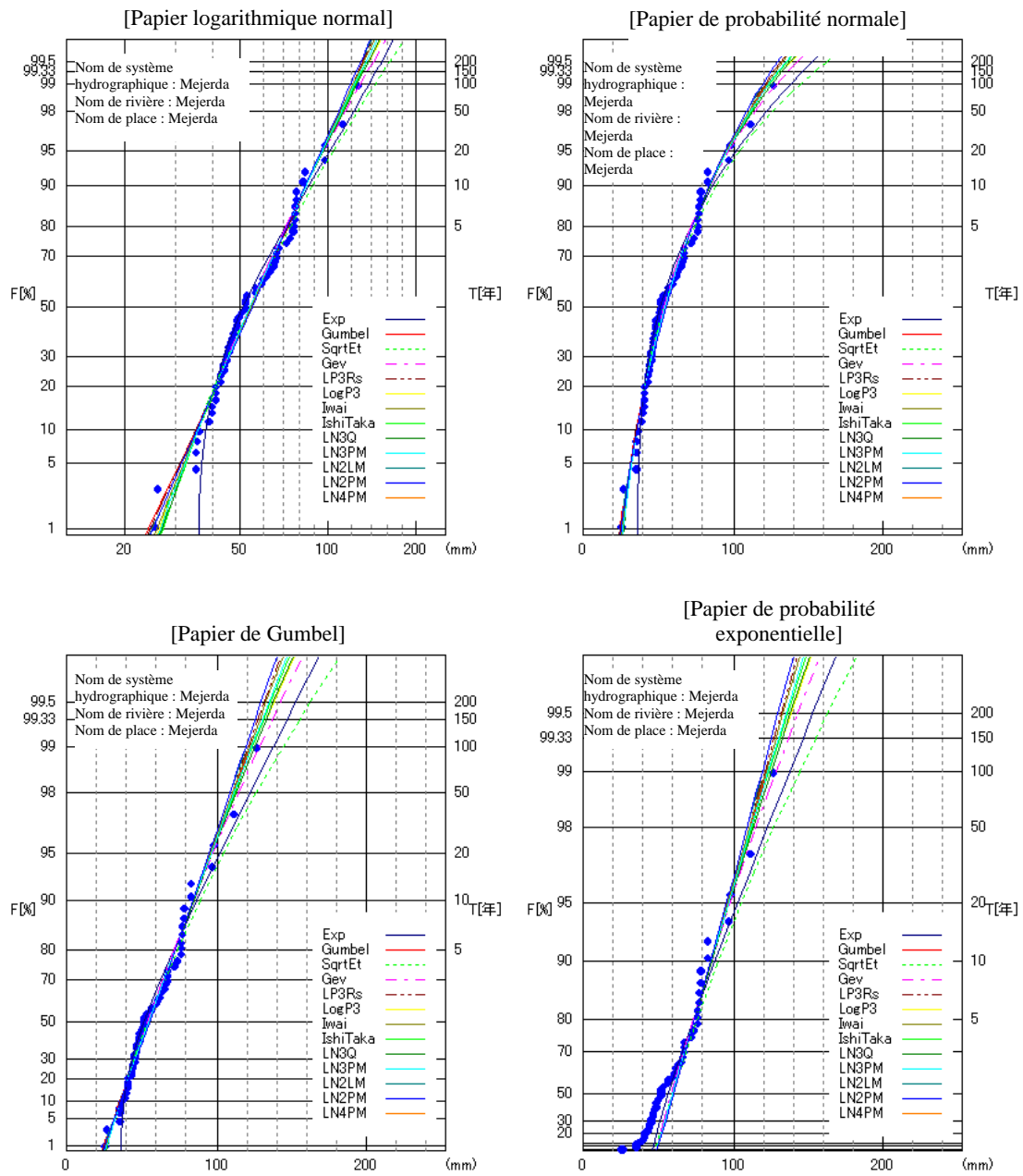


Figure II-(1)-4 Degré de conformité de chaque distribution des précipitations de 4 jours

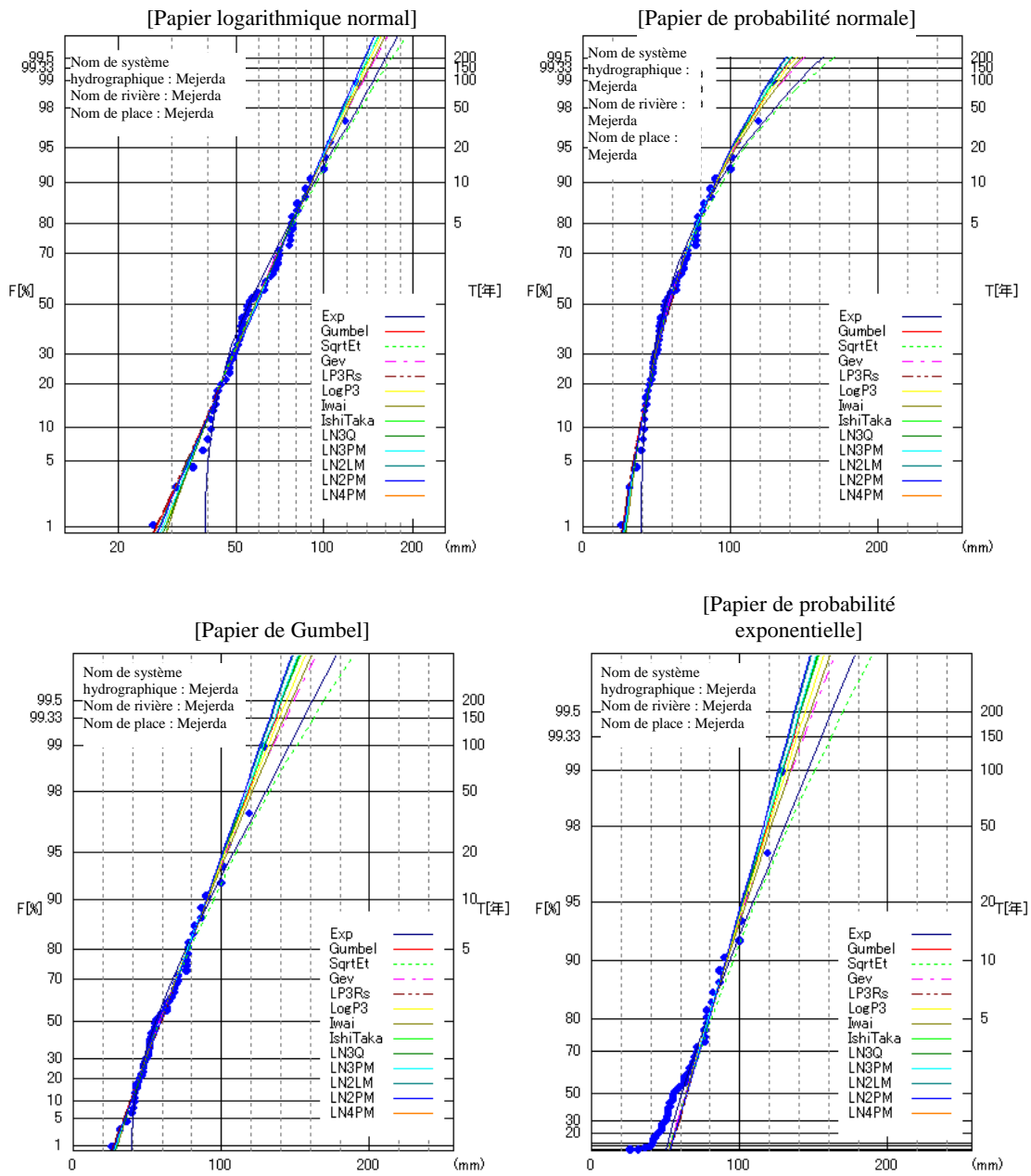


Figure II-(1)-5 Degré de conformité de chaque distribution des précipitations de 5 jours

d. Création des données de distribution journalière et temporelle des précipitations probablesCréation des données des précipitations journalières

Nous avons réparti les précipitations probables relatives à 4 jours de pluie continue et à 5 jours de pluie continue, estimées par la distribution de maximum double exponentielle (SqrtEto), par jour, proportionnellement à la distribution journalière des précipitations des 4 cas d'inondation dans le passé (mars 1973, mai 2000, janvier 2003 et décembre 2003). Le résultat est présenté dans le Tableau II-(1)-4.

Le Tableau II-(1)-4 doit être lu comme suit. C'est un exemple des précipitations de mars 1973. Les précipitations totales de 5 jours étaient de 118,64 mm dont 22,36 mm pour le 26 mars, 50,16mm pour le 27 mars, 28,29 mm pour le 28 mars, ainsi de suite. Si le nombre de jours de pluie continue est de 4, c'est-à-dire du 26 au 29 mars, la proportion des précipitations de chaque jour par rapport à la totalité des précipitations (111,97 mm) est respectivement 0,20, 0,45, 0,26 et 0,09. Si le nombre de jours de pluie continue est de 5, c'est-à-dire, du 26 au 30 mars, la proportion des précipitations de chaque jour par rapport à la totalité est comme indiquée dans le tableau. Par ailleurs, les précipitations se produisant tous les 100 ans relatives à 4 jours de pluie continue étaient de 144,50 mm Si bien que les précipitations probables du 26 mars peuvent être obtenues en multipliant 144,50 mm par 0,20, donc 28,26 mm Ainsi, les précipitations probables ont été obtenues pour les autres jours.

Tableau II-(1)-4 Distribution des précipitations maximales annuelles pour chaque période de retour

Moyenne du bassin versant	Précip. Journ.	4-day	5-day	Précip. probables											
				100 ans		50 ans		20 ans		10 ans		5 ans		2 ans	
				4-day	5-day	4-day	5-day	4-day	5-day	4-day	5-day	4-day	5-day	4-day	5-day
Précip. cumulées	118.64	1.00	1.00	144.50	150.70	126.80	132.70	104.90	110.30	89.30	94.40	74.30	78.90	53.90	57.90
1973/3/26	22.36	0.20	0.19	28.86	28.40	25.32	25.01	20.95	20.79	17.83	17.79	14.84	14.87	10.76	10.91
1973/3/27	50.16	0.45	0.42	64.73	63.71	56.80	56.10	46.99	46.63	40.00	39.91	33.28	33.36	24.15	24.48
1973/3/28	28.89	0.26	0.24	37.28	36.70	32.71	32.31	27.06	26.86	23.04	22.99	19.17	19.21	13.91	14.10
1973/3/29	10.56	0.09	0.09	13.63	13.42	11.96	11.82	9.90	9.82	8.42	8.41	7.01	7.03	5.08	5.16
1973/3/30	6.67		0.06	0.00	8.47	0.00	7.46	0.00	6.20	0.00	5.30	0.00	4.43	0.00	3.25
Précip. cumulées	48.34	1.00	1.00	144.50	150.70	126.80	132.70	104.90	110.30	89.30	94.40	74.30	78.90	53.90	57.90
2000/5/23	4.61	0.10	0.10	14.97	14.36	13.13	12.65	10.86	10.51	9.25	9.00	7.70	7.52	5.58	5.52
2000/5/24	8.50	0.19	0.18	27.61	26.50	24.23	23.33	20.04	19.39	17.06	16.60	14.20	13.87	10.30	10.18
2000/5/25	11.69	0.26	0.24	37.97	36.44	33.32	32.09	27.56	26.67	23.46	22.83	19.52	19.08	14.16	14.00
2000/5/26	19.69	0.44	0.41	63.96	61.38	56.12	54.05	46.43	44.93	39.53	38.45	32.89	32.14	23.86	23.58
2000/5/27	3.86		0.08	0.00	12.02	0.00	10.58	0.00	8.80	0.00	7.53	0.00	6.29	0.00	4.62
Précip. cumulées	89.79	1.00	1.00	144.50	150.70	126.80	132.70	104.90	110.30	89.30	94.40	74.30	78.90	53.90	57.90
2003/1/8	2.25		0.03	0.00	3.77	0.00	3.32	0.00	2.76	0.00	2.36	0.00	1.97	0.00	1.45
2003/1/9	2.34	0.03	0.03	3.86	3.92	3.38	3.45	2.80	2.87	2.38	2.46	1.98	2.05	1.44	1.51
2003/1/10	45.88	0.52	0.51	75.73	77.00	66.45	67.80	54.97	56.36	46.80	48.23	38.94	40.31	28.25	29.58
2003/1/11	35.80	0.41	0.40	59.09	60.08	51.85	52.90	42.89	43.97	36.52	37.63	30.38	31.46	22.04	23.08
2003/1/12	3.53	0.04	0.04	5.83	5.93	5.12	5.22	4.23	4.34	3.60	3.71	3.00	3.10	2.18	2.28
Précip. cumulées	128.40	1.00	1.00	144.50	150.70	126.80	132.70	104.90	110.30	89.30	94.40	74.30	78.90	53.90	57.90
2003/12/10	7.98	0.06	0.06	9.12	9.36	8.00	8.24	6.62	6.85	5.64	5.87	4.69	4.90	3.40	3.60
2003/12/11	54.92	0.43	0.43	62.78	64.46	55.09	56.76	45.58	47.18	38.80	40.38	32.28	33.75	23.42	24.77
2003/12/12	55.02	0.44	0.43	62.89	64.57	55.19	56.86	45.65	47.26	38.86	40.45	32.34	33.81	23.46	24.81
2003/12/13	8.49	0.07	0.07	9.71	9.97	8.52	8.78	7.05	7.30	6.00	6.24	4.99	5.22	3.62	3.83
2003/12/14	1.99		0.02	0.00	2.34	0.00	2.06	0.00	1.71	0.00	1.46	0.00	1.22	0.00	0.90

Création des données de précipitation par heure

Nous avons corrigé les précipitations par heure au moyen d'une interpolation linéaire de manière à garder la forme de la distribution des précipitations journalières des 4 cas précédents. La méthode de l'interpolation linéaire est la suivante.

- i. Définir les précipitations en fin de journée (minuit).
Elles sont la moyenne des précipitations du jour ciblé et du jour suivant Ph_0 .
Si les précipitations du jour ciblé ou du jour suivant sont de 0 mm, les précipitations par heure en fin de journée sont 0 mm (exception 1).
- ii. Définir les précipitations par heure à 12 h suivant le principe de la Figure II-(1)-6.
Si les précipitations par heure à 12 h sont négatives, elles sont considérées comme 0 mm (exception 2).
Note : Quand la courbe des précipitations décrite en forme de M, les précipitations par heure au milieu de la période donnée peuvent être négatives.
- iii. Diviser la période ciblée en matin et après-midi.
- iv. Calculer les précipitations par heure du matin, égalisées à partir de celles à 0 h et à 12 h (la moyenne des précipitations par heure entre celle à 0 h et à 12 h). Faire la même opération pour l'après-midi.
- v. Définir proportionnellement les précipitations du matin et de l'après-midi de manière à ce que le total des précipitations du matin et de l'après-midi soit égale aux précipitations journalières. Ceci est pour ajuster les précipitations additionnées en augmentant les précipitations par heure de la valeur négative à 12 h.
- vi. Suivant ce principe (la période est le matin/l'après-midi), définir les précipitations par heure à 6 h et à 18 h. Il est supposé qu'à ce moment-là, la valeur négative ne se produit pas.
- vii. Après avoir défini ainsi les précipitations à 0 h, 6 h, 12 h, 18 h, et 24 h, procéder à l'interpolation linéaire pour le reste.

T : Période

r_m : Précipitations moyennes de période (par unité de temps)

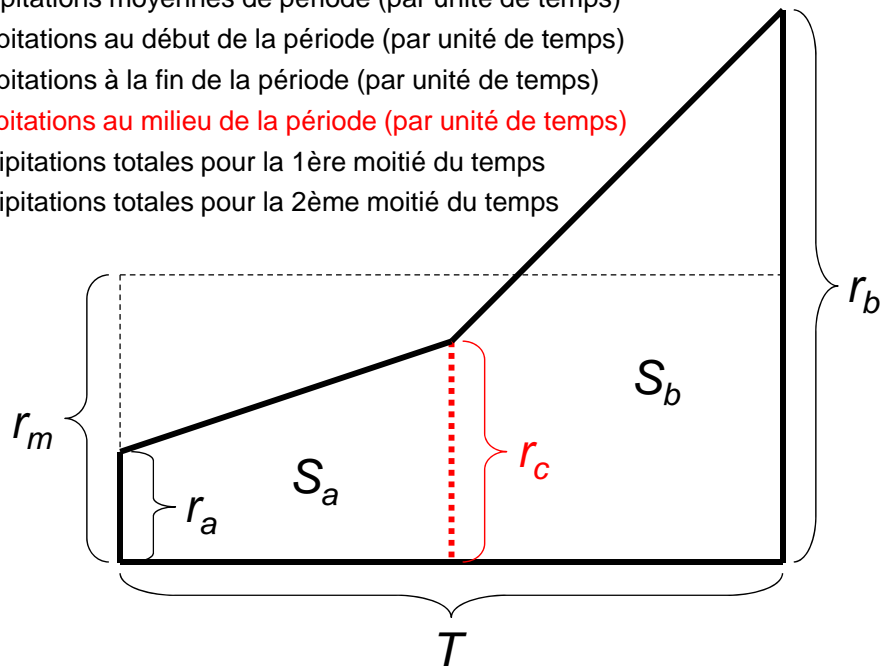
r_a : Précipitations au début de la période (par unité de temps)

r_b : Précipitations à la fin de la période (par unité de temps)

r_c : Précipitations au milieu de la période (par unité de temps)

S_a : Précipitations totales pour la 1ère moitié du temps

S_b : Précipitations totales pour la 2ème moitié du temps



Précipitations totales de la période

$$= r_m \cdot T = S_a + S_b = (r_a + r_c) \cdot T/2 \cdot 1/2 + (r_c + r_b) \cdot T/2 \cdot 1/2$$

$$= r_a \cdot T/4 + r_c \cdot T/2 + r_b \cdot T/4$$

$$r_c = 2 \cdot r_m - r_a/2 - r_b/2 = 2 \cdot r_m - (r_a + r_b)/2$$

Figure II-(1)-6 Schéma conceptuel de l'interpolation linéaire par rapport aux précipitations par heure

La Figure II-(1)-7 montre un exemple des précipitations par heure.

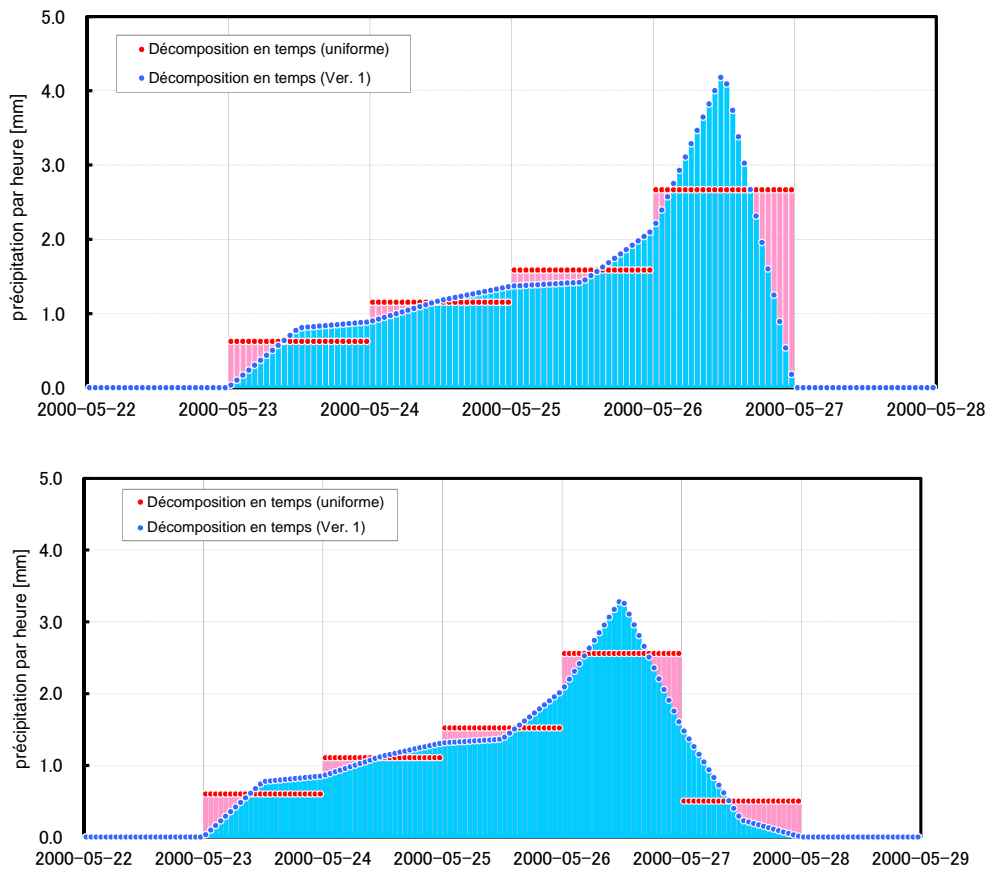


Figure II-(1)-7 Supposition d'un hyetogramme des heures d'inondation en Mai 2000 (la Figure en haut : 4 jours de pluie continue, Figure en bas : 5 jours de pluies continues)

e. Création des données de distribution spatiale des précipitations maximales probables

Dans la zone d'étude, l'évolution de la distribution spatiale dans le temps est importante. Il faut tenir compte de cette caractéristique pour calculer le débit de crue sans contrôle. Par conséquent, les données de la grille des précipitations journalières ont été créées au moyen de l'interpolation et de l'extrapolation des données des stations de précipitations qui sont montrées dans la Figure II-(1)-2 (s'il y a une lacune dans les données d'observation, elle est complétée par les données de la station d'observation la plus proche) pour calculer le rapport des précipitations de chaque grille par rapport aux précipitations moyennes journalières du bassin versant. Ensuite, les données de la grille de distribution spatio-temporelle des précipitations sont créées en multipliant les données des précipitations maximales probables de chaque heure relatives à 2 nombres de jours de pluie continue pour 4 cas d'inondation, qui ont été obtenues à l'étape précédente (d), par le rapport des précipitations entre les grilles. De plus, les données de distribution spatio-temporelle des précipitations pour chaque période de retour sont créées en multipliant les données de chaque grille des précipitations par heure par le coefficient de pondération du jour précédent, du jour présent, et du jour suivant, qui est montré dans la Figure II-(1)-8, pour éliminer la discontinuité de la distribution spatiale à 24 h (c'est-à-dire, à la fin du

jour). Les Figures II- (1)-9a à (1)-9d, sont les exemples de la distribution spatiale des précipitations probables de la période de retour de 100 ans par rapport aux précipitations de 4 jours de pluie continue.

