



*Université de Ghardaïa*

N° d'ordre :  
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies  
Département des Sciences et Technologie

**Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de**

## **MASTER**

**Domaine :** *Sciences et Technologies*

**Filière :** *Hydraulique*

**Spécialité :** *Ressources hydraulique*

**Par :** **IDAOUI Ahmed**

**RISKOU Khaled Yacine**

## **Thème**

**EVALUATION ET AJUSTEMENT DES PRODUITS DE  
PRECIPITATION « TRMM » UTILISANT  
LES METHODES D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE**

**Soutenu publiquement le : 20/06/2018**

**Devant le jury :**

<b>Mme. MAZIA Chaker</b>	M.A.B	Univ. Ghardaïa	<b>Président</b>
<b>Mr. AMMAR Hachemi</b>	M.R.B	U.R.A.E.R. Ghardaïa	<b>Examineur</b>
<b>Mr. CHEBIHI Lakhder</b>	M.A.A	Univ. Ghardaïa	<b>Examineur</b>
<b>Mr. BOULMAIZ Tayeb</b>	M.C.B	Univ. Ghardaïa	<b>Encadreur</b>
<b>Mr. GUERMOUI Mawloud</b>	M.R.B	U.R.A.E.R. Ghardaïa	<b>Co-encadreur</b>

**Année universitaire 2017/2018**

# ***Dédicace***

*Je dédie ce modeste travail de beaucoup de sacrifices à*

*A mes très **chers parents***

*Aucune dédicace, aucun mot ne pourrait exprimer à leur juste valeur la gratitude et l'amour que je vous porte. Je mets entre vos mains, le fruit de longues années d'études, de longs mois de distance de votre amour de votre tendresse, de longs jours d'apprentissage. Loin de vous, votre soutien et votre encouragement m'ont toujours donné de la force pour persévérer et pour prospérer dans la vie. Chaque ligne de cette travaille, chaque mot et chaque lettre vous exprime la reconnaissance, le respect, l'estime et le merci d'être mes parents.*

*Mes très **chers frères** HABIBO, ABDESSADEK, CHEMSOU*

*Mes très **chères sœurs** FATIMA, REKIA*

*Et en particule Mr. EDAOUI Mohammed, Mon cousin, sur les conseils, sur l'encouragement, et bien sur sa sacrifices.*

*Et à tous ceux que j'aime.*

*A tout ma grande famille **EDAOUI**.*

*A tous mes camarades de promotion.*

*A tous mes amis : **N.Basset, B.Djouhaid, A.Kada, A.Wahab, B.laid, I.abderrahmane, B.Zakaria, O.Youceb, H.Bouamama, Selma.ME, BenM.Hafsa**, et spécialement **B.Rekia** qui a été toujours à mes côtés à m'encourager et surtout pour sa patience.*

*Sans oublier mon frère aussi mon binôme **RISCKOU Khaled Yacine**.*

*Et enfin, à tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce document.*

*Qu'ALLAH vous grade et vous procure la santé et la longue vie*

AHMED, Hamada

## ***Dédicace***

*A tous ceux qui ont confiance en mes capacités et potentiels*

*A tous ceux qui m'ont motivé et soutenu*

*À ma chère mère et mon père bien-aimé*

*TALEB Ahmed Kheira et RISKOU Saleh*

*Je dédie ce travail humble, que je souhaite que Dieu Tout-Puissant fasse dans la balance de nos bonnes actions*

*À mes frères : Muhammad Imad al-Din, Islam Habib Allah, Farouk Abed El*

*Hay, Ali Abdullah*

*Et à mes sœurs : Asma, Aya Fatima al-Zahra, Marwa Malak*

*Et à mon petit ange Muhamed Djawad*

*Et à tous les membres de mes familles : RISKOU et TALEB AHMED*

*Et à mon binôme **IDAOUI Ahmed** et à tous mes collègues de spécialité RH et HU*

*Et à mon chers amies **BAALLAH l'Aid***

*Et **HADADJI Saleh**: LAHBAKI Muhamad Amine, BAN AMER Samer Djuohid et **L.Fatiha***

*Et toutes mes amies de Club CAST,*

*Et à tout ce qui est cher à mon cœur spécialement R. **Kheira** qui a été toujours à mes côtés à m'encourager et surtout pour sa patience.*

*J'espère avoir réalisé certaines de vos ambitions*

*Et Dieu accorde le succès.*

***Khaled Yasmine***

## REMERCIEMENTS

*Louange à Allah ! Le Tout Miséricordieux, à Toi que nous venions, à Toi que nous retournerions et c'est Toi dont nous implorons secours.*

*Nos remerciements viennent d'emblée à Toi le Tout puissant*

*D'avoir fait durant notre parcours de volonté, de force et de succès jusqu'aujourd'hui dans des meilleures conditions.*

*Ensuite, nous voulons exprimer notre reconnaissance à nos promoteurs **Dr. Boulmaiz tayeb** Maitre de conférence 'B', pour leur encadrement efficace, leur soutien, leur disponibilité et leur patience. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.*

*Sans oublier la Co-encadreur **Mr. Guermoui mawloud**, Maitre de recherche 'B', U.R.A.E.R. Ghardaia*

*Un grand merci aux membres de jury qui ont accepté d'examiner ce modeste travail.*

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à tous les enseignants et enseignantes de la faculté des Sciences et de la Technologie qu'avec leur encadrement si qualifié dans ce domaine, nous avons bénéficié cette formation aussi importante.*

*Et nous adressons une pensée particulière,*

**Mr. Achour Mansour**

**Mme. Amrous karima**

*Nous remercions vivement **Mr. Ben elkheir Abd Errahmane** pour tous leurs aides, disponibilité, ses précieux conseils et le matériel qu'ils ont mis à nos dispositions.*

*Enfin, nos sincères remerciements à tous ceux qui ont contribués de loin ou de près à la réalisation de ce modeste travail.*

*Un grand merci à toutes nos familles et à tous ceux qui contribué de près ou de loin à notre formation*

# *Table des matières*

<b>Table des matières</b> .....	<b>I</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>V</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>VI</b>
<b>Liste des abréviations</b> .....	<b>IX</b>
<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>

## *Chapitre I : Généralités*

I.1. Introduction .....	4
I.2. Définition de la précipitation.....	4
I.2.1. Différente forme de la pluie .....	4
I.2.2. Formation de la Précipitation .....	5
I.2.3. Classification des précipitations .....	5
I.2.3.1. Les précipitations convectives.....	6
I.2.3.2. Les précipitations orographiques.....	6
I.2.3.3. Les précipitations frontales (ou de type cyclonique).....	7
I.2.4. Moyen de mesure de la précipitation.....	7
I.3. Les satellites météorologiques.....	10
I.3.1. Mesure des précipitations par satellite .....	10
I.3.2. Mission de mesure des précipitations tropicales (TRMM) .....	11
I.3.2.1. L'histoire de TRMM.....	12
I.3.2.2. Objectif de la mission TRMM.....	14
I.3.2.3. Les instrumentes de TRMM.....	15
I.3.2.4. Le traitement des données .....	20
I.4. CONCLUSION .....	20

## ***Chapitre II : Région d'étude et base de données***

II.1. Introduction .....	21
II.2. Situation géographique.....	21
II.3. Caractéristique du sous bassin.....	22
II.4. Base de données .....	23
II.4.1. Pluie .....	23
II.4.2. Produits de précipitation satellitaires .....	25
II.5. Conclusion.....	26

## ***Chapitre III : Evaluation des précipitations satellitaires***

III.1. Introduction .....	27
III.2. Etat de l'art .....	27
III.3. Méthodologie .....	28
III.3.1. Polygone de Thiessen.....	28
III.4. Les critères d'efficacité.....	30
III.5. Résultats de la comparaison et discussion .....	31
III.6. Conclusion .....	42

## ***Chapitre IV : Modèles d'intelligence artificielle***

IV.1. Introduction .....	44
IV.2. Les réseaux de neurones artificiels.....	44
IV.3. Historique des RNA.....	44
IV.3.1. Neurone biologique .....	44
IV.3.2. Neurone formel.....	45
IV.3.3. Les différents types de fonction de transfert .....	47
IV.3.3.1. Fonction binaire .....	47

IV.3.3.2. Fonction linéaire par morceaux .....	47
IV.3.3.3. Fonction linéaire .....	47
IV.3.3.4. Fonction sigmoïde .....	47
IV.3.3.5. Fonction gaussienne .....	48
IV.3.4. Définition d'un réseau de neurone.....	49
IV.3.5. Classification topologique des réseaux de neurones .....	49
IV.3.5.1. Les réseaux feed-forward (Non bouclés).....	49
IV.3.5.2. Le perceptron monocouche .....	49
IV.3.5.3. Le perceptron multicouches (PMC) .....	50
IV.3.5.4. Les réseaux à fonction radiale (RBF).....	51
IV.3.6. Apprentissage des RNA.....	51
IV.3.6.1. Apprentissage supervise .....	51
IV.3.6.2. Apprentissage non Supervisé.....	52
IV.3.6.3. Apprentissage par renforcement.....	52
IV.3.7. L'algorithme du LEVENBERG-MARQUARDT .....	52
IV.3.8. Perceptron multicouche (PMC).....	52
IV.3.8.1. Apprentissage .....	53
IV.3.8.2. Architecture .....	53
IV.3.9. Les réseaux de neurones à base radiale (RBF).....	54
IV.3.9.1. Présentation des réseaux RBF .....	54
IV.3.9.2. Architecture générale d'un réseau RBF.....	54
IV.3.9.3. Apprentissage du RBF .....	56
IV.4. Application du modèles PMC et RBF dans l'ajustement des mesures satellitaires .....	56
IV.4.1. L'apprentissage.....	56
IV.4.2. Normalisation des données.....	56
IV.4.3. Division des données .....	57
IV.4.4. Détermination des entrées pour les PMC et RBF.....	57