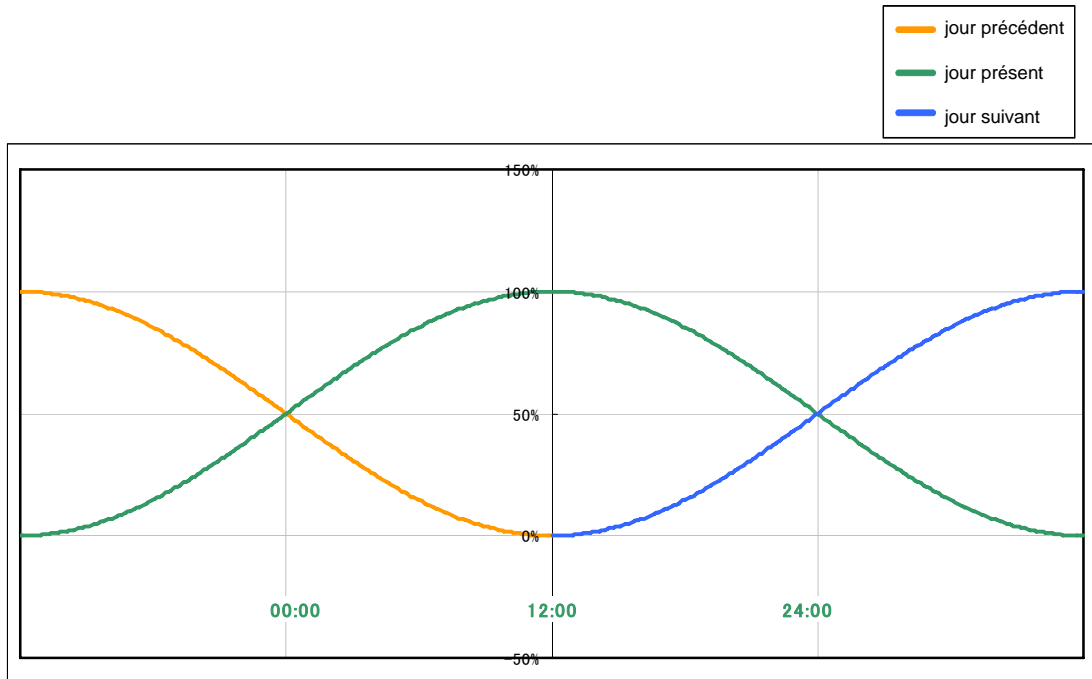


Figure II-(1)-8 Pondération pour améliorer la continuité à 24 h (à la fin du jour)

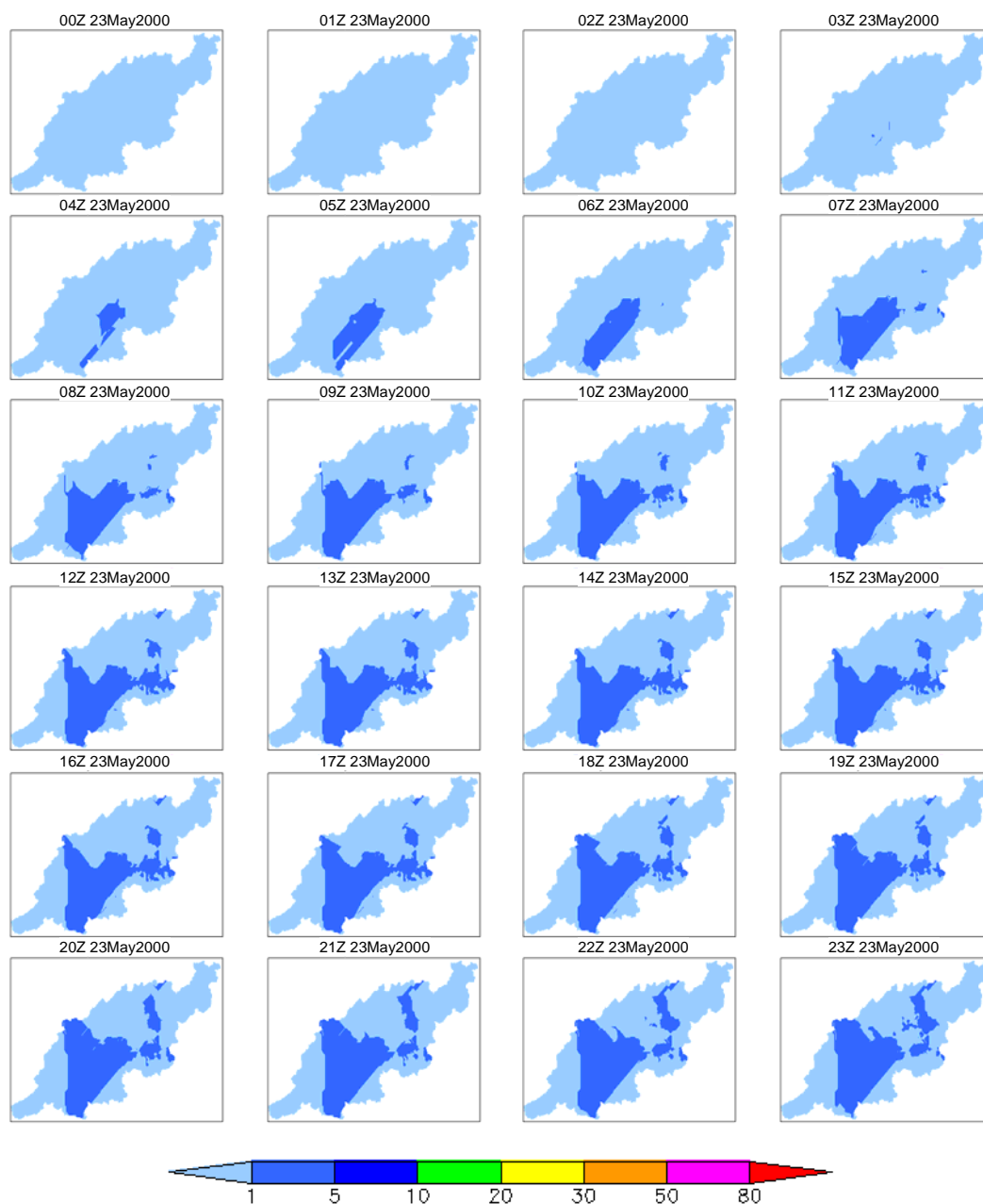


Figure II-(1)-9a Distribution spatio-temporelle des précipitations probables de la période de retour de 100 ans par rapport aux précipitations de 4 jours de pluie continue (Inondation en mai 2000 : 1er jour)

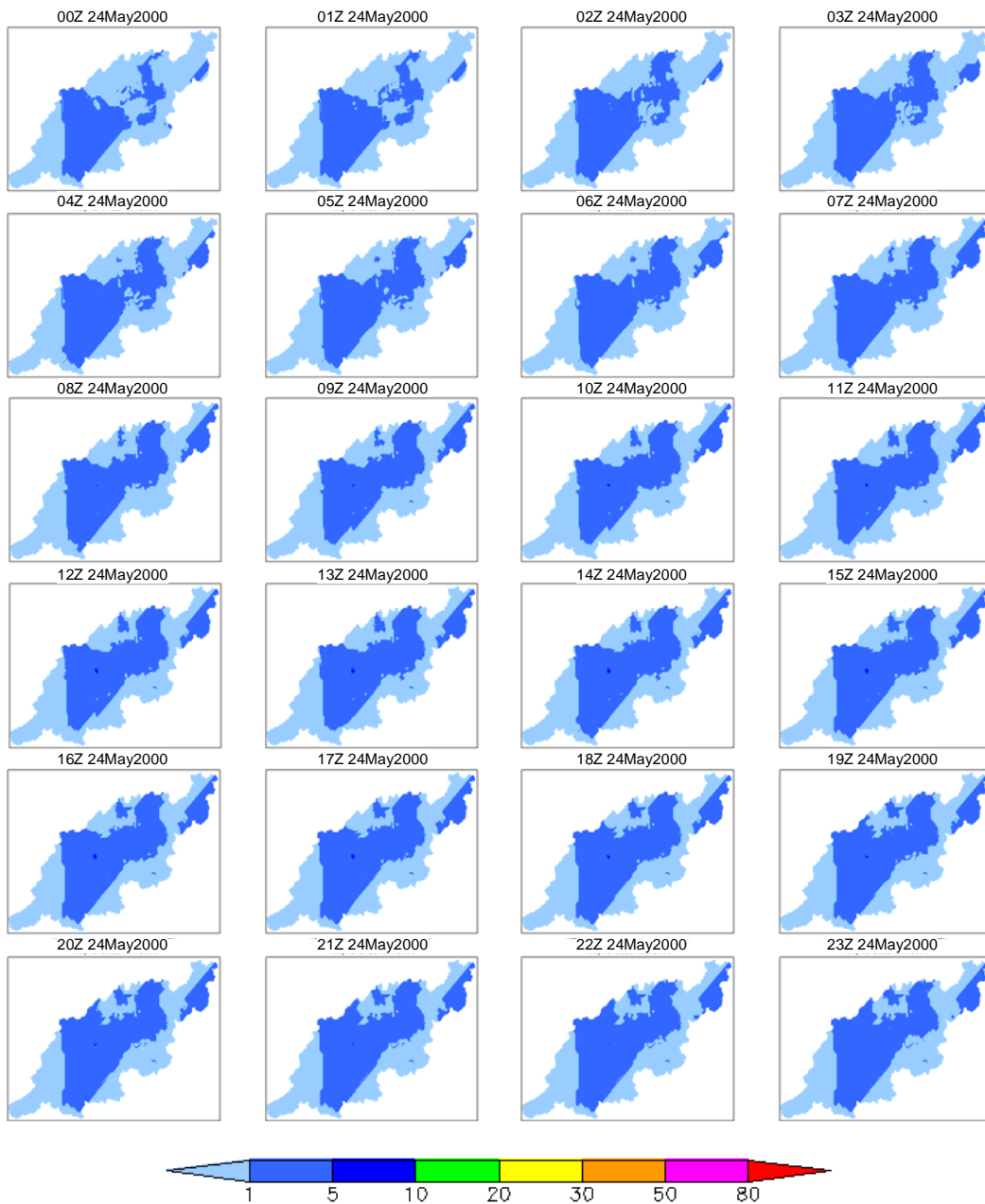


Figure II-(1)-9b Distribution spatio-temporelle des précipitations probables de la période de retour de 100 ans par rapport aux précipitations de 4 jours de pluie continue (Inondation en mai 2000 : 2ème jour)

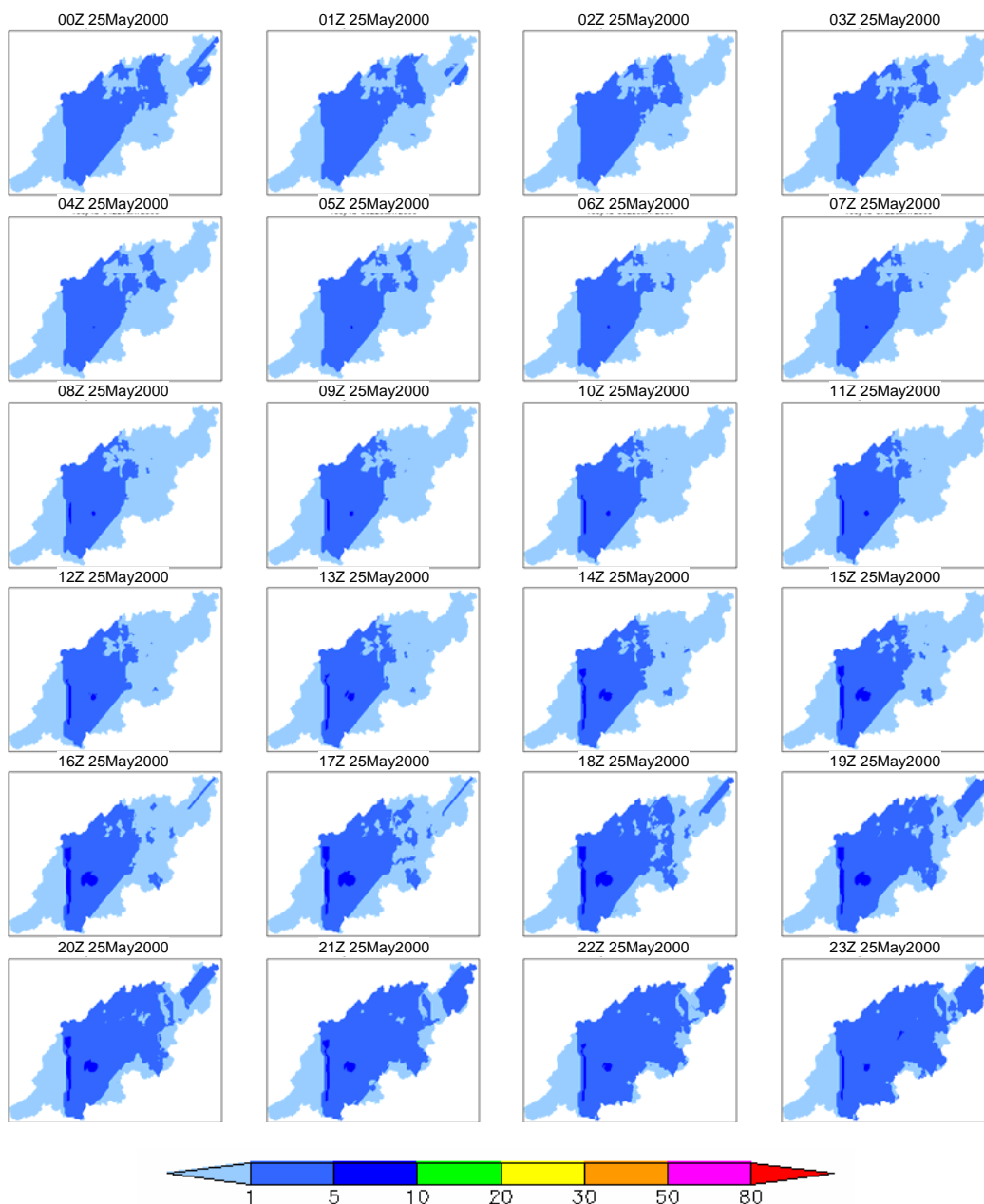


Figure II-(1)-9c Distribution spatio-temporelle des précipitations probables de la période de retour de 100 ans par rapport aux précipitations de 4 jours de pluie continue (Inondation de mai 2000 : 3ème jour)

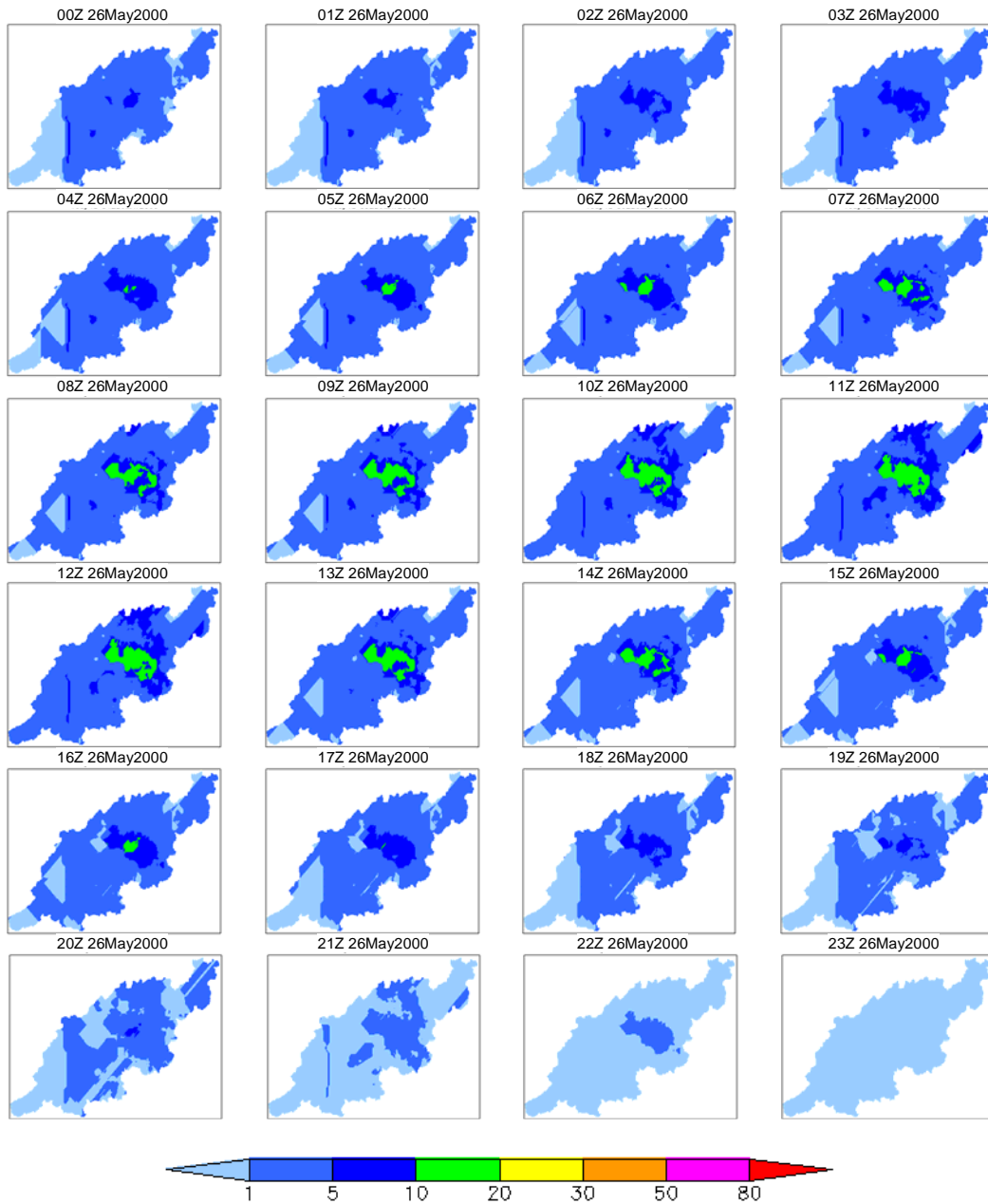


Figure II-(1)-9d Distribution spatio-temporelle des précipitations probables de la période de retour de 100 ans par rapport aux précipitations de 4 jours de pluie continue (Inondation de Mai 2000 : 4^{ème} jour)

2) Evaluation du débit de crue sans contrôle

a. Aperçu du modèle hydrologique et des données utilisées

Le modèle du cycle hydrologique distribué est un outil efficace qui permet de reproduire le processus d'écoulement et le processus de ruissellement de l'eau en tenant compte de l'hétérogénéité spatiale à différentes échelles, de celle des bassins versants à celle du continent. Surtout, le modèle hydrologique distribué, basé sur le budget de l'eau et de l'énergie, conçu par la fusion entre le processus d'hydrologie de surface qui est intégré dans le modèle de circulation générale de l'atmosphère et le GBHM (Modèle Hydrologique Distribué à Base de Géomorphologie) (Wang *et al.*, 2009) du système de la surface de la pente et du cours d'eau, permettant de calculer l'interaction entre l'atmosphère et la surface de la terre, l'humidité du sol, le débit d'écoulement de la rivière, etc. d'une manière très précise, constitue ainsi un système utilisable pour des usages variés, muni des fonctions nécessaires pour cette étude. En plus, dans le cas de WEB-DHM, la variation du niveau d'eau de l'eau souterraine non confinée ainsi que l'afflux de l'eau vers le fleuve en combinaison avec l'évolution de l'eau dans le sol étant représentés et l'interaction entre la zone non saturée et la nappe phréatique étant intégrée dans le système, WEB-DHM contribue à améliorer la précision de la représentation du courant de filtration vertical de l'eau dans le sol et du ruissellement de l'eau souterraine. Donc, il est très efficace pour cette étude dans laquelle l'échange d'eau entre les cours d'eau et les zones environnantes dans la zone semi-aride doit être étudié séparément pour la zone aride et pour la zone alluviale.