IV.4.5. Evaluation du modèle .....	58
IV.5. Conclusion .....	58

### ***Chapitre V : Résultats et discussion***

V.1. Introduction.....	60
V.2. Application du PMC .....	60
V.2.1. TRMM 3B42V7 .....	60
V.2.2. TRMM 3B42RT.....	67
V.3. Application du RBF .....	74
V.3.1. TRMM 3B42V7.....	74
V.3.2. TRMM 3B42RT.....	81
V.4. Conclusion .....	88
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>89</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>92</b>



## *Liste des tableaux*

Tableau I.1 : Histoire de satellite TRMM (Jaxa, 2018).....	13
Tableau I.2 - Principales caractéristiques du satellite TRMM (Jaxa, 2018).....	15
Tableau I.3 - radar de précipitation (PR) (Jaxa, 2018) . .....	17
Tableau I.4 - TRMM Micro-ondes Imager (TMI) (Jaxa, 2018). .....	17
Tableau I.5 - Scanner infrarouge visible (VIRS) (Jaxa, 2018). .....	17
Tableau I.6 - Capteur d'imagerie de foudre (LIS) (Jaxa, 2018). .....	18
Tableau II.1 - Caractéristiques des stations pluviométrique principaux à travers la Zone d'étude, du L'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH).....	23
Tableau II.2 - caractéristiques des séries de données .....	25
Tableau II.3 - Informations sur les produits de précipitation de satellites utilisés dans cette étude, .....	26
Tableau III.1 - Analyse statistique des précipitations journalières (1998-2004 pour 3B42V7, 01 mars 2000-2004 pour 3B42RT) entre les produits de précipitation satellitaires et les stations. ....	33
Tableau IV.1 - division de la période pour les deux modèles.....	57
Tableau V.1 - Résultats des simulations du modèle PMC pour le produit 3B42V7 .....	61
Tableau V.2 - Résultats des simulations du modèle PMC pour le produit 3B42RT .....	68
Tableau V.3 - Résultats des simulations du modèle RBF pour le produit 3B42V7 .....	75
Tableau V.4 - Résultats des simulations du modèle RBF pour le produit 3B42RT .....	82

# ***Liste des figures***

## ***Chapitre 1 : Généralités***

Figure I.1 - Pluviomètres manuel (Bennani, 2016). .....	8
Figure I.2 : Les pluviomètres optiques .....	8
Figure I.3 : Pluviographe enregistreurs (Bennani, 2016).....	9
Figure I.4 - Les pluviomètres à auget basculeur .....	9
Figure I.5 - satellites TRMM (Jaxa, 2018). .....	14
Figure I.6 - Schéma descriptif instrument du TRMM (Jaxa, 2018). .....	16
Figure I.7 - Diagramme du chemin de mesure des instruments TRMM. ....	19

## ***Chapitre 2 : Région d'étude et base de données***

Figure II.1 - Localisation du sous bassin (1406) par rapport au bassin de la Seybous .....	21
Figure II.2 - Relief et talwegs du sous bassin (1406) .....	22
Figure II.3 - Localisation des stations pluviométrique dans le sous bassin (1406) .....	24
Figure II.4 – Distribution des séries pluviométriques dans les différentes stations (1998-2004) .....	24

## ***Chapitre 3 : Evaluation des précipitations satellitaires***

Figure III.1 - Emplacements des stations pluviométriques et Division des surfaces du sous bassin (1406) par rapport aux polygones de Thiessen.....	29
Figure III.2 - Emplacements des stations pluviométriques et couverture spatiale de grille de TRMM .....	30
Figure III.3 – Nuages de points des précipitations journalières des stations par rapport aux (a) TRMM 3B42 (pendant la période 1998-2004) et (b) TRMM 3B42RT (pendant la période mars 2000-2004), à l'échelle de bassin versant.....	32
Figure III.4 - RMSE% de produits de précipitation satellitaires (3B42V7 et 3B42RT) pour déférente intensité de précipitation .....	33
Figure III.5 : diagramme de dispersion et les Séries chronologiques de précipitations journalières des stations et les données de TRMM 3B42V7, 1998 et 1999. ....	35
Figure III.6 : diagramme de dispersion et les Séries chronologiques de précipitations journalières des stations et les données de TRMM 3B42V7, 2000 et 2001. ....	36

Figure III.7 : diagramme de dispersion et les Séries chronologiques de précipitations journalières des stations et les données de TRMM 3B42V7, 2002 et 2003.....	37
Figure III.8 : diagramme de dispersion et les Séries chronologiques de précipitations journalières des stations et les données de TRMM 3B42V7, 2004.....	38
Figure III.9 : diagramme de dispersion et les Séries chronologiques de précipitations journalières des stations et les données de TRMM 3B42RT, 2000 et 2001.....	39
Figure III.10 : diagramme de dispersion et les Séries chronologiques de précipitations journalières des stations et les données de TRMM 3B42RT, 2002 et 2003.....	40
Figure III.11 : diagramme de dispersion et les Séries chronologiques de précipitations journalières des stations et les données de TRMM 3B42RT, 2004.....	41

### ***Chapitre 4 : Modèles d'intelligence artificielle***

Figure IV.1 - Schéma d'un neurone biologique (Parizeau, 2004).....	45
Figure IV.2 - Un neurone formel (Wira, 2009) .....	46
Figure IV.3 - Les différents type de fonction de transfert dans les RNA(a) fonction binaire, (b) fonction linéaire par morceaux (c), fonction linéaire (d) fonction sigmoïde, (e) fonction gaussienne (Boulmaiz, 2016).....	48
Figure IV.4 - Schéma descriptif du perceptron monocouche (Boulmaiz, 2016).....	49
Figure IV.5 - Schéma descriptif du perceptron multicouche (Boulmaiz, 2016).....	50
Figure IV.6 - Schéma descriptif d'un apprentissage supervisé (Boulmaiz, 2016). .....	51
Figure IV.7 - Présentation schématique d'un PMC (Fatima and Hamid, 2009). .....	53
Figure IV.8 - Présentation schématique d'un réseau RBF (Fatima and Hamid, 2009).....	55

### ***Chapitre 5 : Résultats et discussion***

Figure V.1 - Performances des modèle PMC en fonction des combinaisons des entrées au niveau des critères (a) RMSE, (b) R <sup>2</sup> %, durant la période test.....	62
Figure V.2 - Performances des modèle PMC en fonction des combinaisons des entrées au niveau des critères (a) BIAIS, (b) RMSE%, durant la période test .....	63
Figure V.3 - RMSE% de produits de précipitation satellitaires (3B42V7) et combinaison C5, pour déférente intensité de précipitation.....	64
Figure V.4 - Nuages de points montre la simulation avec le modèle PMC utilisent les pluies du 3B42V7 durant la période test (C5).....	65

Figure V.5 - séries chronologiques montrant la simulation avec le modèle PMC utilisent les pluies du 3B42V7 durant la période test (C5) .....	66
Figure V.6 - Performances des modèle PMC en fonction des combinaisons des entrées au niveau des critères (a) MSE, (b) R <sup>2</sup> %, durant la période test .....	69
Figure V.7 - Performances des modèle PMC en fonction des combinaisons des entrées au niveau des critères (a) BIAIS, (b) RMSE%, durant la période test .....	70
Figure V.8 - RMSE% de produits de précipitation satellitaires (3B42RT) et combinaison C5, pour déférente intensités de précipitation .....	71
Figure V.9 - Nuages de points montre la simulation avec le modèle PMC utilisent les pluies du 3B42RT durant la période test (C5).....	72
Figure V.10 - séries chronologiques montrant la simulation avec le modèle PMC utilisent les pluies du 3B42RT, durant la période test durant la période test (5) .....	73
Figure V.11 - Performances des modèle RBF en fonction des combinaisons des entrées au niveau des critères (a) RMSE, (b) R <sup>2</sup> %, durant la période test.....	76
Figure V.12 - Performances des modèle RBF en fonction des combinaisons des entrées au niveau des critères (a) BIAIS, (b) RMSE%, durant la période test .....	77
Figure V.13 - RMSE% de produits de précipitation satellitaires (3B42V7) et combinaison C9, pour déférente intensité de précipitation.....	78
Figure V.14 - Nuages de points montre la simulation avec le modèle RBF utilisent les pluies du 3B42V7 durant la période test (C9).....	79
Figure V.15 - séries chronologiques montrant la simulation avec le modèle RBF utilisent les pluies du 3B42V7 durant la période test (C9) .....	80
Figure V.16 - Performances des modèle RBF en fonction des combinaisons des entrées au niveau des critères (a) RMSE, (b) R <sup>2</sup> %, durant la période test.....	83
Figure V.17 - Performances des modèle RBF en fonction des combinaisons des entrées au niveau des critères (a) BIAIS, (b) RMSE%, durant la période test .....	84
Figure V.18 - RMSE% de produits de précipitation satellitaires (3B42RT) et combinaison C8, pour déférente intensité de précipitation.....	85
Figure V.19 - Nuages de points montre la simulation avec le modèle RBF utilisent les pluies du 3B42RT durant la période test (C8).....	86
Figure V.20 - Séries chronologiques montrant la simulation avec le modèle RBF utilisent les pluies du 3B42RT durant la période test (C8) .....	87