Structure générale du modèle

L'explication générale de la structure du WEB-DHM est présentée ci-dessous et dans la Figure II- (1)-10 qui est donnée un peu plus bas.

- (i) La zone des bassins versants est divisée en sous-bassins. Chaque sous bassin est divisée encore en sections plus petites, appelées intervalles de débit, sur la base de la distance à partir du point de la source.
- (ii) Il existe une grille de champ virtuel pour le calcul du processus d'hydrologie de surface terrestre à l'aide du Modèle de Biosphère Simple II (SiB2, Sellers *et al.*, 1996). Le flux (eau, énergie, CO₂) entre l'atmosphère et la surface de la terre est calculé dans chaque grille ayant une occupation des terrains et un type de sol homogènes.
- (iii) Le calcul du ruissellement est fait en considération des cours d'eau qui existent dans chaque grille et les divers éléments de pente qui se trouvent à deux côtés de cours d'eau. Le ruissellement sur la surface de la terre, le ruissellement intermédiaire, celui de l'eau souterraine sont calculés à l'aide du Modèle Hydrologique Basé sur la Géomorphologie (GBHM, Yang *et al.*, 2000). Ensuite, le calcul du ruissellement des cours d'eau virtuels pour chaque intervalle de débit suivant est effectué consécutivement à partir de l'amont (voir la Figure II- (1)-11).

Structure et calcul du sol non-saturé et de l'eau souterraine

Pour le calcul du processus d'hydrologie de la surface terrestre, le sol non-saturé suit la structure de trois couches de la Biosphère Simple 2. La première couche est celle à partir de laquelle l'évaporation se produit directement, la deuxième est celle dans laquelle les racines de la végétation sont étendues, ce qui permet l'évapotranspiration de l'humidité du sol, et la troisième couche est celle qui se trouve au plus profond de la terre et qui est non-saturée. Il y a, en tant que mouvements de l'eau dans le sol non-saturé au niveau du processus d'hydrologie de pente, un courant de filtration dans le sens vertical et un écoulement latéral suivant la pente. L'écoulement latéral est calculé suivant la déclivité et le coefficient de filtration de chaque couche. Le courant de filtration dans le sens vertical est déduit par l'équation de Richards du mouvement vertical unidimensionnel de l'eau dans un sol non-saturé.

$$\frac{\partial \theta(z,t)}{\partial t} = - \frac{\partial q_v}{\partial z} + r(z,t) \quad (1)$$

Dans cette équation, t est le temps, z est la profondeur à partir de la surface du sol, $\theta(z,t)$ est la teneur volumétrique en eau, $r(z,t)$ est la quantité d'évapotranspiration, et q_v est le flux vertical d'eau dans le sol, qui est obtenu par l'équation suivante.

$$q_v = - K(\theta, z) \left[\frac{\partial \psi(\theta)}{\partial z} - 1 \right] \quad (2)$$

$K(\theta, z)$ est le coefficient de perméabilité, $\psi(\theta)$ est la succion capillaire. Pour permettre de résoudre la fonction implicite par la différentielle, la 2ème couche et la 3ème couche sont divisées encore davantage. Etant donné qu'il y a un échange d'eau entre les différentes couches du sol, la quantité de déplacement d'eau du sol non-saturé au sol saturé peut être obtenue.

La zone des eaux souterraines existe comme un réservoir d'eau au niveau des grilles et elle est reliée avec les cours d'eau. Cependant, on suppose que les eaux souterraines s'écoulent dans la direction de la déclivité et il n'y a pas d'écoulement des eaux souterraines entre les grilles.

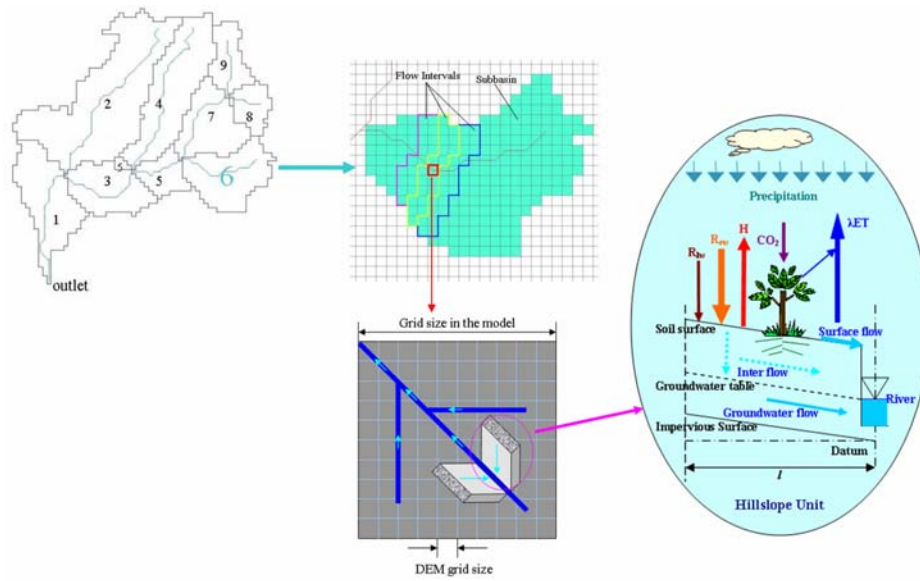


Figure II-(1)-10 Schéma de structure de WEB-DHM (Source : Wang et al, 2009)

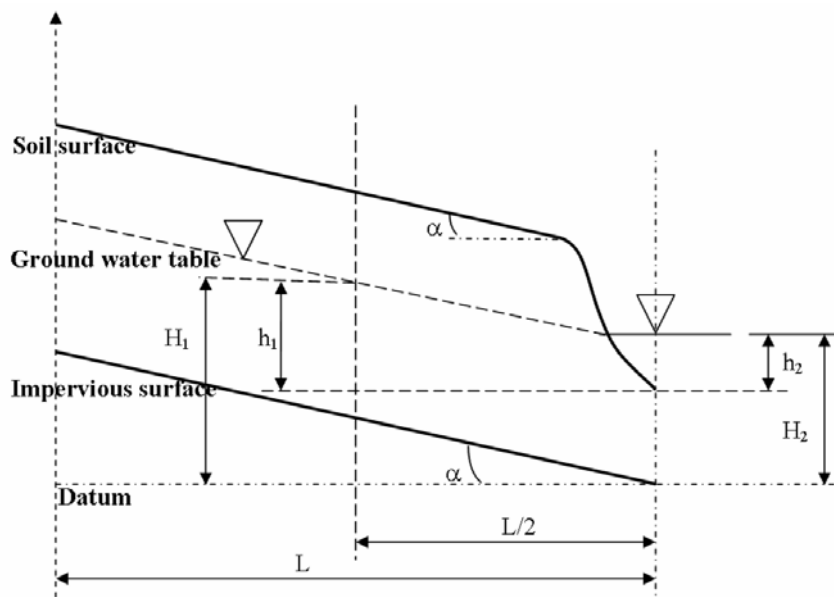


Figure II-(1)-11 Schéma d'Elément de Pente (Source : Yang et al, 2000)

La quantité d'échange d'eau entre la zone des eaux souterraines et la rivière peut être déduite par la théorie de la conservation de masse, ainsi que par la loi de Darcy qui est représentée par l'équation suivante.

$$q_G(t) = K_g \frac{H_1 - H_2}{l/2} \frac{h_1 + h_2}{2} \quad (3)$$

Dans cette équation, $q_G(t)$ est la quantité de déplacement d'eau entre la zone des eaux souterraines et la rivière par une unité de largeur, K_g est le coefficient de perméabilité de la nappe phréatique, $H_1 - H_2$ est la différence de charge hydraulique entre la zone des eaux souterraines et la rivière, l est la longueur de la pente, h_1 et h_2 sont respectivement le niveau d'eau de la zone des eaux souterraines et celui de la rivière (voir la Figure II-(1)-11). Dans la plupart des modèles de ruissellement, le sens du ruissellement de l'eau est uniquement dans le sens du lit de la rivière vers la zone des eaux souterraines, par contre, l'équation (3) représente d'une manière appropriée un écoulement doux et non confiné.

Données utilisées

Voici les données que nous avons utilisées pour la création et la vérification du modèle hydrologique distribué du bassin versant de la Medjerda.

- Débits du fleuve et précipitations : données obtenues via observations terrestres (données entre septembre 2002 et août 2003 à Bou Salem et Jendouba)
- Données atmosphériques : Données obtenues via les réanalyses à long terme (Projet japonais de réanalyse pour 25 ans (JRA25), <http://ds.data.jma.go.jp/gmd/jra/download/download-e.html>)
- Données topographiques : Données numériques topographiques : (hydro1k, <https://lta.cr.usgs.gov/HYDRO1K>)
- Données de végétations : Produits des analyses par les satellites (indice de surface foliaire (ISF) et absorption du rayonnement photosynthétiquement utilisable (RPU), <http://cliveg.bu.edu/modismisr/>)
- Utilisation des terrains: Produits des analyses par les satellites : Commission Géologique des Etats-Unis (USGS) http://eros.usgs.gov/#/Find_Data/Products_and_Data_Available/Land_Cover_Products
- Sol : Données numériques sur les sols (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO)), <http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show?id=14116>

b. Etalonnage du modèle hydrologique

Premièrement, nous avons vérifié la sensibilité par rapport au débit des rivières, aux paramètres (coefficient de perméabilité, porosité et coefficient d'anisotropie des couches du sol, capacité de stockage du sol) qui sont souvent utilisés pour l'étalonnage de Modèle Hydrologique Distribué, basé sur le budget d'eau et d'énergie (WEB-DHM). Il s'est avéré que le coefficient de perméabilité était le plus sensible dans ce bassin versant, nous avons procédé à l'étalonnage par le réglage du coefficient de perméabilité. Comme nous avons appris par l'analyse du résultat de la modélisation qu'il y a beaucoup d'échange d'eau entre le sol profond ou la zone des eaux souterraines et la rivière, nous avons minutieusement effectué le réglage du coefficient de perméabilité non seulement pour la couche de surface, mais aussi la rhizosphère

et le sol profond.

En plus, nous avons continué le réglage du paramètre à chaque sous-bassin préalablement divisé dans le modèle de manière à ce que le débit des rivières, obtenu par la modélisation, soit aussi proche que possible du débit des rivières, observé au niveau des points d'observation de Bou Salem et Jendouba. Plus particulièrement, nous avons fait attention à ce que les trois débits de crête, observés en Janvier 2003 à ces deux points d'observation soient reproduits correctement. Nous avons vérifié d'autres points d'observation du débit à part les deux points cités plus haut pour vérifier le bas-débit d'eau de chaque sous-bassin. Le résultat de l'étalonnage du modèle est montré dans les figures de II-(1)-12 à 15. De plus, les données utilisées dans les Figures II-(1)-12 à 15 sont indiquées dans les Annexes 1a à 1c.

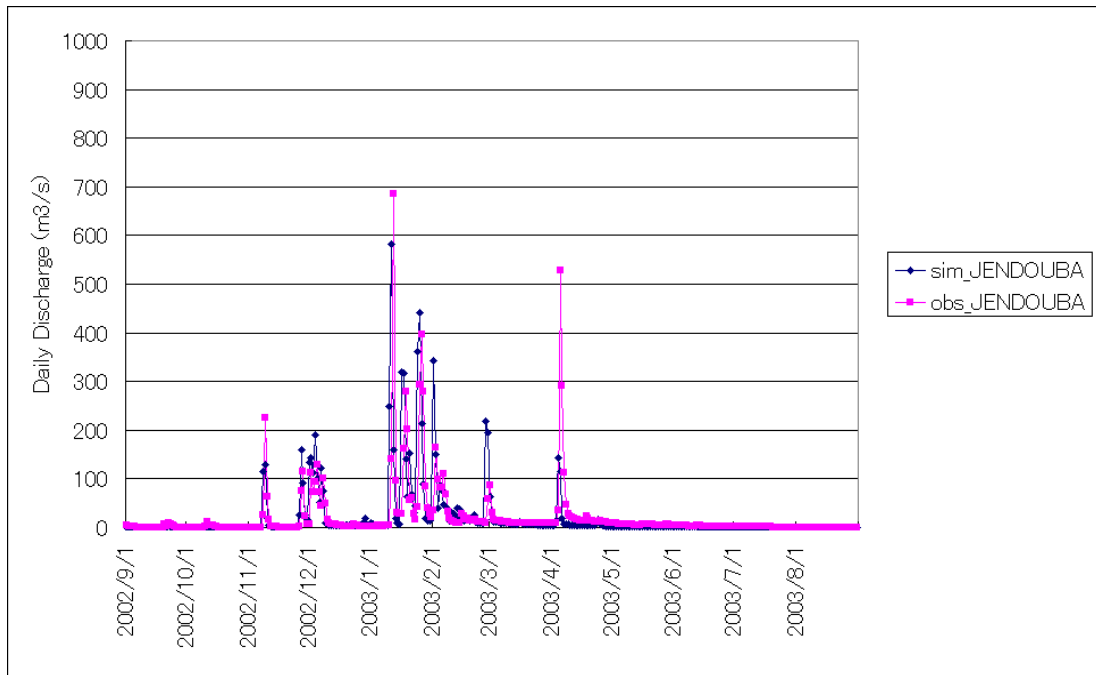


Figure II-(1)-12 Résultat de l'étalonnage au niveau de Jendouba (septembre 2002~août 2003)

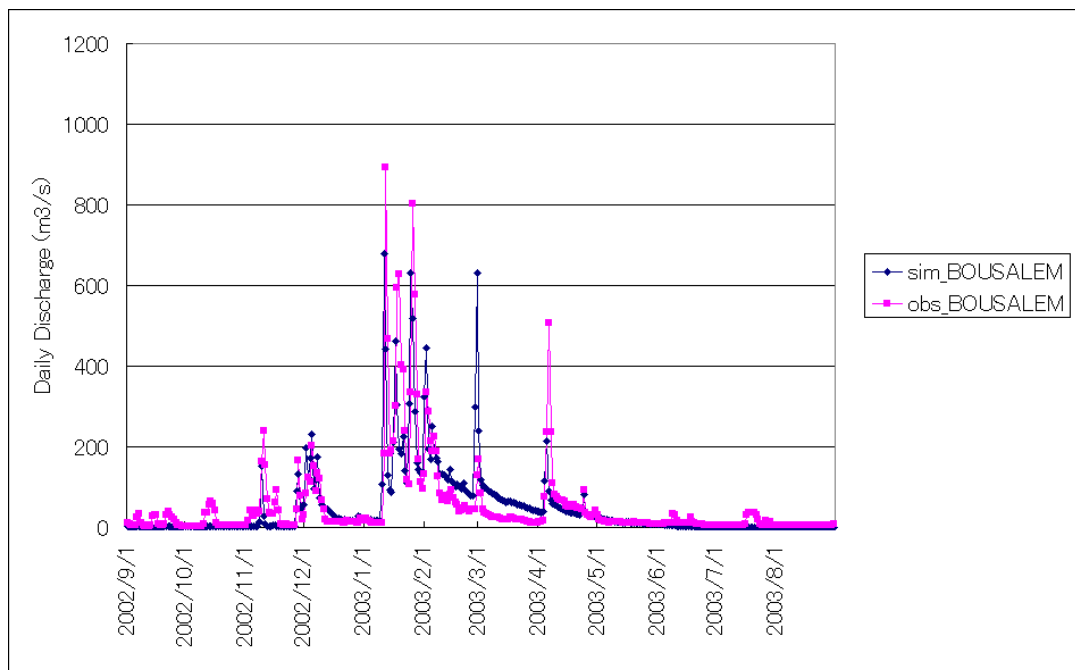


Figure II-(1)-13 Résultat de l'étalonnage au niveau de Bousalem (septembre 2002~août 2003)

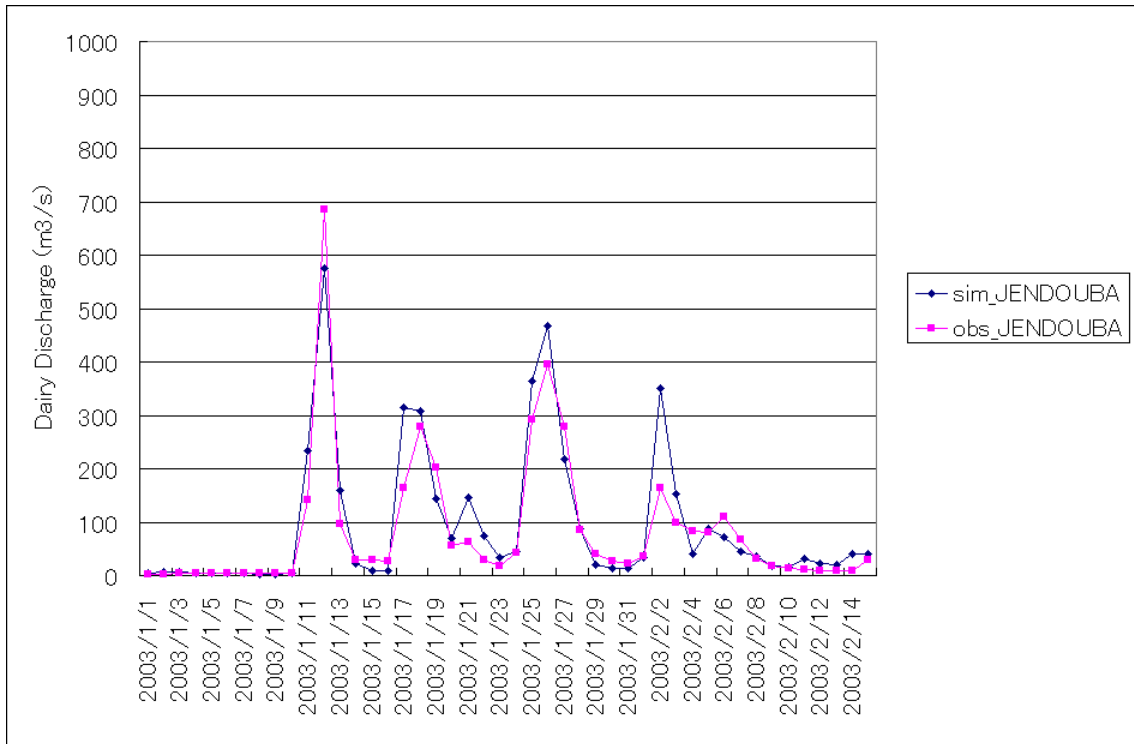


Figure II-(1)-14 Résultat de l'étalonnage au niveau de Jendouba (lors de l'inondation en janvier 2003)

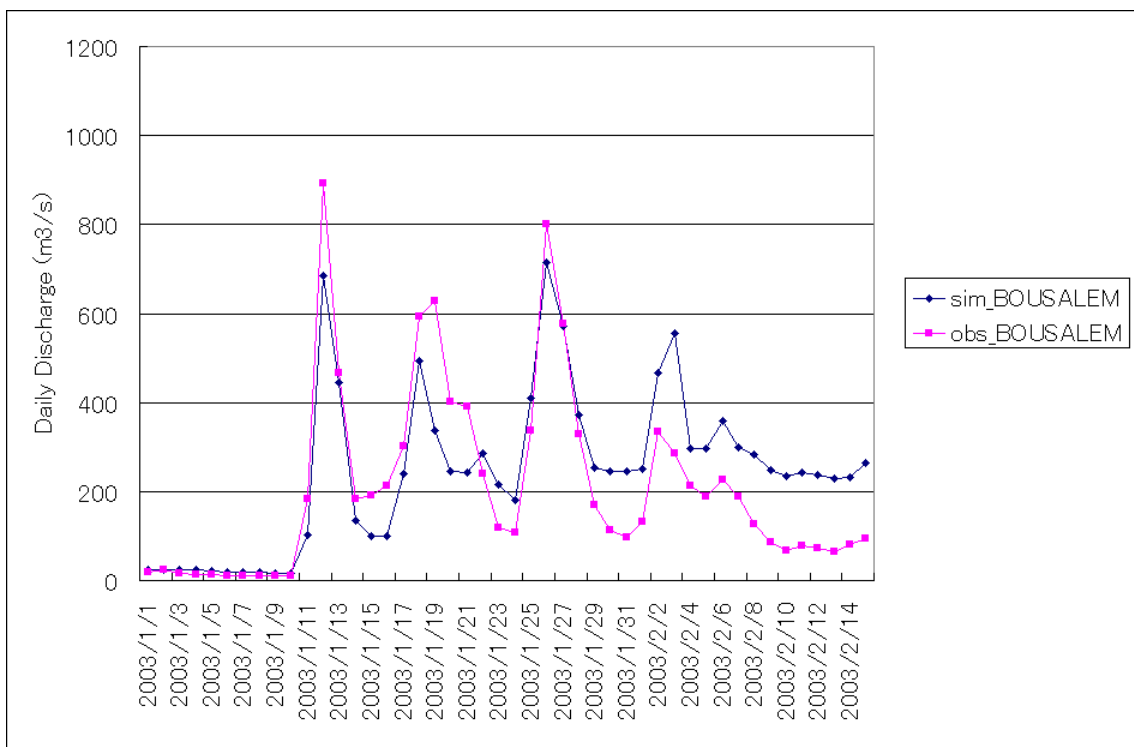


Figure II-(1)-15 Résultat de l'étalonnage au niveau de Bousalem (lors de l'inondation en janvier 2003)

c. Choix du régime de précipitations et du nombre de jours de pluies continues

Nous avons entré les précipitations maximales probables de la distribution spatio-temporelle des précipitations des 4 cas d'inondation dans le passé (mars 1973, mai 2000, janvier 2003, décembre 2003), qui ont été obtenues dans 1) -e, dans le Modèle Hydrologique Distribué, basé sur le budget d'eau et d'énergie (WEB-DHM) étalonné, pour faire la comparaison du débit de pointe de crue. La Figure II-(1)-16 qui représente le cas de 4 jours des pluies continues, montre que le régime de précipitations en mai 2000 constitue le débit de crête le plus important.

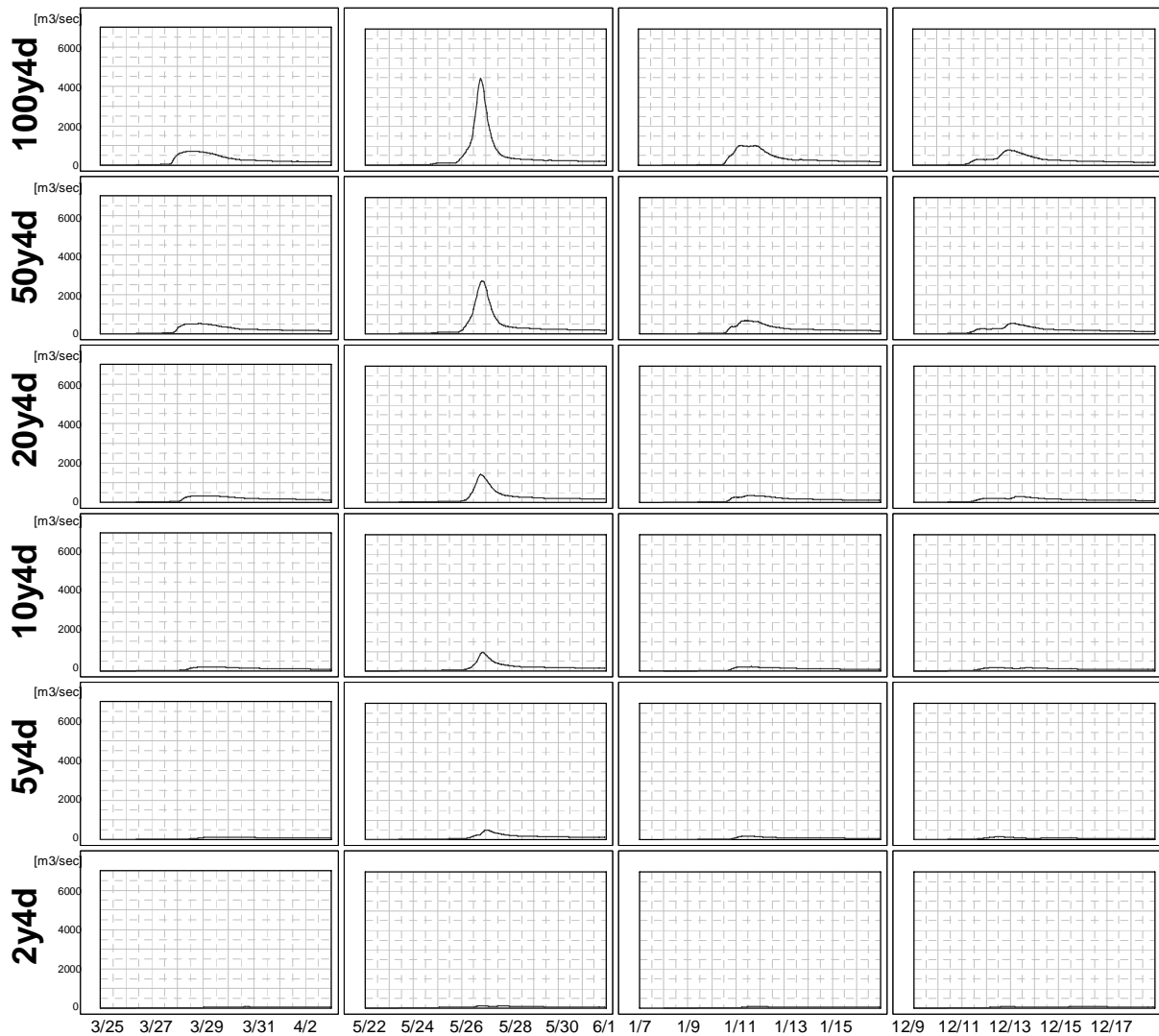


Figure II-(1)-16 Débit d'inondation au point d'observation de Sidi Salem (m³/sec) suivant le régime de précipitations des 4 cas d'inondation relatif à 4 jours de pluies continues (mars 1973, mai 2000, janvier et décembre 2003, respectivement de gauche à droite)

Ensuite, nous avons fait la comparaison du débit de pointe de crue au niveau du point d'observation du Barrage de Sidi Salem respectivement pour les cas de 4 jours de pluie continue et de 5 jours de pluie continue à l'aide du modèle de distribution spatio-temporelle de précipitations en mai 2000. D'après le résultat qui est montré dans la Figure II-(1)-17, nous avons appris que le débit de pointe de crue avec les précipitations de 4 jours de pluie continue est plus grand que l'autre.

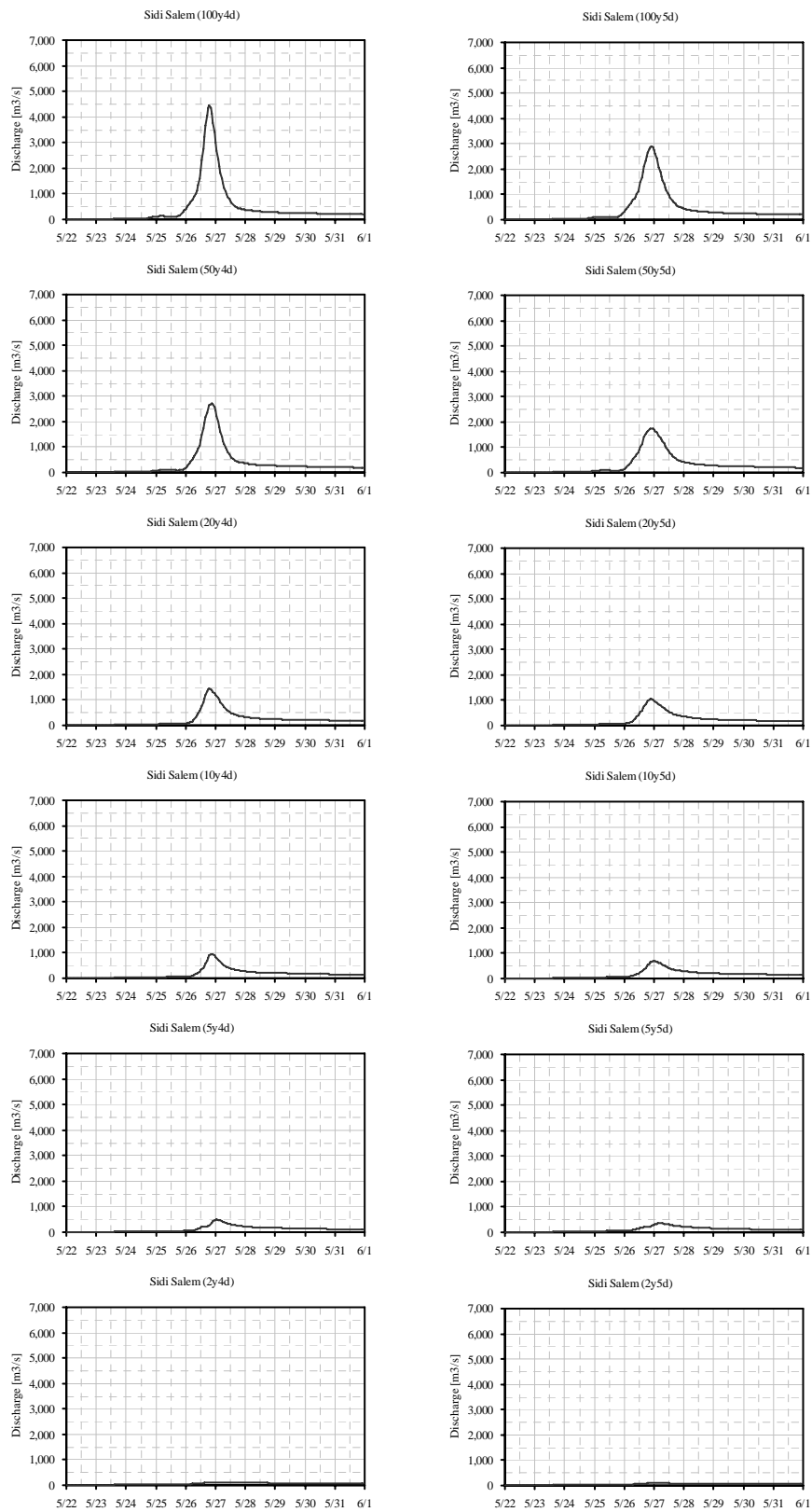


Figure II-(1)-17 Hydrographe du régime de précipitations du point du Barrage de Sidi Salem en mai 2000 (A gauche : 4 jours de pluies continues, A droite : 5 jours de pluie continue)

Nous avons établi sur la base du résultat de l'étude, le Tableau II-(1)-5 qui présente le débit de pointe de crue par rapport à chaque période de retour, estimé au moyen du modèle de distribution spatio-temporelle de précipitations en mai 2000 relatif à 4 jours de pluie continue qui donne le débit maximum de pointe de crue. Il constituera le principe de base pour le plan de gestion des inondations.

Tableau II-(1)-5 Débit de pointe de crue de chaque point par rapport à chaque période de retour (Voir la Figure I-(2)-2 concernant les noms des lieux et des rivières)

	Débit de crête			
	SidiSalem	Larrousia	Chafrou	Siliana
100y4d	4,463	5,707	347	1,547
50y4d	2,717	3,595	136	1,132
20y4d	1,438	1,959	40	650
10y4d	951	1,171	29	375
5y4d	494	552	15	181
2y4d	124	135	0	36

En outre, les états indiqués sur chaque point sont les suivantes :

Sidi Salem : le débit d'afflux d'eau dans le barrage de Sidi Salem

Larrousia : le débit d'afflux d'eau dans le barrage de Sidi Salem

Chafrou : le confluent du fleuve Chafrou et de la Medjerda

Siliana : le confluent du fleuve Siliana et de la Medjerda

2. Prédiction de la crue de conception

1) Considération de l'exploitation du Barrage de Sidi Salem

La crue de conception en aval du barrage de Sidi Salem sera évaluée en considération de la gestion efficace des réservoirs existants.

Suivant le principe de l'exploitation du barrage, lorsque le niveau d'eau atteint 116 m, les conduits de sortie qui se trouve au fond du barrage seront ouverts progressivement pendant 6 heures jusqu'à l'ouverture complète. Lorsque le niveau d'eau a baissé jusqu'à 115 m, les conduits seront fermés petit à petit pendant 2 heures. Par ailleurs, en ce qui concerne la probabilité de 10 ans, on peut aussi envisager un l'arrêt de l'ouverture de vanne un peu avant l'ouverture complète.

2) Crue de conception en aval du barrage en tenant compte de l'exploitation du barrage

La Figure II-(1)-18 montre le débit d'inondation en aval du barrage, estimé en tenant compte de l'effet de l'exploitation du barrage sur la base du débit de déversement /écoulement du barrage de Sidi Salem par rapport à chaque période de retour, ainsi que le débit d'écoulement du barrage de Sidi Salem.

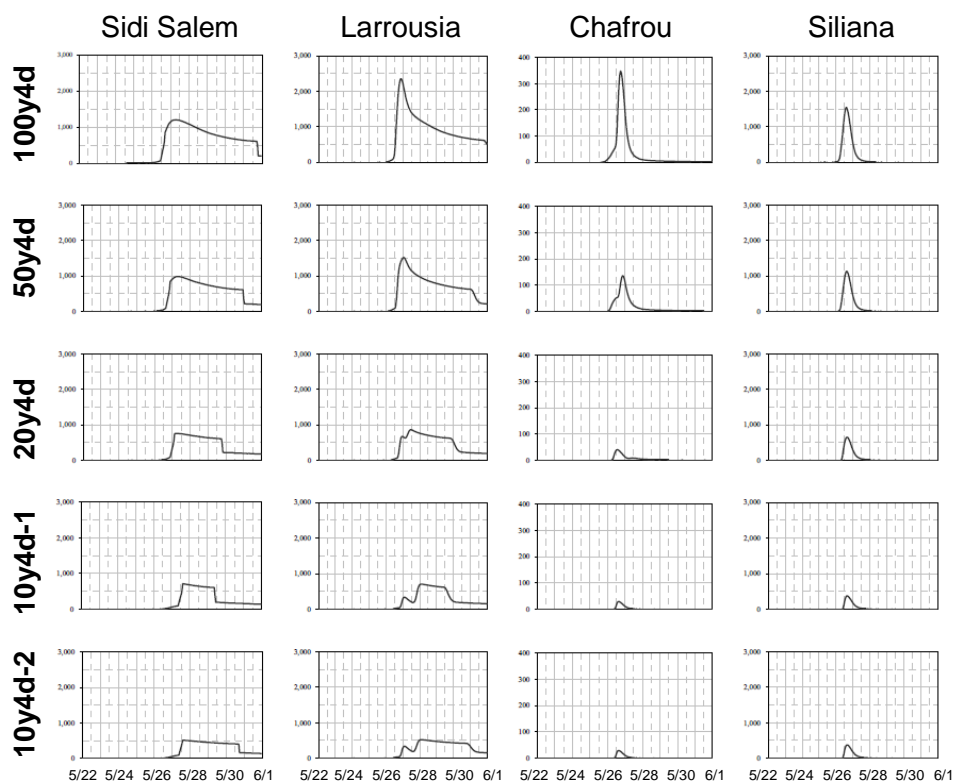


Figure II-(1)-18 Débit d'écoulement du barrage de Sidi Salem par rapport à chaque période de retour et débit d'inondation en aval du barrage (m³/sec) :

De gauche à droite : Sidi Salem, Larroussia, Chafrou, Siliana

Du haut en bas : 100y4d, 50y4d, 20y4d, 10y4d-1 (lorsque la valve est complètement ouverte) et 10y4d-2 (lorsque l'ouverture de la valve est inférieure à l'ouverture complète d'un degré)

Nous allons montrer la crue de conception par rapport à chaque période de retour à chaque point d'observation, estimée suivant cette étude, dans le Tableau II-(1)-6.

Tableau II-(1)-6 Crue de conception en aval du barrage de Sidi Salem par rapport à chaque période de retour
(Voir la figure I-(2)-3 concernant le nom des lieux et des rivières)

	Débit de crête			
	SidiSalem	Larrousia	Chafrou	Siliana
100y4d	1,202	2,361	347	1,547
50y4d	980	1,517	136	1,132
20y4d	754	859	40	650
10y4d-1	713	706	29	375
10y4d-2	516	522	29	375

(2) Analyse de l'Impact du Changement Climatique sur le Bassin-Versant de la Medjerda

Le cadre analytique du changement climatique est montré dans la figure II-(2)-1. Il y a cinq composants comme suit :

1. Sélection de scénarios d'émission du gaz à effet de serre
2. Sélection de modèles MCG
3. Correction de biais du résultat des modèles MCG
4. Évaluation du changement au niveau des précipitations
5. Évaluation des changements de crues de conception

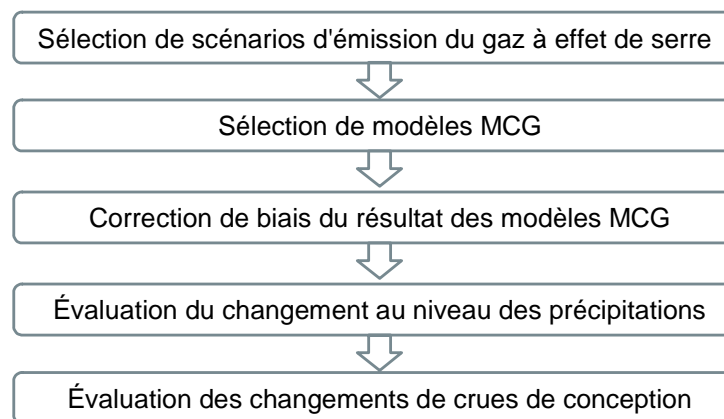


Figure II-(2)-1 Cadre analytique du changement climatique

1. Sélection de scénarios d'émission du gaz à effet de serre

Le Rapport Spécial sur les Scénarios d'Emission (RSSE), publié par le Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) en 2000, développe différents scénarios d'émission qui ont été utilisés pour prévoir des changements climatiques plausibles dans le futur, dans le cadre du 3^e Rapport d'Evaluation (TAR) et du 4^e Rapport d'Evaluation (AR4) du GIEC. Les scénarios d'émission présentent l'émission d'un gaz à effet de serre, d'un aérosol, et des autres polluants dans l'atmosphère, ainsi que d'autres informations sur l'occupation et l'utilisation du sol. Quatre séries de scénarios ont été développées (A1, A2, B1, B2). Chaque scénario présente le changement démographique, socio-économique, politique et technologique dans le futur. Le scénario GIEC A1B est utilisé pour cette étude. C'est un des scénarios du groupe A1 qui présente le monde dans le futur avec une croissance économique rapide, une démographie dont la croissance atteint le sommet au milieu du siècle et la décroissance commence après le sommet, et une introduction rapide des nouvelles technologies plus efficaces. Le scénario A1B prend en considération une équilibre de tous les sources (où « équilibré » signifie comme ne pas baser sur une source énergétique particulière, sur l'hypothèse qu'une

tendance d'amélioration similaire se produit pour l'approvisionnement de toutes les sources d'énergie et les technologies d'usager). Ce scénario est caractérisé par une faible croissance démographique, un taux de croissance très élevé du PIB, un changement très rapide en matière de l'utilisation d'énergie, une disponibilité des sources d'énergie intermédiaire et un changement technologique rapide et bien équilibré (GIEC RSSE, 2000)

2. Sélection de modèles MCG

La sélection de modèle MCG est basée sur l'aptitude des modèles MCG pour représenter le climat régionale dans la zone. Si un modèle MCG n'est pas capable de reproduire la climatologie actuelle d'une région étudiée, celui-ci ne doit pas être utilisé pour une étude plus poussée. La sélection du domaine est basée sur des phénomènes d'une large échelle synoptique. Les systèmes climatiques, uniques aux bassins versants, en même temps que la couverture spatiale, doivent être considérés.

Au niveau du bassin versant, les modèles MCG sélectionnés doivent avoir la capacité de reproduire la tendance saisonnière de précipitations. Une corrélation spatiale (Scorr) et une erreur quadratique moyenne (RMSE) ont été utilisées pour identifier des similitudes et des différences entre les modèles et l'ensemble des données globales utilisées actuellement (équations 4 et 5). Des données du Projet mondial de climatologie des précipitations (GPCP) ont été utilisées pour faire la comparaison de similitudes de précipitations mensuelles moyennes tandis que des données de « Japan Reanalysis data (JRA25) » ont été utilisées pour faire la comparaison d'autres variables météorologiques.

$$Scorr = r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1)S_x S_y} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_{si} - R_{obs})^2} \quad (5)$$

Pour évaluer l'aptitude des modèles MCG pour représenter des précipitations d'une petite échelle, une vérification supplémentaire doit être faite pour éliminer les modèles MCG les moins performants. Les trois critères additionnels doivent être utilisés pour ce faire :

- a) La moyenne des précipitations du bassin-versant (climatologie), obtenue par l'observation pour une longue durée doit être comparée avec les modèles MCG. Si un modèle MCG n'est pas apte à représenter la variabilité saisonnière, il doit être éliminé.
- b) Si un modèle MCG produit des précipitations trop faibles comme, par exemple, des jours secs existent invraisemblablement après la correction de jours sans pluies, il faut éliminer ce modèle.

c) A la fin, si la distribution des précipitations observées dans le bassin versant n'est pas uniforme, une considération sur la moyenne climatologique des sous-bassins (des zones avec des précipitations élevées, des précipitations moyennes, des faibles précipitations – en général, liées à l'altitude et l'utilisation du sol) doit être faite au moment de la comparaison pour la sélection de modèles MCG.

Une sélection de modèles MCG parmi les modèles disponibles dans la 3e phase du Projet d'Inter-comparaison de Modèles Couplés (CMIP3) est essentielle pour faire une analyse à multi-modèles. Les 7 paramètres ont été considérés pour sélectionner des modèles de MCG appropriés. Comme le montre le Tableau II-(2)-1, ces paramètres sont les suivants : précipitations, énergie sortante à ondes longues, température de la surface de la mer, pression au niveau de la mer, température atmosphérique, vent méridien et zonal.