## *Liste des abréviations*

- ANRH** : Agence nationale des ressources hydriques.
- CC** : coefficient de corrélation
- CERES**: cluds Earth Radiant Energy System
- CMORPH**: Climate Prediction Center Morphing Method
- CPC** : Climate Prediction Center
- CRL** : Laboratoire de recherche sur la communication
- DEM**: Anglais Digital Elevation Model
- EORC**: Equal Opportunity Representative Course
- FAR**: False Alarm Ratio
- GES**: Goddard Earth Science
- GPCC**: Global Precipitation Climatology Center
- IR**: Images infrarouges
- LIS**: Light Imaging Sensor
- MAE** : l'erreur absolue moyenne
- ME** : l'erreur moyenne
- MNT** : Modèle Numérique Terrain
- MSE** : Mean square error
- PDF** : Fonction de distribution de probabilité.
- PERSIANN**: Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Network
- PMC** : Perceptrons multicouches
- POD** : Précipitation of détection
- PR** : Précipitation radar
- PRM** : radar de mesure de précipitations
- RBF** : Réseaux à fonction radiale
- RNA** : Réseaux de neurones artificiels
- SIG** : Système d'information géographique
- SVM**: Structural Verification Model
- TCI**: TRMM Combined Instrument
- TMI**: TRMM microwave imager
- TMPA** : TRMM multisatellite precipitation analysis
- TRMM** : Mission de mesure des précipitations tropicales
- VIRS**: Visible infrared scanner

# Introduction générale

### Introduction générale

Après le lancement du premier satellite artificiel en 1957, le développement de nouveaux champs dans l'espace extra-atmosphérique, étudiés et contrôlés par des satellites, ont augmenté. Au cours des deux décennies suivantes, les scientifiques ont découvert l'espace et accru les activités satellitaires dans divers domaines dans des domaines pacifiques, militaires et scientifiques. La contribution des satellites a largement contribué à l'avancement des connaissances et a élargi d'avantage les horizons scientifiques. Les satellites surveillent la météo, l'espace aérien et les valeurs en utilisant les normes de prévision météorologique et préviennent de toute catastrophe qui pourrait survenir dans les prochains jours, n'importe où dans le monde.

Les précipitations jouent un rôle important dans le cycle hydrologique et sont indispensables pour forcer la modélisation hydrologique. Comme les précipitations ont une hétérogénéité spatiale et une variabilité temporelle élevées, les mesures de précipitations conventionnelles aux stations de jaugeage ponctuelles ne peuvent généralement pas fournir suffisamment d'informations pour les applications hydrologiques (modélisation hydrologique distribuée), en particulier dans les zones à faible densité (Liu et al. 2015). En revanche, les produits de précipitation par satellite sont largement acceptés comme une source alternative pour surmonter les limites des techniques au sol. Ils constituent potentiellement une alternative aux réseaux à pluviométrie clairsemée pour évaluer la distribution spatiale des précipitations.

Au cours des dernières années, les produits de précipitations par satellite se sont développés rapidement et sont devenus une nouvelle source de données prometteuse pour différentes études hydrologiques (Liu et al. 2015). Les produits de précipitation ont été de plus en plus acceptés en termes de surveillance des précipitations et de soutien aux applications de modélisation. Il existe maintenant au moins 12 produits de précipitation par satellite distincts (Ebert et al, 2007). Parmi les produits les plus couramment utilisés qui couvrent de vastes étendues de la planète, il y a l'estimation de la précipitation à partir d'informations distantes à l'aide de réseaux neuronaux artificiels (PERSIANN) (Tobin and Bennett 2010). Aussi, on trouve la mission de mesure des précipitations tropicales (TRMM), une mission conjointe de l'Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace (NASA) et de l'Agence japonaise d'exploration aérospatiale (JAXA), qui a été lancée en 1997 pour étudier la pluviosité dans un but de recherche météorologique et climatique.

Liu et al. (2015) ont fait une évaluation complète de trois produits de précipitations satellites (TRMM), CMORPH (*the Climate Prediction Center (CPC) Morphing algorithm*) et PERSIANN (*Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information Using Artificial Neural Network*) en utilisant les données de 52 stations de pluviomètres sur le bassin versant du Meichuan (lac Poyang en Chine). Franchito et al. (2009) à valider le radar de précipitations (PRM) de la Mission de mesure des précipitations tropicales (TRMM) au Brésil, il a comparées les estimations PRM TRMM aux données des stations pluviométriques. L'analyse est effectuée sur une base saisonnière et considère cinq régions géographiques avec différents régimes de précipitations. Les résultats ont montré que les précipitations saisonnières TRMM PR sont bien corrélées avec les précipitations de l'Agence National d'Énergie Electrique (ANEEL) sur la majeure partie du Brésil. Les erreurs aléatoires et systématiques de PRM TRMM sont sensibles aux différences saisonnières et régionales. Boushaki et al. (2009) ont fait un ajustement biaisé de l'estimation des précipitations par satellite en utilisant la mesure au sol, sur le sud-ouest des États-Unis, dans laquelle les estimations du satellite « PERSIANN-Cloud Classification System » sont ajustées en fonction de l'analyse quotidienne du pluviomètre du Centre de prévision climatique (CPC). Cette étude à montrer que les biais ajustés des précipitations CCS utilisant l'analyse des pluies journalières CPC sont efficaces dans la réduction des biais du satellite PERSIANN-CCS.