Dans cette étude, nous avons utilisé les données du CMIP archivées sur le Système d'intégration et d'analyse des données (DIAS) ainsi que le logiciel intégré sur ce système relatif à l'évaluation, au choix et au téléchargement des modèles.

Tableau II-(2)-1 Les 7 paramètres utilisés pour le choix des modèles MCG ainsi que les saisons et étendues géographiques correspondantes

Paramètre	Saison Considérée	Echelle- Région	Echelle- Local
Précipitation	Hiver (Oct – Jan)		5°E- 15°E 25°N – 39°N
Energie sortante à ondes longues	Hiver (Oct – Jan)		5°E- 15°E 25°N – 39°N
Pression au niveau de la mer	Hiver (Oct – Jan)	30°O- 50°E 20°N – 50°N	
Vent méridien	Hiver(Oct – Jan)	30°O- 50°E 20°N – 50°N	
Vent zonal	Hiver (Oct – Jan)	30°O- 50°E 20°N – 50°N	
Température à la surface de la mer	Eté (Mai – Août)	30°O- 50°E 20°N – 50°N	
Température	Eté (Mai – Aoû) Hiver(Oct – Jan)		5°E- 15°E 25°N – 39°N

De plus, comme l'indique la Tableau II-(2)-2, la zone considérée concernant un paramètre météorologique (précipitations) d'une échelle locale se trouve entre 5°E et 15°E ; 25°N et 39°N. La zone considérée concernant des circulations d'une grande échelle et la zone au bord d'océan se trouve entre 30°W et 50°E ; 20°N et 50°N (Figure II-(2)-2).

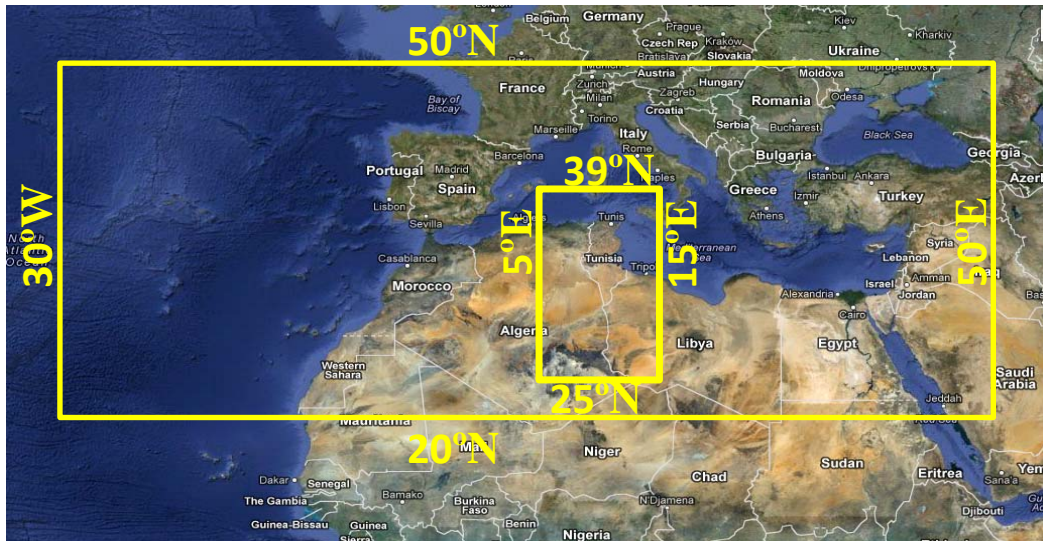


Figure II-(2)-2 Etendue utilisée pour le choix des modèles MCG

Pour chaque modèle MCG, si la valeur Scorr et la valeur RMSE sont toutes les deux au-dessus de la moyenne de tous les modèles MCG, le score accordé est 1 ; si uniquement l'une d'entre elles sont supérieure à la moyenne, le score accordé est 0. Nous avons appliqué ce système de score aux sept éléments et nous avons considéré que les modèles au score élevé ont une capacité de représentation performante et que ceux au score bas peuvent représenter moins bien. C'est ainsi que nous avons sélectionné les dix meilleurs modèles indiqués dans le Tableau II-(2)-2.

Tableau II-(2)-2 Score des modèles MCG et les dix meilleurs modèles

No	Classement des modèles MCG	5E-15E	5E-15E	30W-40E	30W-40E	30W-40E	30W-40E	5E-15E	5E-15E	Indice total
		25N-39N	25N-39N	20N-50N	20N-50N	20N-50N	20N-50N	25N-39N	25N-39N	
Nom du modèle		Précipitations	Rayonnement de grande longueur d'onde sortant	Pression au niveau de la mer	Température de la surface de la mer	Vent zonal	Vent méridional	Température de l'air	Température de l'air	
1	bccr_bcm2_0	1	1	0	1	1	1	1	1	7
2	cccma_cgcm3_1	1	1	0	1	1	1	0	1	6
3	ingv_echam4	0	0	1	1	1	1	0	1	5
4	miroc3_2_hires	1	0	1	0	1	0	1	1	5
5	mpi_echam5	0	0	1	1	1	1	1	0	5
6	ukmo_hadcm3	1	1	1	0	1	1	0	0	5
7	ukmo_hadgem1	-1	1	1	1	1	1	1	0	5
8	cccma_cgcm3_1_t63	1	0	0	0	1	1	0	0	3
9	gfdl_cm2_1	-1	1	1	1	0	0	0	1	3
10	mri_cgcm2_3_2a	0	1	1	1	1	0	0	-1	3
11	gfdl_cm2_0	1	0	0	-1	0	0	1	0	1
12	giss_model_e_r	0	1	0	-1	0	0	1	0	1
13	miroc3_2_medres	0	1	0	1	0	0	0	-1	1
14	cnrm_cm3	0	0	-1	-1	0	0	1	1	0
15	giss_model_e_h	0	1	-1	0	0	-1	0	1	0
16	miub_echo_g	1	0	0	-1	0	0	0	0	0
17	ncar_ccsm3_0	0	1	-1	-1	0	0	0	1	0
18	csiro_mk3_5	-1	-1	-1	1	0	0	1	0	-1
19	csiro_mk3_0	-1	0	-1	0	1	0	-1	-1	-3
20	giss_aom	-1	0	-1	0	-1	-1	0	1	-3
21	inmcm3_0	-1	0	-1	0	-1	-1	0	1	-3
22	ipsl_cm4	0	0	-1	0	0	-1	0	-1	-3
23	ncar_pcm1	0	0	-1	0	-1	-1	0	-1	-4
24	iap_fgoals1_0_g	0	0	-1	-1	-1	-1	0	-1	-5

Parmi les 10 meilleurs modèles sélectionnés à l'aide des 7 paramètres indiqués sur le Tableau II-(2)-2, deux d'entre eux, c'est-à-dire ceux de ukmo_hadgem1 et de gfdl_cm2_1, ont été éliminés en raison de leur mauvaise capacité d'exprimer les précipitations pendant la saison pluvieuse comme indiquée sur le Tableau II-(2)-3. De plus, à cause des résultats incomplets des modèles, bccr_bcm20 et ukmo_hadcm3 ont également été éliminés.

Tableau II-(2)-3 Scores sur les précipitations pendant la saison pluvieuse

5E-15E & 25N-39N	Octobre		Novembre		Décembre		Janvier		Moyenne des 4 mois		Indice S corr	Indice RMSE	Indice total pour précipitations	
	S corr	RMSE	S corr	RMSE	S corr	RMSE	S corr	RMSE	S corr	RMSE				
1	bccr_bcm2_0	0.96872	0.24326	0.96444	0.37114	0.90929	0.51771	0.86463	0.57791	0.92677	0.42751	1	1	1
2	cccma_cgcm3_1	0.96676	0.20113	0.95024	0.38398	0.92669	0.36117	0.90249	0.34868	0.93654	0.32374	1	1	1
3	cccma_cgcm3_1_t63	0.96752	0.21654	0.96038	0.28705	0.94855	0.35204	0.90318	0.36220	0.94491	0.30446	1	1	1
4	cnrm_cm3	0.86434	0.38458	0.93630	0.51278	0.90315	0.63841	0.84625	0.59826	0.88751	0.53351	0	1	0
5	csiro_mk3_0	0.92652	0.46213	0.90261	0.68082	0.83501	0.66315	0.76123	0.70590	0.85634	0.62800	0	0	-1
6	csiro_mk3_5	0.88431	0.63161	0.85477	0.78266	0.79394	0.70339	0.69582	0.73681	0.80721	0.71362	0	0	-1
7	gfdl_cm2_0	0.94633	0.25597	0.96329	0.34793	0.89737	0.56844	0.85395	0.48881	0.91523	0.41529	1	1	1
8	gfdl_cm2_1	0.89816	0.53141	0.92648	0.73926	0.86869	0.78988	0.77901	0.66621	0.86809	0.66169	0	0	-1
9	giss_aom	0.90472	0.41939	0.90955	0.67065	0.90570	0.63434	0.85113	0.64247	0.89277	0.59171	0	0	-1
10	giss_model_e_h	0.84383	0.59150	0.92515	0.42553	0.89620	0.42831	0.85166	0.43900	0.87921	0.47108	0	1	0
11	giss_model_e_r	0.84700	0.67726	0.88605	0.47348	0.90930	0.39966	0.88084	0.40831	0.88080	0.48968	0	1	0
12	iap_fgoals1_0_g	0.95457	0.57582	0.92503	0.65602	0.90999	0.61532	0.87582	0.63443	0.91635	0.62040	1	0	0
13	ingv_echam4	0.92901	0.55898	0.95203	0.55458	0.92246	0.68930	0.90557	0.59483	0.92727	0.59942	1	0	0
14	inmcm3_0	0.94487	0.59185	0.85366	0.96564	0.88449	0.83999	0.86181	0.72202	0.88621	0.77988	0	0	-1
15	ipsl_cm4	0.91660	0.69832	0.87238	1.00189	0.91362	0.92208	0.91169	0.74262	0.90357	0.84123	1	0	0
16	miroc3_2_hires	0.88981	0.49489	0.97874	0.21243	0.96324	0.28352	0.95752	0.28595	0.94733	0.31920	1	1	1
17	miroc3_2_medres	0.90762	0.37245	0.94492	0.58999	0.90741	0.70287	0.85413	0.67707	0.90352	0.58560	1	0	0
18	miub_echo_g	0.93605	0.33656	0.94933	0.37966	0.92565	0.55765	0.89445	0.59252	0.92637	0.46660	1	1	1
19	mpi_echam5	0.90883	0.40746	0.93518	0.51303	0.89236	0.68530	0.79993	0.57378	0.88407	0.54489	0	1	0
20	mri_cgcm2_3_2a	0.91446	0.49038	0.93822	0.65917	0.92151	0.79298	0.84277	0.56982	0.90424	0.62809	1	0	0
21	ncar_ccsm3_0	0.93857	0.37967	0.94462	0.62965	0.91634	0.66505	0.89861	0.61401	0.92454	0.57210	1	0	0
22	ncar_pcm1	0.96076	0.25267	0.94725	0.69616	0.91448	0.72700	0.88475	0.63744	0.92681	0.57832	1	0	0
23	ukmo_hadcm3	0.97537	0.31166	0.97109	0.27328	0.94985	0.41353	0.89013	0.44396	0.94661	0.36061	1	1	1
24	ukmo_hadgem1	0.82952	0.75825	0.87507	0.74760	0.87166	0.51806	0.86614	0.50082	0.88560	0.63118	0	0	-1

Finalement, 6 modèles ont été retenus pour cette étude. Il s'agit des modèles suivants : ccma_chcm31, cccma_chcm31_t63, miroc3_2_hires, mpi_echam5, mri_cgcm23_2 et

ingv_echam4. La Figure II-(2)-3 montre la similitude des modèles sélectionnés avec ceux de GPCP en matière de la distribution spatiale de précipitations dans la région pendant la saison pluvieuse entre octobre et janvier. On peut voir que les six modèles sélectionnés montrent bien des distributions similaires à celle du GPCP.

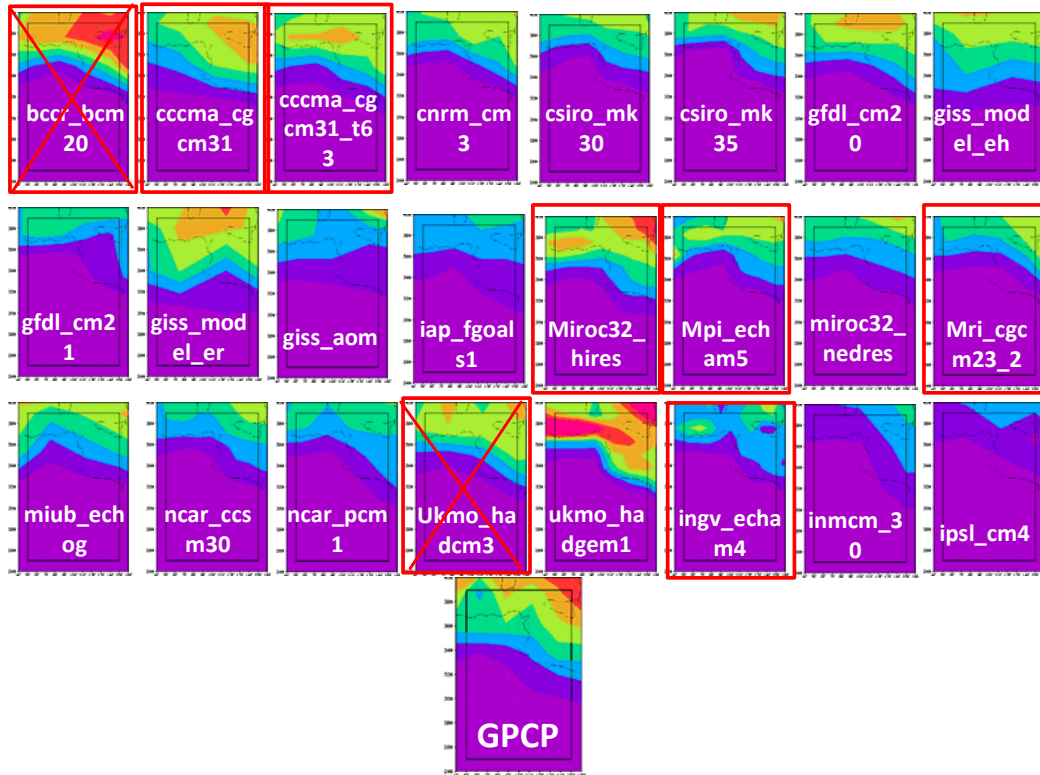


Figure II-(2)-3 Distributions spatiales des précipitations moyennes entre octobre et janvier indiquées par les 24 modèles MCG ainsi que la distribution pour le GPCP

3. Correction de biais du résultat des modèles MCG

Les résultats des modèles MCG en matière des précipitations ne peuvent pas être utilisés directement pour appliquer à des modèles hydrologiques ou à d'autres modèles d'évaluation d'impact sans faire préalablement une correction de biais pour qu'un résultat soit vraisemblable (Ines et Hansen, 2006, Feddersen et Andersen, 2005, Sharma et autres, 2007). S'ils sont utilisés directement, le résultat peut être erroné à cause de ces biais. Donc, il est nécessaire de corriger les biais avant l'utilisation des résultats de modèles MCG.

Pour utiliser des résultats de scénario de modèles MCG dans une étude hydrologique, une réduction d'échelle appropriée est nécessaire. Il y a deux méthodes de réduction d'échelle disponibles : méthodes statistique et dynamique. Une réduction d'échelle dynamique nécessite l'utilisation de modèles de prévision météorologique numérique de fine résolution avec des données de sortie de modèles MCG comme conditions initiales et de limite. Une réduction

d'échelle statistique nécessite l'utilisation de relations statistiques pour convertir les prévisions de grande échelle d'un modèle MCG à celles de résolutions spatiales plus fines. Cette partie du rapport explique des étapes nécessaires pour réaliser une approche statistique simplifiée sur la base de statistique.

Pour faire rationnellement une correction de biais en matière des précipitations d'une manière adéquate, il faut séparer les jours sans pluies, les jours de pluies normales et les jours de fortes pluies. A cause de l'impossibilité d'incorporer un système de paramétrage de cumulus dans les simulations, des données de sortie de modèles MCG sont caractérisées par beaucoup de jours humides (avec beaucoup de crachin) et leur incapacité de représenter des événements extrêmes et des variations saisonnières de précipitations. C'est pourquoi il est nécessaire de séparer ces trois différents types de pluies. Pour étudier un bassin versant avec une nette distinction saisonnière (exemple : saisons très sèche et très humide), une correction de biais doit être réalisée séparément pour ces deux saisons. Elle est faite normalement mensuellement ou bimensuellement en fonction du type de climat du bassin-versant.

Le processus de correction de biais par cette approche est constitué par trois étapes : à savoir, une correction pour jours secs, jours de pluies normales et de pluies extrêmes (Nyunt et autres, 2012), comme indiqué sur la Figure II-(2)-4.


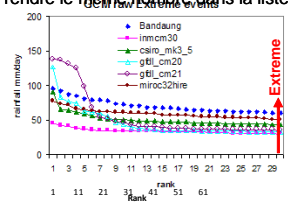
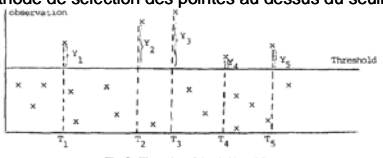

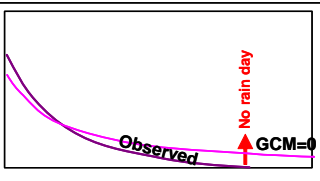

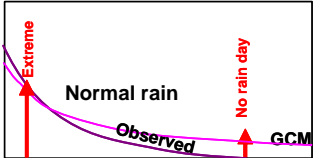
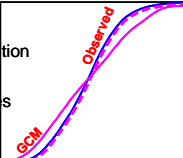
Type de pluies	Seuil	Correction
Evènement Extrême 	<ul style="list-style-type: none"> - Supérieur au minimum de max. annuel observé - compter le nombre de cas extrême aux stations (Ex. 30 premières dans la liste des extrêmes) - Prendre le même nombre dans la liste de MCG 	Distribution Pareto Généralisée <ul style="list-style-type: none"> -Statistique des années discontinues -Correspondant aux extrêmes (queue longue ou courte) -Methode de sélection des pointes au dessus du seuil  <p>Fig. 2. Illustration of threshold model.</p>
Jour sans pluies 		Statistique de classement <ul style="list-style-type: none"> - même fréquence des jours sans pluie de MCGs que celle observée - Valeur inférieure au seuil du jour sans pluie considérée comme zéro.
Pluies Normales 		Distribution Gamma <ul style="list-style-type: none"> -FDC mensuelle de MCG reportée sur FDC mensuelle de station -inverse de FDC Gamma de chaque mois est les pluies corrigées 

Figure II-(2)-4 Trois méthodes de correction de biais : jours secs, jours de pluies normales et jours de pluies extrêmes

ETAPE 1: Correction de pluies extrêmes

La plupart des modèles MCG sous-estiment les pluies extrêmes par rapport à des

observations. Pour corriger ce défaut, une correction appropriée doit être appliquée pour adapter les valeurs de modèles MCG à la distribution des valeurs observées.

D'abord, nous avons noté une valeur de précipitations annuelles maximales pour chaque année dans l'ensemble des données et sélectionné la plus petite valeur parmi elles pour la considérer comme le seuil des événements extrêmes dans l'observation. Ensuite, nous avons considéré les valeurs supérieures à ce seuil comme événement extrême et déterminé le nombre d'événements extrêmes à partir de plusieurs stations d'observation. A la fin, nous avons pris le même nombre d'événements extrêmes à partir du classement de modèles MCG dans le passé. Nous avons inclus les valeurs supérieures à ce seuil dans les données comme Distribution de Pareto Généralisée (GPD).

$$F(x) = 1 - \left[1 - \frac{\kappa(x - \xi)}{\alpha} \right]^{1/\kappa} \quad (6)$$

Ici, α est le paramètre d'échelle et κ est le paramètre de forme. Ils peuvent être calculés à l'aide des équations suivantes via la méthode de moments.

$$\alpha = \frac{1}{2} \mu \left(\frac{\mu^2}{\sigma^2} + 1 \right) \quad (7)$$

$$\kappa = \frac{1}{2} \left(\frac{\mu^2}{\sigma^2} - 1 \right) \quad (8)$$

Ici, μ est la valeur moyenne des échantillons et σ^2 correspond à la distribution des échantillons. ξ est un paramètre local et nous avons estimé sa valeur en effectuant une analyse de sensibilité sur le paramètre local κ et en utilisant une valeur de limite qui reste stable.

L'intensité des précipitations X_T par rapport à une certaine période de retour T après la correction de biais peut être calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$X_T = \xi + \frac{\alpha}{\kappa} \left[1 - (\lambda T)^{-\kappa} \right] \quad (9)$$

ETAPE 2: Correction de jour sans pluie

Un des caractères communs de tous les modèles MCG est le nombre invraisemblablement élevé de jours humides. La plupart de ces jours sont représentés comme ceux de crachin. C'est à cause de l'insuffisance du paramétrage des modèles MCG. Pour corriger ce défaut, la méthode suivante est utilisée.

- a) Classer les valeurs d'observation dans le passé et celles obtenues par un modèle MCG en ordre décroissant.
- b) Déterminer 0 mm/jour comme un seuil pour considérer un jour sans pluies dans une observation. Tout en comparant le classement de l'observation avec celui du modèle

MCG, vérifier la valeur dans le classement du modèle MCG correspondante à ce classement du seuil. Cette valeur est considérée comme jour sans pluies.

- c) Toutes valeurs égales ou inférieures à ce classement dans le modèle MCG sont considérées comme zéro.
- d) Une correction de biais relatif aux jours sans pluies des modèles MCG dans le futur est basée sur ce seuil de modèles MCG dans le passé.

ETAPE 3: Correction de pluies normales

Les pluies normales se trouvent entre les précipitations zéro et les précipitations extrêmes. Une correction de pluies normales est basée sur la fonction de distribution gamma indiquée comme équation (10) qui est adaptée à des observations et des modèles MCG dans le passé. L'équation suivante a été adoptée :

$$F(x; \alpha, \beta) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{x}{\beta}\right); x \geq 0 \quad (10)$$

Ici, α et β sont respectivement des paramètres de forme et d'échelle.

L'inverse de la distribution gamma pour les précipitations observées dans le passé est utilisé pour corriger des biais de modèle MCG en matière de précipitations dans le passé. Ceci est utilisé comme une fonction de transfert pour la correction de biais de modèle MCG en matière de précipitations dans le futur.

Une réduction d'échelle spatiale a été faite par une correction des biais de toutes les données de précipitations d'observation de 44 stations indiquées sur la Figure II-(2)-5. Après la correction de biais des résultats de modèle MCG, une méthode de proportion inverse par rapport au carré de distance est utilisée pour obtenir une carte de distribution des résultats de modèles MCG après correction de biais sous forme de grille.

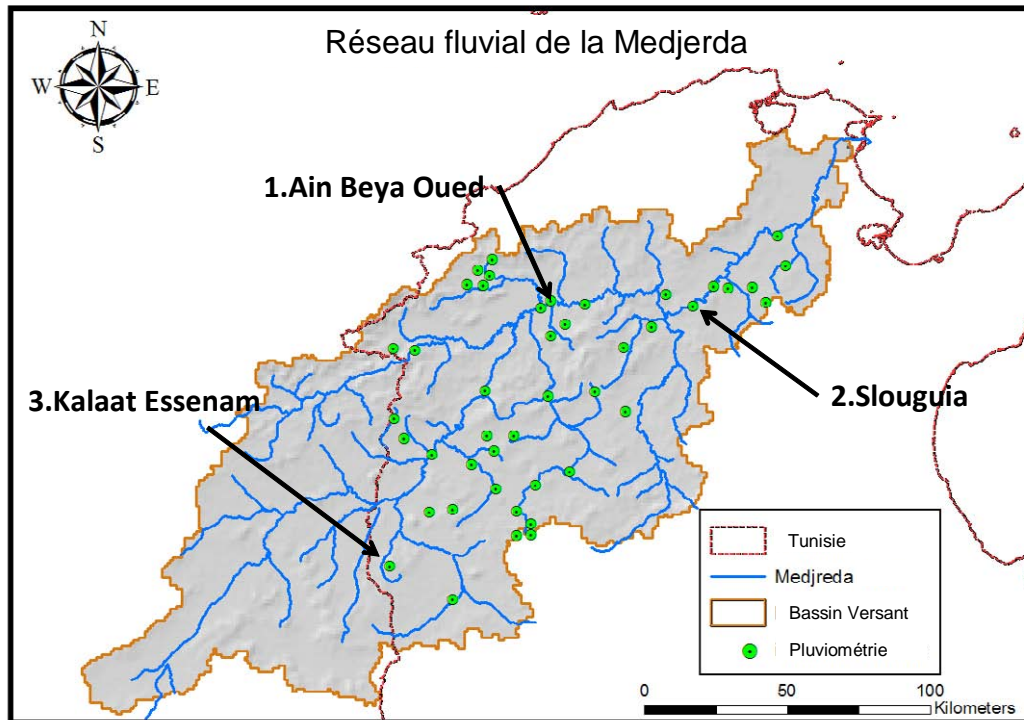


Figure II-(2)-5 Distribution des pluviomètres sur le bassin de la Medjerda

Les Figures II-(2)-6, 7 et 8 montrent les précipitations moyennes mensuelles ainsi que les résultats de la statistique d'ordre des précipitations journalières entre 1981 et 2000 utilisant les 70 précipitations quotidiennes les plus importantes avant et après la correction de biais à Ain Beya Oued, situé au milieu du bassin où les précipitations ont été les plus importantes, ainsi qu'à Slouguia, une région sèche située plus en aval et à Kalaat Essesnam, qui se trouve en amont du bassin.

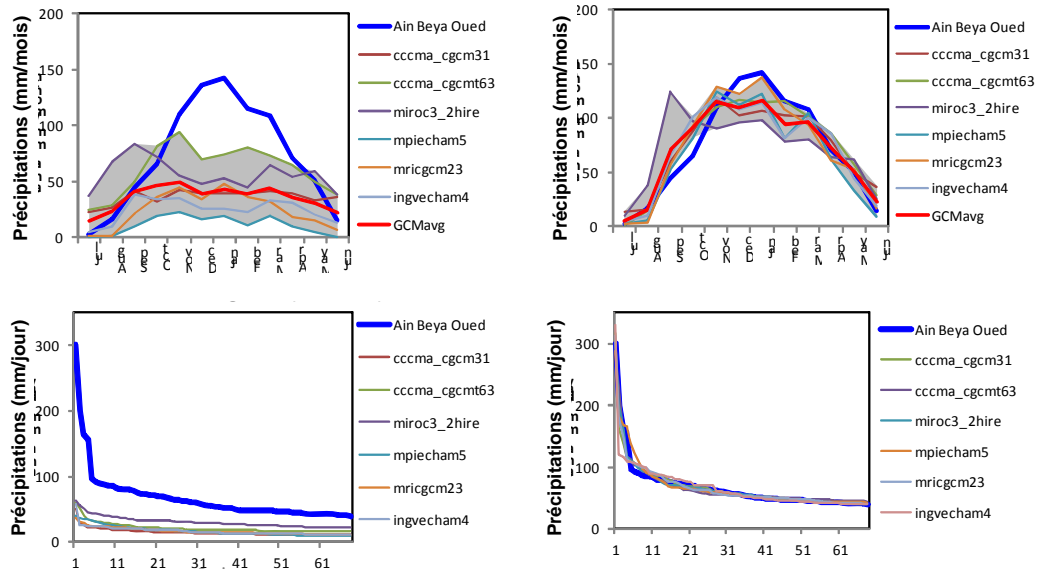


Figure II-(2)-6 Les précipitations mensuelles moyennes (en haut) ainsi que les précipitations lors des 70 pluies diluviennes les plus importantes (en bas) avant (gauche) et après (droite) la correction de biais à la station d'observation d'Ain Beya Oued

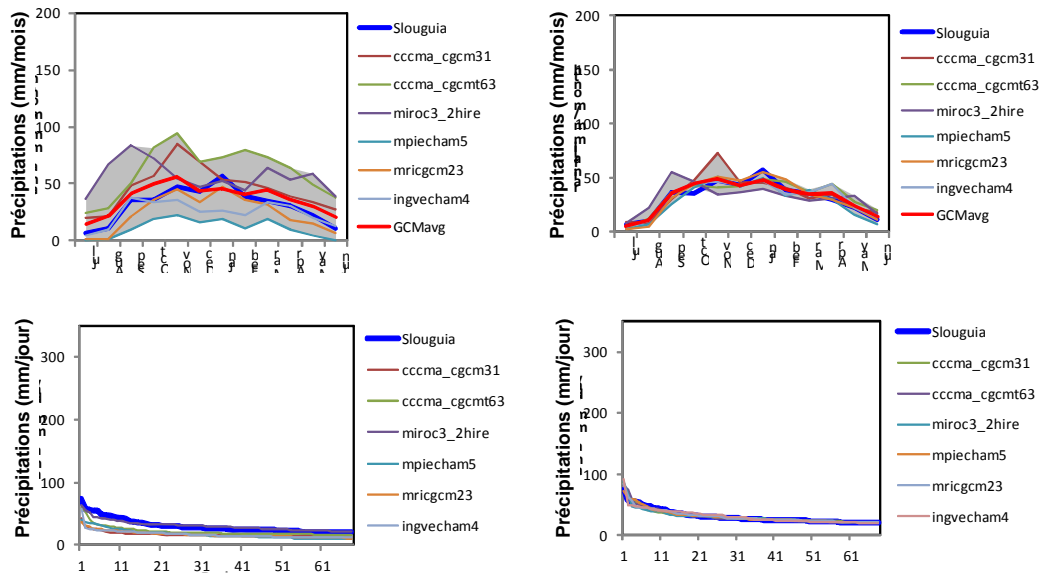


Figure II-(2)-7 Les précipitations mensuelles moyennes (en haut) ainsi que les précipitations des 70 pluies diluviennes les plus importantes (en bas) avant (gauche) et après (droite) la correction de biais à la station d'observation de Slouguia

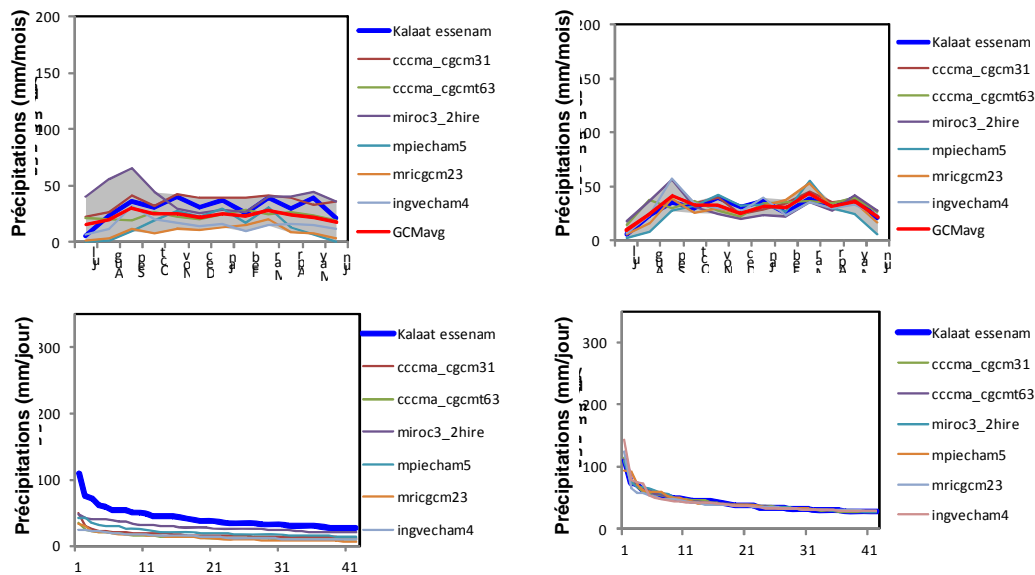


Figure II-(2)-8 Les précipitations mensuelles moyennes (en haut) ainsi que les précipitations des 70 pluies diluviennes les plus importantes (en bas) avant (gauche) et après (droite) la correction de biais à la station d'observation de Kalaat Essenam

Concernant les précipitations extrêmes, il a été établi que les résultats du modèle après la correction de biais correspondent bien aux périodes de retour calculées à l'aide des précipitations observées comme le montre la Figure II-(2)-9.

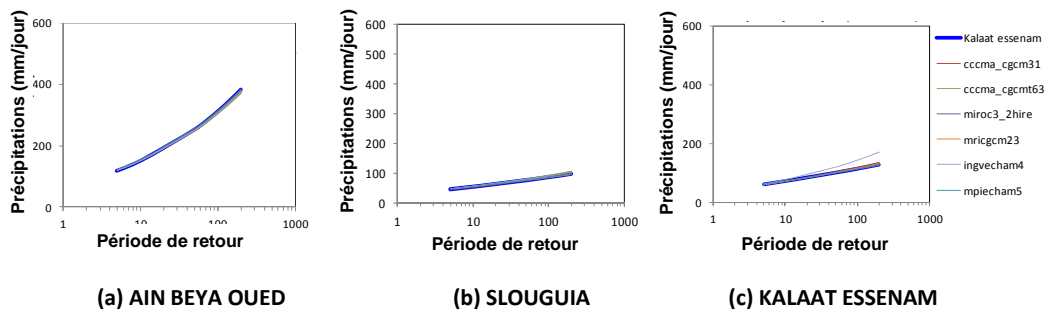


Figure II-(2)-9 Comparaison entre les modèles MCG après la correction de biais pour les précipitations extrêmes et les précipitations observées

Les Figures II-(2)-10a et 10b montrent la distribution spatiale des précipitations mensuelles moyennes sur le bassin avant et après la correction de biais à travers les modèles MCG Cccmacgcm31, Cccmacgcm63, Miroc32_hires, Mpiecham5, Mricgcm23 et ingv_echam4 en comparaison avec la distribution de précipitations mensuelles moyennes obtenue à partir des données pluviométriques des points d'observation de l'intérieur du bassin. Ces schémas montrent bien que le biais de chaque modèle a été corrigé de façon adéquate.

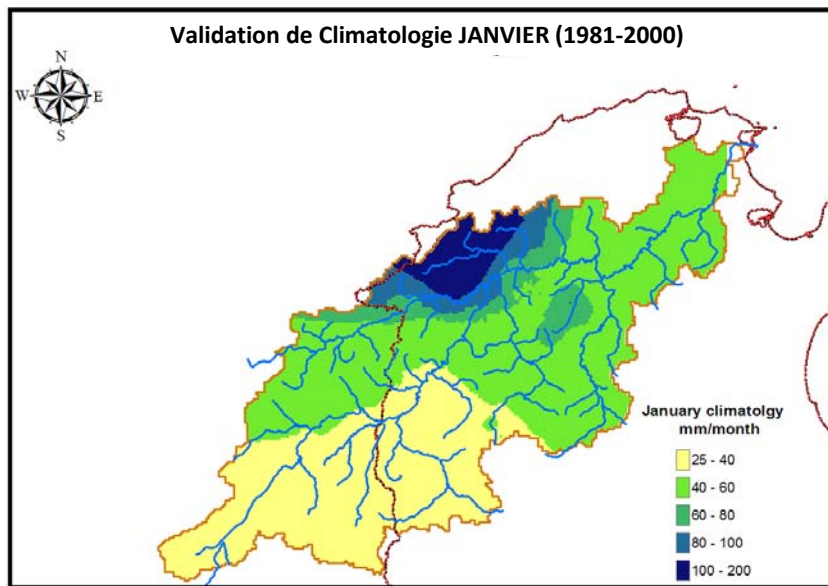


Figure II-(2)-10(a) Distribution des précipitations mensuelles moyennes de l'intérieur du bassin pour la période de 1981 à janvier 2000 obtenue à partir des données pluviométriques des stations d'observation de l'intérieur du bassin

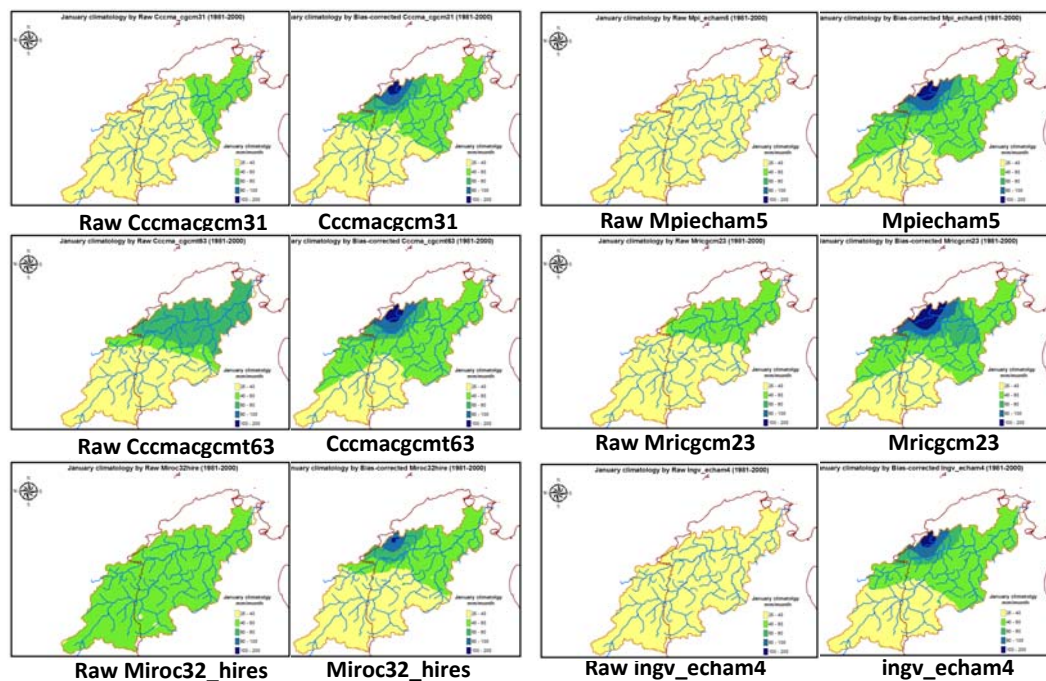


Figure II-(2)-10(b) Distribution des précipitations mensuelles moyennes de l'intérieur du bassin pour la période de 1981 à janvier 2000 avant (gauche) et après (droite) la correction de biais obtenue à l'aide des modèles MCG Cccmacgcm31, Cccmacgcm63, Miroc32_hires, Mpiecham5, Mricgcm23 et ingv_echam4

4. Evaluation du changement des précipitations

Les Figures II-(2)-11, 12, 13, 14 et 15 montrent bien la comparaison entre le passé et le futur concernant les précipitations annuelles, le nombre de jours sans pluie, les précipitations saisonnières et le nombre maximal de jours consécutifs sans pluie pendant l'année sur les trois points d'observation. Comme indiqué sur ces figures, tous les modèles sélectionnés montrent une tendance sans exception vers le climat plus sec.

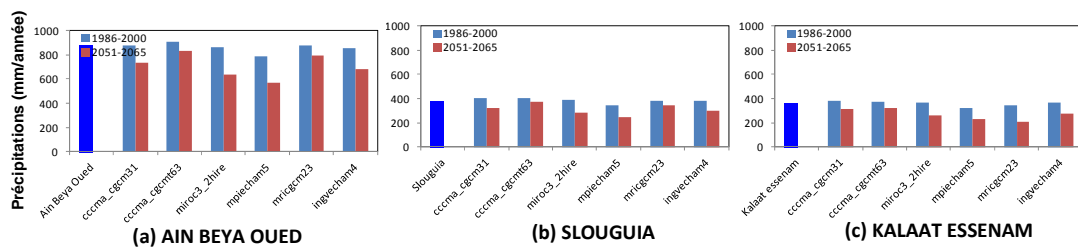


Figure II-(2)-11 Comparaison entre le passé (bleu clair) et le futur (rouge) sur les précipitations annuelles moyennes

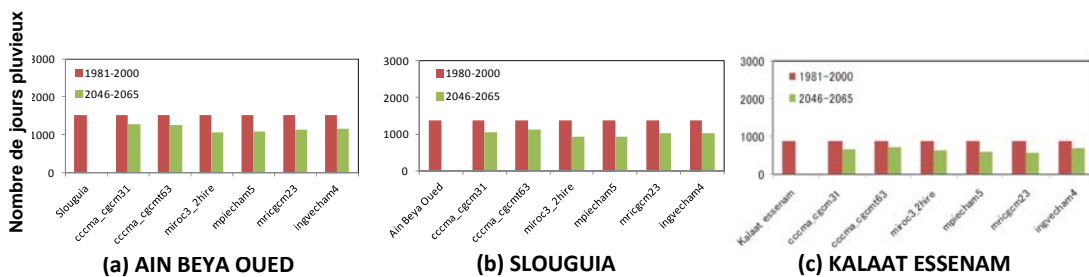


Figure II-(2)-12 Nombre de jours de pluie dans le passé après la correction (rouge) ainsi que celui du futur après la correction (vert jaunâtre)

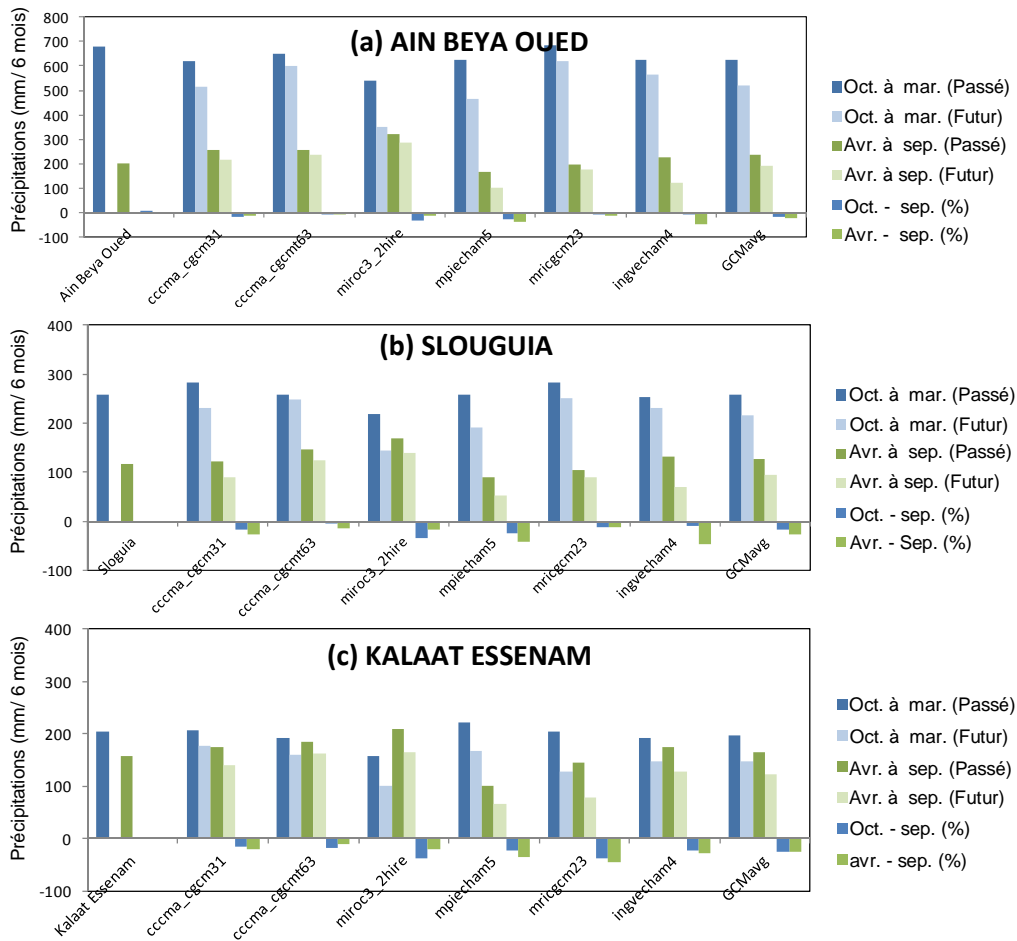


Figure II-(2)-13 Evolution des précipitations saisonnières (mm) (le bleu indique saison pluvieuse dans le passé (octobre-mars), le bleu clair indique la saison pluvieuse dans le futur (octobre-mars), le vert jaunâtre correspond à la saison sèche dans le passé (avril-septembre) et finalement, le vert jaunâtre clair désigne la saison sèche dans le futur (avril-septembre)). Au surplus, les valeurs négatives en bleu et en vert montrent la différence entre la valeur du futur et celle du passé, respectivement pour la saison pluvieuse et la saison sèche.