Les applications des produits des précipitations sont encore peu exploré et manque d'étude d'évaluation de leurs qualités. En Algérie, les études d'évaluation des produits satellitaires sont quasiment inexistantes, et c'est dans cette optique que notre travail a pour objective d'étudier les mesures de précipitation faites par les satellites produits TRMM 3B42RT et TRMM 3B42V7. Cette étude comprend deux volets. Le premier s'agit d'une comparaison entre les produits de précipitation satellitaires avec les mesures des stations au sol en utilisant plusieurs critères. Cette comparaison est effectuée en utilisant la pluie moyenne d'une surface donnée qui est extraite par l'utilisation de la méthode de polygones de Thiessen appliquée sur plusieurs stations. Quant au deuxième volet, l'objective étant de tester plusieurs méthodes d'intelligences artificielles afin d'ajuster les produits satellitaires et améliorer leurs précisions.

L'étude a été réalisée dans un sous bassin est faisant partie des surfaces de trois Wilaya (Annaba et EL-TARF et Guelma). La zone d'étude est un sous bassin (1 066 km<sup>2</sup>)



du bassin Seybouse. Ce dernier (6450 km<sup>2</sup>) s'étend sur 160 km, après une belle disposition sud-ouest et nord-est, des frontières du Tarif et du Ghalif au sud, à la mer au nord. Le principal critère de choix de cette zone est la disponibilité des séries concomitantes des données et la situation géographique (densité du réseau pluviométrique) des stations pluviométrique de L'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) qui sont répartis et placés sur le côté de la vallée.

Le mémoire ainsi réalisé sera structuré en cinq parties réparties comme suit :

Le premier chapitre, nous discutons de certaines notions concernant la précipitation, ses différentes formes et types, ainsi que les éléments de mesure de ce paramètre climatique. On donne aussi un aperçu sur la Mission de mesure des précipitations tropicales (TRMM) qui a été utilisé dans cette étude ainsi que ses instruments de mesures.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons la zone d'étude et présenter les différentes stations pluviométriques et leurs données recueillies à partir de l'organisme ANRH, mais aussi les données de précipitation des satellites.

Dans le troisième chapitre, nous avons comparés la performance de deux produits de précipitations satellitaires, TRMM 3B42V7, et TRMM 3B42RT, avec les mesures des stations au sol en utilisant différents critères statistiques. Nous montrerons aussi les résultats de la comparaison ainsi qu'une discussion sur ces derniers.

Au chapitre quatre, nous discuterons des différentes méthodes utilisées pour l'ajustement des mesures satellitaires, à savoir les méthodes de Perceptron Multi Couches (PMC) et de la Fonction à Base Radiale (RBF).

Au chapitre cinq, nous présentons les résultats obtenus après ajustement des mesures satellitaires et une discussion à propos de cette amélioration.

CHAPITRE I

# Généralités sur les mesures des précipitations

# Chapitre I : Généralités sur les mesures des précipitations

## I.1. Introduction

Ce chapitre a été organisé comme suite : une section pour définir la précipitation et les moyens de mesure dans les stations pluviométriques et une autre pour définir les satellites météorologiques, les mesures de précipitations par satellite en plus d'un aperçu sur la Mission de mesure des précipitations tropicales (TRMM) et les instruments utilisés dans ce dernier.

## I.2. Définition de la précipitation

On englobe sous le terme de précipitation, toutes les eaux météoriques qui tombent à la surface de la terre, tant sous forme liquide (pluie, bruine) que solide (neige, grêle, grésil).

D'un point de vue physique, la pluie peut être définie comme des gouttes d'eau d'un diamètre variant entre 0,5 et 5 mm, tombant ou non sur le sol (reprise par l'évaporation ou par les mouvements de l'atmosphère) (Bennani, 2016).

La précipitation est caractérisée par leur quantité et leur régime pendant les temps et dans l'espace, la quantité de pluie disponible est un facteur important, il est donc nécessaire de connaître ses variations spatiotemporelles dans les stations pluviométriques (Ahmed, 2002).

### I.2.1. Différente forme de la pluie

Tout produit de condensation de vapeur d'eau atmosphérique formé à l'air libre ou à la surface de la terre est un hydrométéore. L'hydrologue est principalement intéressé par les précipitations (Bennani, 2016).