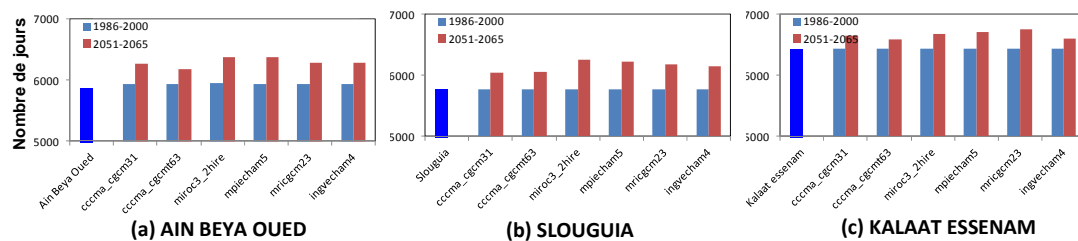


Figure II-(2)-14 Comparaison entre le passé (bleu clair) et le futur (rouge) sur les jours sans pluie

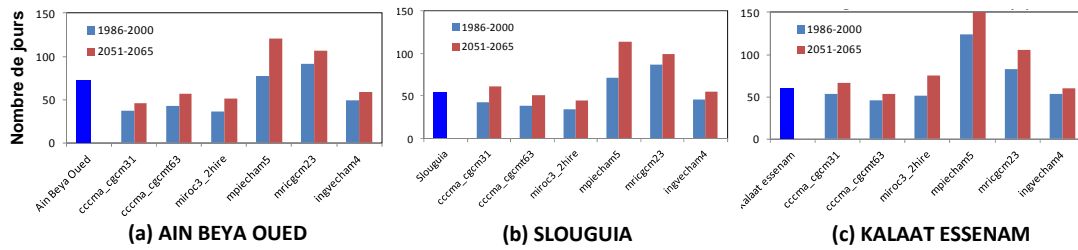


Figure II-(2)-15 Comparaison entre le passé (bleu clair) et le futur (rouge) sur le nombre maximal de jours consécutifs sans pluie pendant l'année

La Figure II-(2)-16 montre l'évolution de la distribution spatiale des précipitations saisonnières pendant les saisons pluviale et sèche. Les précipitations saisonnières ont tendance à diminuer sur tout le bassin pendant les saisons sèche et pluviale. Il a été prouvé que la diminution la plus importante aura lieu sur le bassin en amont pendant la saison sèche.

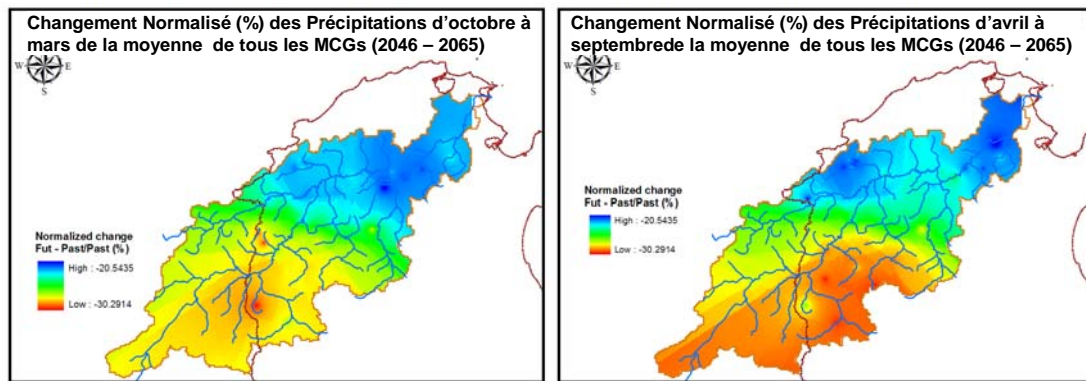


Figure II-(2)-16 Variation de la distribution spatiale des précipitations saisonnières pendant la saison pluviale (gauche) et la saison sèche (droite)

Par contre, il a été prouvé que l'évolution en matière des précipitations extrêmes reste incertaine. Figure II-(2)-17 montre les relations entre la période de retour et l'intensité des précipitations extrêmes dans le futur établies à partir des résultats de chaque modèle, ainsi que les mêmes relations pour aujourd'hui obtenues à l'aide d'observations terrestres.

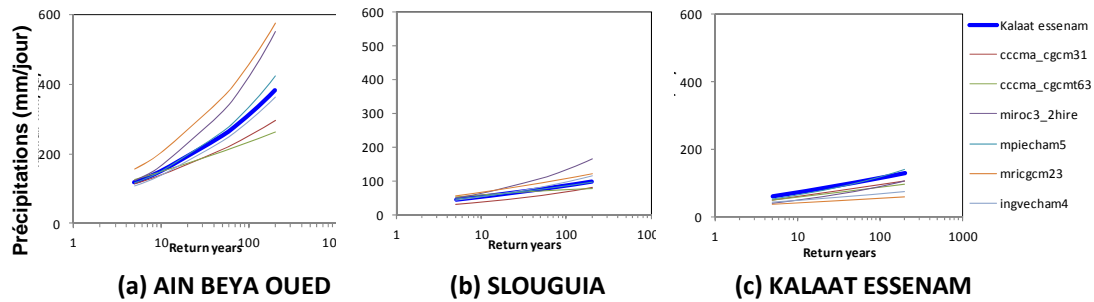


Figure II-(2)-17 Relations entre la période de retour et les précipitations extrêmes dans le futur sur la base des résultats de chaque modèle ainsi que les mêmes relations pour aujourd'hui à partir des données d'observations terrestres

Comme le montre la Figure II-(2)-17, il a été indiqué que concernant les événements de pluies extrêmes, on observe différentes tendances selon les modèles à Ain Beys Oued et Slouguis, alors que tous les modèles suggèrent une tendance vers la diminution à Kalaat Essenam, qui se situe dans le désert. A travers la Figure II-(2)-18, il a été établi que les précipitations maximales sur les périodes de retour de 50 ans et de 100 ans tendent à augmenter sur le bassin moyen et à diminuer en amont. Cependant, les écarts entre les différents modèles sont si grands qu'on pourra pas les négliger.

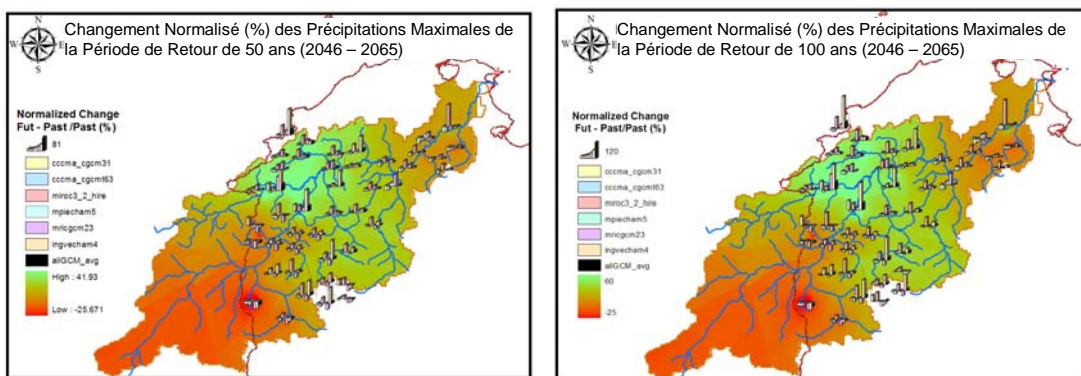


Figure II-(2)-18 Changement de la fréquence de précipitations extrêmes correspondant à la période de retour de 50 ans (gauche) et à celle de 100 ans (droite)

5. Evaluation des changements de crues de conception

Ainsi que cela a été indiqué à la section II-(1)-1, la durée de continuation de précipitations a été fixée à quatre jours pour évaluer les précipitations de conception sur ce bassin. Sur cette base, nous avons d'abord fait l'estimation du ratio entre les précipitations journalières d'aujourd'hui et celles du futur correspondant à chaque période de retour pour chaque modèle MCG, comme indiqué sur le Tableau II-(2)-4.

Tableau II-(2)-4 Le ratio des précipitations journalières d'aujourd'hui et de futur correspondant à chaque période de retour

Période de retour	Précipitations de 4 jours (passé)	Précipitations d'une journée (futur) / précipitations d'une journée (passé)					
		cccma_cgcm31	cccma_cgcm63	miroc3_2hire	mpiecham5	mricgcm23	ingvecham4
2	53.9	0.91	1.03	0.86	0.91	0.93	0.92
5	74.3	0.91	0.97	0.95	0.94	0.95	0.96
10	89.3	0.91	0.93	1.00	0.96	0.96	0.99
50	126.8	0.91	0.84	1.18	1.01	0.99	1.07
80	138.7	0.91	0.81	1.24	1.03	1.01	1.11
100	144.5	0.91	0.80	1.28	1.04	1.01	1.12
150	155.3	0.92	0.78	1.34	1.07	1.03	1.15
200	163.1	0.92	0.77	1.39	1.08	1.04	1.18

Ensuite, nous avons appliqué ce ratio aux précipitations de conception ainsi qu'aux précipitations de 4 jours du futur pour chaque modèle MCG comme indiqué sur le Tableau II-(2)-5.

Tableau II-(2)-5 Résultat obtenu en appliquant le ratio aux précipitations de conception et aux précipitations de quatre jours du futur pour chaque modèle MCG

Période de retour	Précipitations de 4 jours (passé)	Précipitations de 4 jours (futur)					
		cccma_cgcm31	cccma_cgcm63	miroc3_2hire	mpiecham5	mricgcm23	ingvecham4
2	53.9	49.3	55.5	46.6	48.9	50.2	49.5
5	74.3	68.0	71.9	70.3	69.9	70.7	71.6
10	89.3	81.4	82.8	89.4	85.3	85.6	88.4
50	126.8	115.5	106.3	149.2	128.2	125.7	136.3
100	144.5	126.7	112.9	172.3	143.3	139.5	153.5

Nous allons utiliser les précipitations correspondant à chaque période de retour de chaque modèle que nous avons obtenues au Tableau II-(2)-5 à la place des précipitations de conception que nous avons calculées dans la Section II-(1)-1 et indiquer dans la Figure II-(2)-19 les hydrographes d'inondations que nous avons pu établir en utilisant les mêmes distributions spatio-temporelles de précipitations et en les entrant dans le WEB-DHM que nous avons développé dans la même section.

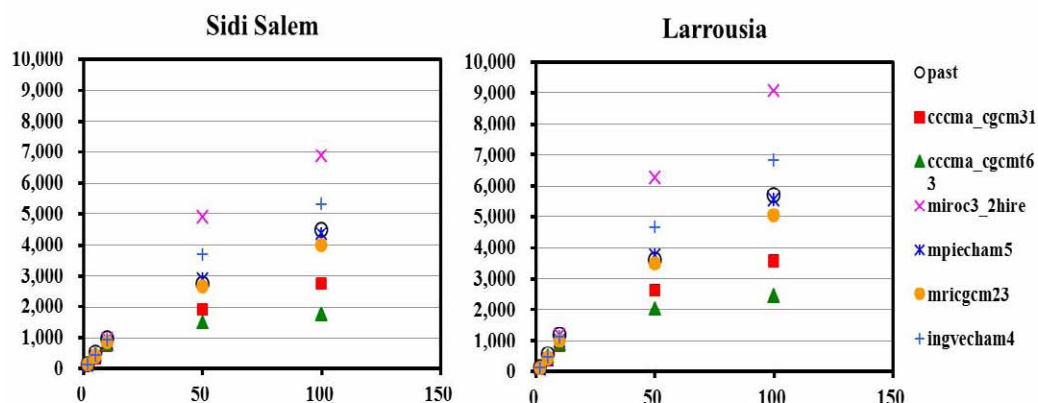


Figure II-(2)-19 Relations entre la crue de conception et la période de retour à Sidi Salem (gauche) et à Larrousia (droite)

Comme le montre la Figure II-(2)-19, alors que l'incertitude des prévisions sur les précipitations

de chaque modèle MCG n'a pas une influence importante sur l'incertitude de la prévision du débit de la crue, comme le taux d'écoulement d'eau d'inondations pour les petites et moyennes inondations d'une période de retour de 10 ans ou moins n'est pas élevé. Cependant, cette influence est extrêmement importante pour les grandes inondations d'une période de retour de plus de 50 ans en raison de la hausse du taux d'écoulement d'eau d'inondation. On pourrait dire que c'est dans ce contexte qu'on voit la différence en matière de l'apparition de l'incertitude sur les prévisions du changement climatique dans les fleuves traversant des régions semi-arides telles que la Medjerda.

(3) Optimisation de l'exploitation des barrages

Afin d'équilibrer des demandes variées posées par différents acteurs intéressés, nous avons besoin d'une approche systématique pour l'optimisation en temps réel de l'écoulement d'eau du barrage vers le bassin. Les techniques d'optimisation combinées avec les modèles de simulation sont utilisées pour résoudre les problèmes liés à l'exploitation des barrages, parce que l'utilisation des modèles d'optimisation pour identifier les politiques pour le déversement en temps réel d'eau du barrage peut être très efficace. Sur les bassins de superficies différentes, le lead time (temps d'écoulement d'eau vers le lieu de crue en aval) nécessaire pour l'exploitation efficace du barrage permettant de lutter contre les désastres peut varier selon le choix du type de précipitations à utiliser dans le modèle de simulation. Comme le temps d'écoulement d'eau de l'amont en aval est généralement plus long sur le bassin des grands fleuves, il est possible de prévoir l'afflux de l'eau vers les barrages situés en aval à l'aide du résultat d'observation des précipitations en amont, ce qui permettra d'exploiter le barrage en temps réel.

Cette section présente le système de simulation intégrée et d'optimisation (ISOS, Wang et al., 2013) qui combine le modèle hydrologique distribué, le système d'optimisation globale et l'approche pour déterminer en temps quasi-réel le déversement d'eau du barrage (c'est ce qu'on appelle « l'approche rolling horizon »). La Figure II-(3)-1 montre l'organigramme pour calculer la meilleure règle de l'exploitation du barrage.

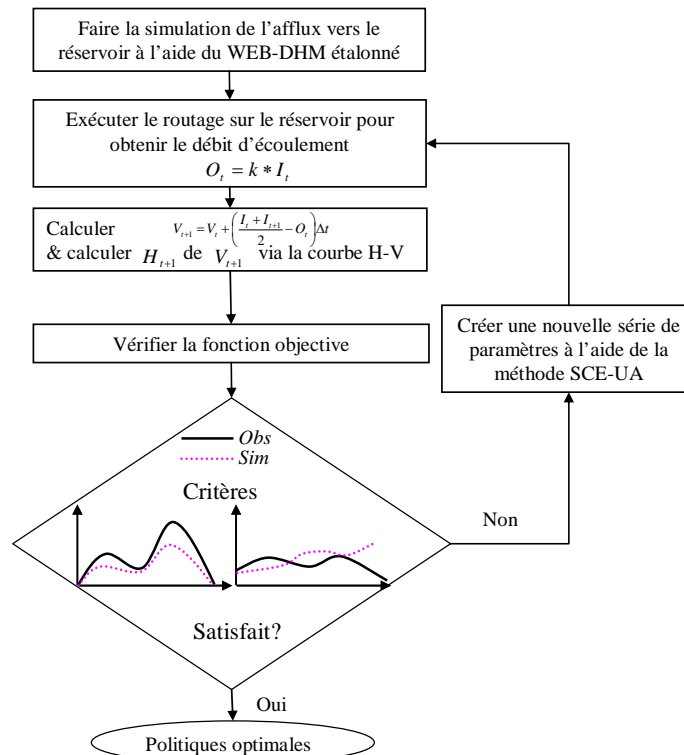


Figure II-(3)-1 Organigramme pour calculer la meilleure règle de l'exploitation du barrage

1. Modèle hydrologique

L'ISOS utilise comme simulateur principal le WEB-DHM développé à la section II-(1)-1. Pour l'appliquer à l'exemple du barrage de Sidi Salem, une simple fonction de stockage y a été ajoutée (Yang et al., 2007). Selon la Figure II-(3)-1, la quantité de stockage d'eau à l'étape temporelle suivante peut être calculée à l'aide de la fonction qui implique le niveau d'eau et la quantité d'eau stockée (courbe H-V) à partir du niveau d'eau du barrage à l'étape temporelle actuelle

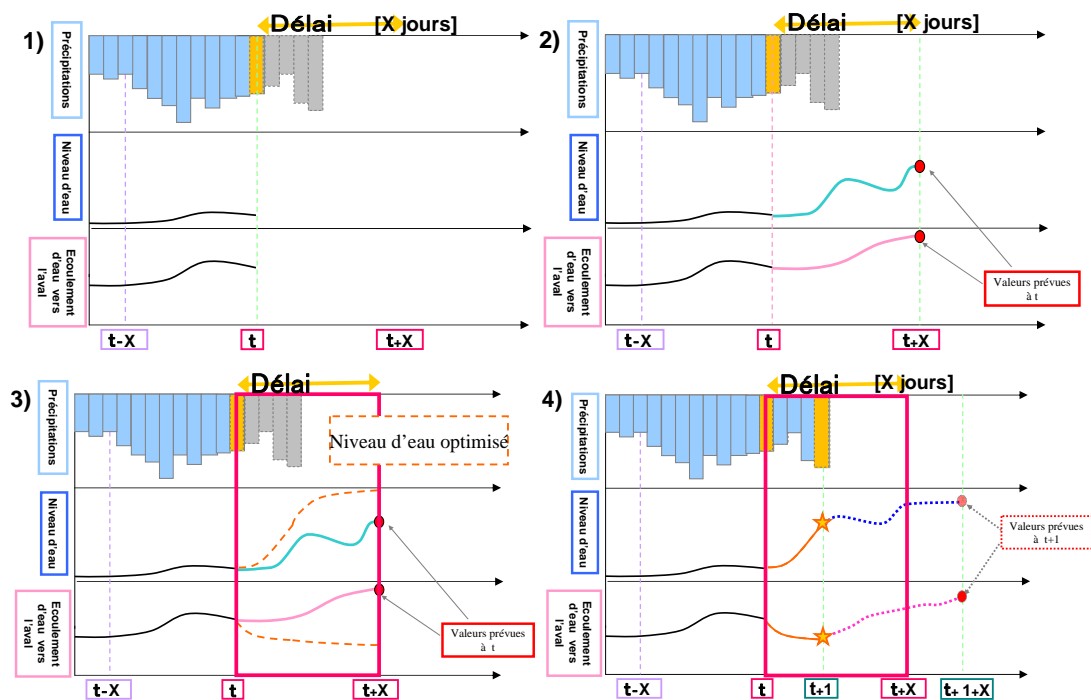


Figure II-(3)-2 Approche « Rolling Stone »: 1) état initial, quantité d'afflux vers le barrage jusqu'à l'étape $t+X$, le niveau d'eau stockée prévu 3) Exploitation optimale proposée selon les valeurs prévues, 4) Décision sur l'exploitation jusqu'à l'étape $t+1$ et prévision jusqu'à l'étape $t+1+X$

2. Système d'optimisation globale

Dans le cadre de l'ISOS, nous avons utilisé en tant que système pour l'optimisation globale la Shuffled Complex Evolution (SCE), qui est une sorte d'algorithme génétique (SCE, Duan et al., 1992, 1993, 1994). La méthode de SCE se compose de quatre notions suivantes :

- 1) Combinaison des approches déterministe et probabiliste
- 2) Développement systématique de l'ensemble regroupant des points répartis dans l'espace paramétrique pour réaliser une amélioration globale
- 3) Analyse génétique à l'aide des comparaisons mutuelles
- 4) Transfert mutuel entre les ensembles

On attend de la méthode de SCE qu'on puisse obtenir une série de paramètres qui nous permettra d'effectuer des approximations adaptées à l'optimisation en utilisant comme fonctions

objectives et le contrôle d'inondations et la quantité d'utilisation d'eau.