- **Bruine** est constitué de minuscules gouttelettes d'eau liquide, dont le diamètre est généralement compris entre 0,1 et 0,5 mm, avec de telles vitesses de décantation lente que parfois ils semblent flotter. Elles tombent habituellement de stratus bas et dépassent rarement 1 mm / h.
- **Pluie** est constituée d'eau liquide dont le diamètre dépasse essentiellement 0,5 mm. Ces précipitations se réfèrent généralement à des quantités de précipitations liquides.
- **Vernis** est la couche de glace, généralement claire et lisse, formé sur les surfaces exposées par le gel de l'eau en surfusion déposée par la pluie ou de la bruine. Sa densité peut être aussi élevée que 0,8 à 0,9.

## Chapitre I : Généralités sur les mesures des précipitations

- **Givre** est un dépôt blanc opaque de granules de glace plus ou moins séparées par l'air emprisonné et formées par la congélation rapide de l'eau en surfusion des gouttes tombant sur les objets exposés. Sa densité peut être aussi faible que 0,2 à 0,3.
- **La neige** est composée de cristaux de glace, principalement dans le complexe, ramifié forme hexagonale, et souvent agglomérés en flocons de neige, qui peuvent atteindre plusieurs centimètres de diamètre. La hauteur de la neige fraîchement tombée est très variable, 125 à 500 mm de neige est équivalent environ 25 mm d'eau liquide. La densité moyenne (poids spécifique) est souvent supposée être de 0,1.
- **La grêle** est une précipitation sous forme de billes de glace, produites dans les nuages convectifs, la plupart du temps cumulonimbus. Les grêlons peuvent être sphéroïdale, conique, ou de forme irrégulière, et la gamme allant d'environ 5 à plus de 125 mm de diamètre. Elles sont généralement constituées d'une alternance de couches de vernis et de Givre, et leur masse volumique est d'environ 0,8.
- **Grésil** se compose de transparents, globulaires, des grains solides de glace formée par la congélation de gouttes de pluie ou de regel de cristaux de glace presque entièrement fondus tombant à travers une couche de congélation secondaire d'air près de la surface de la terre (Bennani, 2016).

### I.2.2. Formation de la Précipitation

Durant son ascension dans l'atmosphère, la vapeur d'eau se refroidit et finit par se condenser, généralement autour de minuscules particules de poussière dans l'atmosphère. En se condensant, elle redevient liquide ou passe directement à l'état solide (glace, grêle ou neige). Ces particules d'eau s'assemblent pour former des nuages. Les précipitations sous forme de pluie, de neige et de grêle proviennent des nuages. Ces derniers tournent autour de la Terre grâce à l'action des courants atmosphériques. Par exemple, lorsqu'ils s'élèvent au-dessus de chaînes de montagnes, les nuages se refroidissent et deviennent tellement saturés de gouttelettes d'eau que ces dernières commencent à tomber en pluie, en grêle ou en neige, selon la température de l'air ambiant. Une partie de l'eau précipitée retourne vers l'atmosphère par le phénomène d'évaporation (Bennani, 2016).

### I.2.3. Classification des précipitations

Sur la base des phénomènes météorologiques qui leur donnent naissance, ou qui les accompagnent, on peut diviser les précipitations en trois classes :

# Chapitre I : Généralités sur les mesures des précipitations

- 1 . Précipitations de convection
- 2 . Précipitations orographiques
- 3 . Précipitations cycloniques ou fractales (front chauds ou froids, lignes d'occlusion etc.).

## I.2.3.1. Les précipitations convectives

Lorsque par temps calme, l'air saturé ou non, au voisinage du sol est chauffé par les radiations solaires (directement mais surtout indirectement par réflexion sur le sol), il se s'élève alors, car il subit des dilatations. Au cours de son ascension, il se refroidit et atteint un niveau de condensation où se forment les nuages (Ahmed, 2002).

Si le mouvement de convection vertical initial est intense et se poursuit suffisamment longtemps, le système nuageux ainsi formé peut atteindre une zone de température assez basse pour déclencher la pluie (Ahmed, 2002).

Des précipitations de convection surviennent également en zone tempérée et dans les régions chaudes, à peu près uniquement sous forme d'orage d'été locaux et violents, mais tous les orages ne proviennent pas de mécanismes convectifs (Bennani, 2016).

## I.2.3.2. Les précipitations orographiques

Lorsque les vents chargés d'humidité, soufflant généralement des océans vers les terres, abordent une barrière montagneuse, ou passent de la zone d'influence d'une mer relativement chaude à celle de vastes étendues de sol plus froid, les masses d'air humide ont tendance à s'élever et la détente qui en résulte produit un refroidissement qui peut entretenir la formation d'une couverture nuageuse et déclencher des précipitation. (Ahmed, 2002).

Ces précipitations, dites orographiques se présentent sous forme de pluie ou de neige sur les versants au vent de la barrière montagneuse.

Par ailleurs, l'obstruction produite sur le trajet des masses d'air humide par un massif montagneux engendre, sur le versant sous le vent, une zone de pluviosité relativement faible. L'air descendant sur ce versant s'échauffe par compression et son humidité relative diminue (effet de Föhn), il peut même en résulter un régime de vents secs et chauds donnant naissance à des zones semi-arides (Ahmed, 2002).