3. Approche « Rolling horizon »

Nous avons adopté l'approche « Rolling horizon » pour l'exploitation du barrage. Cette approche se compose des trois processus suivants comme indiqués sur la Figure II-(3)-2.

- 1) Faire le calcul du déversement prévisionnel à l'aide des valeurs prévisionnelles limitées
- 2) Effectuer des décisions sur le déversement à faire au moment de l'étape de décision tenant compte des éléments tels que le temps d'écoulement d'eau en choisissant la période faisant l'objet de la prévision, et
- 3) Procéder à la période suivante et répéter les processus (1) et (2) en utilisant les prévisions mises à jour sur la quantité d'afflux d'eau et sur le stockage dans les réservoirs d'eau jusqu'à la fin de l'étape d'exploration optimisée.

4. Procédure ISOS

La procédure ISOS peut être décrite comme suivant :

- 1) La distribution des paramètres hydrauliques du sol sur le WEB-DHM est étalonnée à l'aide de la quantité d'afflux d'eau dans chaque barrage et ce modèle étalonné sera utilisée pour prévoir la quantité d'afflux dans le barrage pendant l'optimisation du barrage.
- 2) Pendant la durée de la mise en œuvre de chaque optimisation, la valeur optimisée de la quantité d'écoulement du barrage sera définie en utilisant les nouveaux paramètres d'optimisation générés par le SCE qui tient compte et du niveau d'eau du barrage et de la crue sur le point d'observation de l'aval, afin d'optimiser les fonctions objectives.
- 3) Après la mise en œuvre de chaque optimisation, la valeur intégrée et optimisée de gestion sera fixée en tenant compte des facteurs tels que le temps d'écoulement d'eau à partir de l'aval jusqu'au barrage.
- 4) Les étapes (2) et (3) seront répétées jusqu'à ce que les critères sur la mitigation des crues et l'utilisation de l'eau soient atteints.

5. Démonstration de l'ISOS

L'ISOS a été appliqué au bassin de la Medjerda. Visant la première pointe des inondations du janvier 2003, nous avons optimisé le ratio du débit d'écoulement d'eau par rapport à la quantité d'afflux vers le barrage à l'aide du SCE pour faire en sorte que le niveau d'eau du barrage Sidi Salem (H) ne dépasse pas le seuil de 115 mètres, qu'il se rapproche du niveau de 115 m après la fin d'inondations et que le débit d'écoulement vers l'aval (Q_{out}) ne dépasse pas $800 \text{ m}^3/\text{s}$. Nous avons utilisé la fonction d'évaluation suivante pour l'optimisation et adopté la même pondération pour les inondations et les irrigations.

$$0.5 \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{out} - 800)^2}{N}} + 0.5 \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (H - 115)^2}{N}} \quad (11)$$

Nous avons calculé le débit d'écoulement afin d'optimiser le contrôle d'inondations et l'utilisation de l'eau pour l'exploitation du barrage en effectuant des prévisions d'inondations sur toutes les trois journées, comme l'indique les lignes rouges du Figure II-(3)-3. Ayant considéré le temps de déplacement de l'eau inondée et effectué une optimisation basée sur les prévisions des trois journées, les valeurs concernant uniquement la première journée ont été retenues comme valeurs de gestion optimisées et les débits d'écoulement du barrage indiqué en cercles rouges sur la Figure II-(3)-3 ainsi que les niveaux d'eau des réservoirs indiqués à l'aide des cercles bleus sur la Figure II-(3)-4 ont été pris en compte lors de l'étape de la décision.

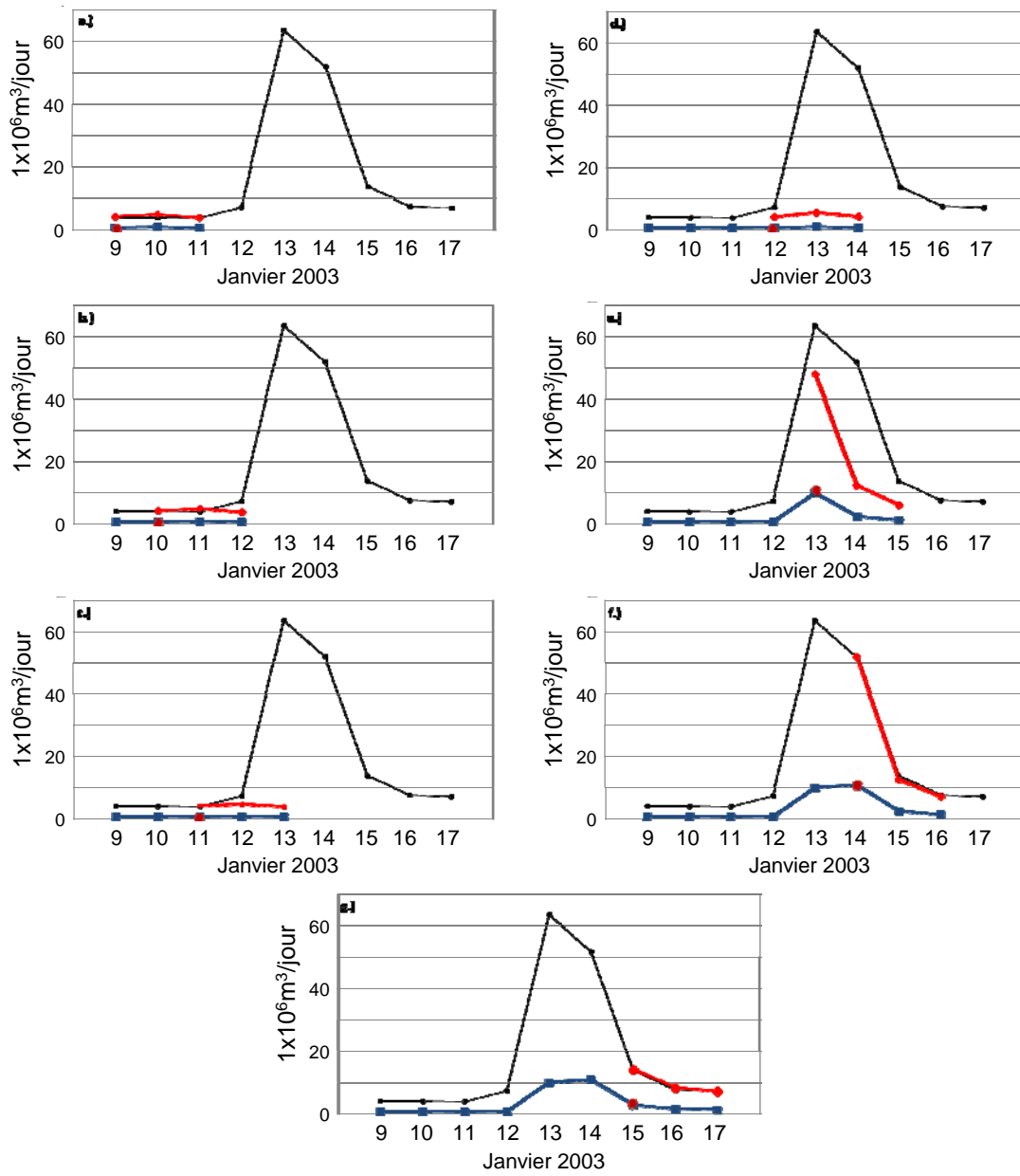


Figure II-(3)-3 La quantité d'afflux d'eau dans le barrage (valeurs observées : lignes noires, valeurs prévues : lignes rouges) ainsi que la quantité d'écoulement (lignes bleues, les cercles rouges correspondant à la quantité d'eau destinée à être déversée selon la prévision pour la journée)

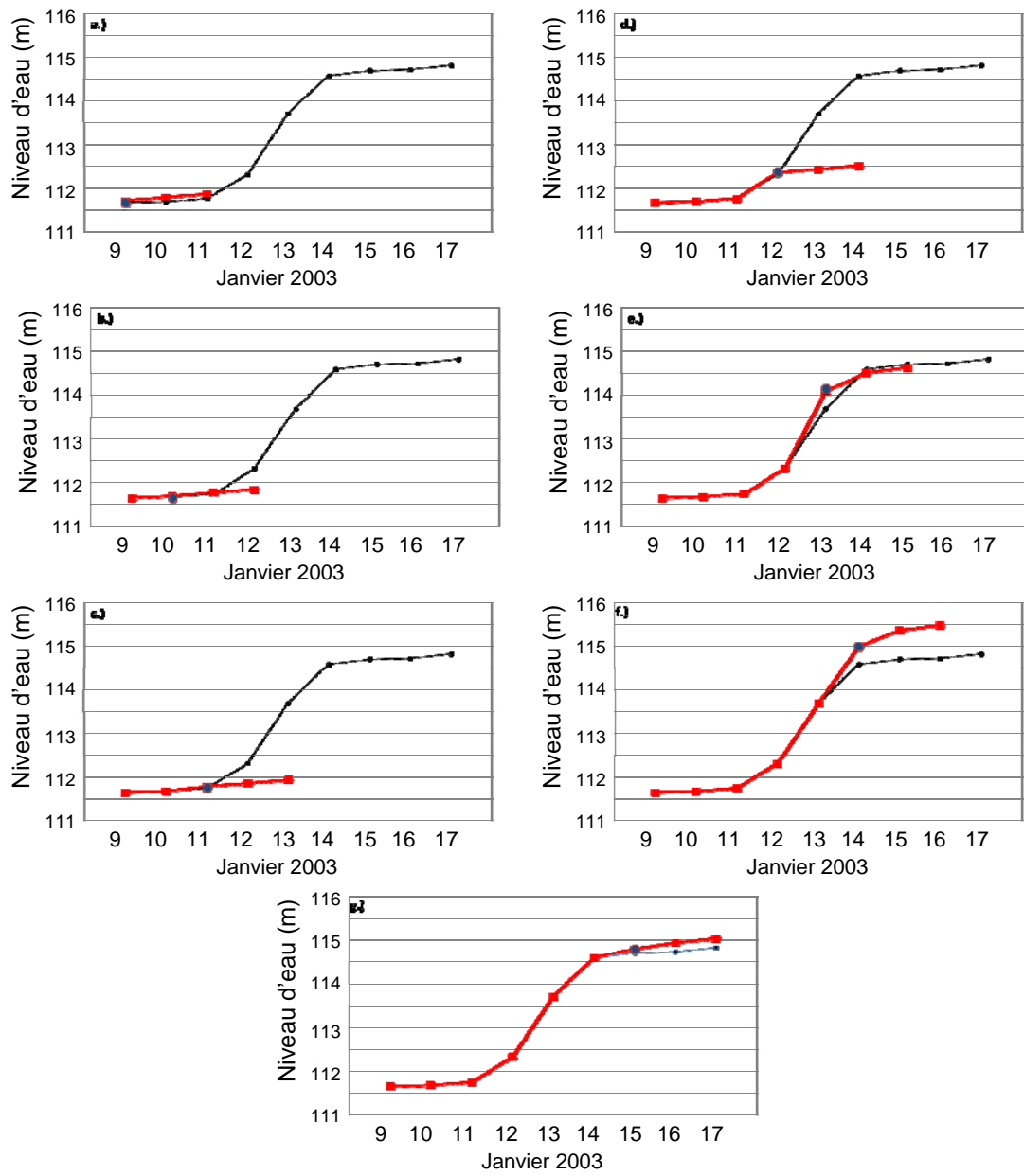


Figure II-(3)-4 Le niveau d'eau stockée (valeurs observées : lignes noires, valeurs prévues : lignes rouges, cercles bleus : quantité d'eau à être déversée selon la prévision pour la journée)

Figure II-(3)-5 montre le résultat de l'optimisation. On peut constater que le débit d'afflux prévu, marqué en rouge, est proche de celui observé en orange. En fait, alors que le barrage fait écouler une quantité importante d'eau comme le montre la ligne en bleu claire de la Figure II-(3)-5, l'ISOS indique bien qu'on pourrait réduire l'écoulement d'eau du barrage, améliorer la retenue d'eau et optimiser le niveau d'eau du barrage à la valeur maximale de 115 mètres.

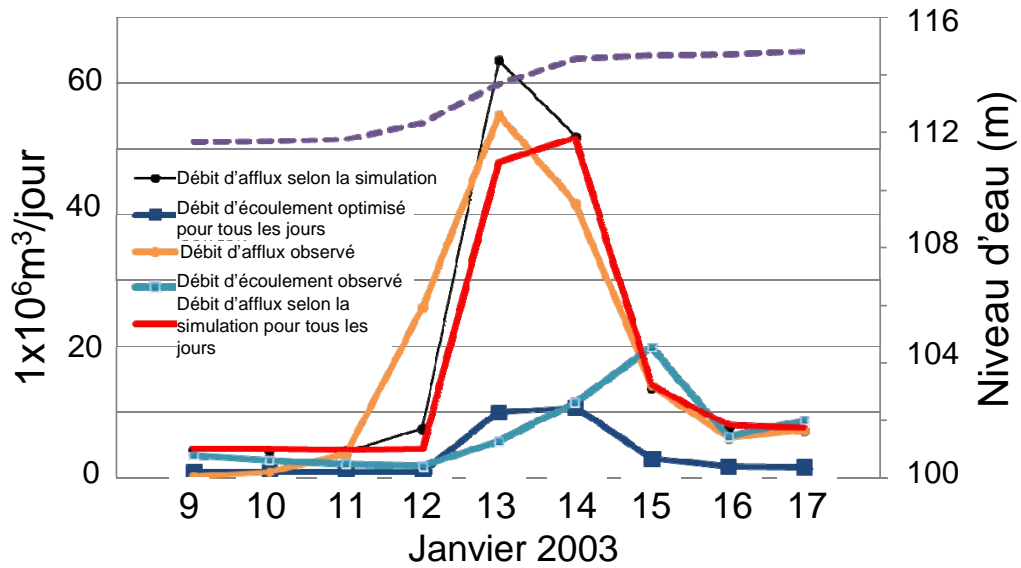


Figure II-(3)-5 Résultat de l'optimisation de l'exploitation du barrage

III. Conclusion et propositions

Dans cette étude, nous sommes arrivés aux trois conclusions suivantes :

- (1) Nous avons procédé à l'évaluation des précipitations maximales probables, du débit de crête sans contrôle et du débit de crue de conception tenant compte de l'exploitation des barrages existants, en faisant des analyses statistiques des données des précipitations observées et en utilisant le modèle hydrologique distribué basé sur le budget d'eau et d'énergie (WEB-DHM) qui rend possible le calcul de l'eau dans le sol et du débit d'écoulement vers le fleuve sans avoir à effectuer des réglages à long terme.
- (2) Lorsque nous avons évalué l'impact du changement climatique futur après avoir effectué des corrections de biais et des réductions d'échelle des modèles MCG à l'aide des données d'observations terrestres et de l'ensemble des données globales, nous avons constaté des tendances nettes vers la sécheresse accrue, mais il a également été prouvé qu'il reste des aspects incertains sur les changements en matière des pluies diluviennes et des inondations et que l'incertitude des modèles MCG a une influence surtout importante sur les grandes inondations dont la période de retour est plus longue.
- (3) Nous avons cité des exemples qui démontrent bien que l'exploitation optimale du barrage tenant compte du temps d'écoulement des inondations est efficace pour rendre compatibles les mesures contre les sécheresses et celles contre les inondations.

Sur la base des conclusions indiquées ci-dessus, nous proposons des mesures suivantes liées à la gestion des ressources hydrologiques du bassin de la Medjerda, qui est située dans une zone semi-aride mais qui connaît fréquemment des pluies torrentielles.

- (1) Construire rapidement un système qui nous permettra d'observer la distribution spatio-temporelle des précipitations à long terme avec une précision élevée et d'utiliser les données en temps réel.
- (2) Approfondir la compréhension sur les propriétés hydrologiques de la Medjerda, un fleuve marqué par un gradient de climat extrêmement important entre la côte méditerranéenne et la région intérieure, et préparer un plan de gestion des ressources hydrologiques du fleuve à long terme ainsi que des mesures d'adaptation à court terme du point de vue de la promotion de l'utilisation d'eau et de la lutte contre les inondations, vis-à-vis des grandes inondations qui auront lieu malgré une tendance nette vers la sécheresse.
- (3) Promouvoir la conception et la gestion des systèmes d'observation, l'utilisation efficace des sorties des modèles pour la prévision du changement climatique, le développement et l'application des modèles d'écoulement distribués qui permettront d'effectuer des simulations à long terme sur le débit du fleuve et l'eau dans le sol, à commencer par les cas de sécheresse et jusqu'aux ceux d'inondations, et le renforcement des compétences sur, par exemple, la gestion optimale des barrages.

Référence

- 1) Duan Q, Sorooshian S, Gupta VK.: Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research* 28(4): 1015-1031, 1992.
- 2) Duan Q, Sorooshian S, Gupta VK. : Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *Journal of Optimization Theory and Applications* 76(3): 501-521, 1993.
- 3) Duan Q, Sorooshian S, Gupta VK.: Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology* 158: 265-284, 1994.
- 4) Feddersen H., and U. Andersen: A method for statistical downscaling of seasonal ensemble predictions. *Tellus*, 57A, 398-408, 2005.
- 5) Ines A. V. M., and J. W. Hansen: Bias correction of daily GCM rainfall for crop simulation studies, *Agricultural and Forest Meteorology*, 138, 44-53, 2006.
- 6) IPCC: IPCC Special Report on Emissions Scenarios, Chapter 4, IPCC WG III, COP 6, Hague, 2000.
- 7) NYUNT, C.T., T.KOIKE, P.A.J. SANCHEZ, A. YAMAMOTO, T. NEMOTO and M. KITSUREGAWA: Bias Correction Method for Climate Change Impact Assessments in the Philippines, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, Vol.69,No.4. I_19-I_24, 2013
- 8) Sellers, P. J., D. A. Randall, G. J. Collatz, J. A. Berry, C. B. Field, D. A. Dazlich, C. Zhang, G. D. Collelo, and L. Bounoua: A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs, Part I: Model formulation, *J. Clim.*, 9, 676-705, doi:10.1175/1520-0442(1996)009<0676:ARLSPF>2.0.CO;2.
- 9) Sharma D, Das Gupta A, Babel MS: Spatial disaggregation of bias-corrected GCM precipitation for improved hydrologic simulation: Ping river basin, Thailand. *Hydrol Earth Sys Sci* 11(4):1373–1390, 2007.
- 10) Yang, D., S. Herath, and K. Musiak (2000), Comparison of different distributed hydrological models for characterization of catchment spatial variability, *Hydrol. Processes*, 14, 403-416, doi:10.1002/(SICI)1099-1085(20000228)14:3<403::AID-HYP945>3.0.CO;2-3.
- 11) Yang, K., T. Watanabe, T. Koike et al.: Autocalibration System Developed to Assimilate AMSR-E Data into a Land Surface Model for Estimating Soil Moisture and the Surface Energy Budget, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol.85A, pp 229-242, 2007.
- 12) Wang, L., T. Koike, K. Yang, T. J. Jackson, R. Bindlish, and D. Yang, Development of a distributed biosphere hydrological model and its evaluation with the Southern Great Plains Experiments (SGP97 and SGP99), *J. Geophys. Res.*, 114, D08107, doi:10.1029/2008JD010800, 2009.
- 13) Wang L., T. Koike, M. Ikeda, C. T. Nyunt, D. N. Tinh, O. Saavedra, T. V. Sap, L. C. Nguyen, K. Tamagawa, T. Ohta: Optimizing multi-dam releases in large river basins by combining distributed hydrological inflow predictions with rolling horizon decision making, *Journal of Water Resources Planning and Management*, submitted, 2013.