## Chapitre I : Généralités sur les mesures des précipitations

### I.2.3.3. Les précipitations frontales (ou de type cyclonique)

Lorsque plusieurs masses d'air de propriétés différentes (température et humidité) se rencontrent, les plus chaudes et les plus humides sont poussés vers les hautes altitudes où elles se refroidissent et se condensent. Ce sont ces précipitations qui sont les plus importantes, les plus longues, les plus étendues et les plus fréquentes dans nos climats tempérés. (Ahmed, 2002).

### I.2.4. Moyen de mesure de la précipitation

Le pluviomètre est un instrument de mesure qui sert à trouver la quantité de pluie tombée sur une région. Tout récipient a parois verticales peut servir comme appareil de mesures des précipitations (Ahmed, 2002).

La hauteur des précipitations qui atteint le sol pendant une période donnée est définie comme l'épaisseur (lame d'eau) que celles-ci couvriraient sur un plan (surface) horizontal, s'il n'y avait pas de perte par écoulement, infiltration et évaporation, et si les précipitations solides fondaient sur place, c'est-à-dire que toutes les précipitations reçues par celle-ci s'y trouvaient immobilisées (Bennani, 2016).

Si durant un certain intervalle de temps  $t$ , l'on récupéré un volume  $V$  à travers la surface réceptrice  $S$ , la hauteur de la pluie  $H$  tombée est donnée par la formule suivante (Ahmed, 2002) :

$$H(\text{mm}) = V / S$$

Dans le Système International d'Unités, la hauteur des précipitations est exprimée en millimètres (mm). Quand 1 millimètre est dans le pluviomètre cela équivaut à un litre d'eau au mètre carré (Bennani, 2016).

Il existe plusieurs sortes de pluviomètres, qui sont :

- **Les pluviomètres manuels** (Figure I.1) qui permettent de mesurer la hauteur de précipitation globale pendant un temps plus ou moins long. Ils sont relevés en général une à deux fois par jour. Si l'appareil est relevé moins fréquemment, par exemple tous les 15 jours, tous les mois, voire une à deux fois an, on dit alors que l'on observe un pluviomètre totalisateur (sont généralement fabriqué par les services techniques des services hydrologiques nationaux). (Bennani, 2016).

## Chapitre I : Généralités sur les mesures des précipitations



Figure I.1 - Pluviomètres manuel (Bennani, 2016).

- **Les pluviomètres optiques** (Figure I.2) Ils utilisent un faisceau laser transmis à un capteur. Lorsque les gouttes traversent le faisceau, elles projettent une ombre sur le capteur, qui mesure le taux de précipitation. « C'est une sorte de compteur de gouttes »



Figure I.2 : Les pluviomètres optiques

- **Les pluviographes enregistreurs** (Figure I.3) qui permettent d'étudier l'intensité des pluies sur différents intervalles de temps, en général de la minute à plusieurs heures, mais aussi de déterminer les pluies journalières ou les cumuls sur des pas de temps supérieurs (Bennani, 2016).

## Chapitre I : Généralités sur les mesures des précipitations



Figure I.3 : Pluviographe enregistreurs (Bennani, 2016).

- **Les pluviomètres à auget basculeur** (Figure I.4) Le collecteur dirige la pluie vers une sorte de petite balançoire tape-cul formée de deux réceptacles métalliques, ou augets, de petite taille de part et d'autre d'un axe horizontal. L'eau s'accumule dans celui à l'horizontale qui bascule quand il a atteint poids nécessaire, et se décharge de son eau par gravité. La quantité de précipitations est mesurée par le nombre de basculements effectués par les augets, détecté par un système mécanique ou optique.



Figure I.4 - Les pluviomètres à auget basculeur



## **Chapitre I : Généralités sur les mesures des précipitations**

Avec le développement de la météorologie, la prise de mesures de la précipitation se répand. Les pluviomètres se perfectionnent mais les principes de base demeurent les mêmes.

### **I.3. Les satellites météorologiques**

Les satellites météorologiques surveillent la terre et fournissent des données à utiliser pour prédire la météo. L'avertissement de toute catastrophe peut survenir au cours des jours et partout dans le monde. Exemple de ces mesures :

- Observer les nuages et connaître la hauteur et les types et contrôler le flux d'air. Surveiller et mesurer la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère.
- Mesure du rayonnement de la surface et de l'atmosphère de la Terre.
- Mesurez la température de la surface de la Terre, l'océan et le mouvement de la glace dans les pôles et la neige qui tombe.
- Contrôlez les courants élevés dans les mers et les océans.
- Surveillance des forêts et des volcans et retrait des cendres.
- Mesure de la température et de la pression atmosphériques dans les volumes et les épaisseurs atmosphériques (meteofrance, 2018).

#### **I.3.1. Mesure des précipitations par satellite**

Le développement récent des satellites météorologiques ouvre la voie à de nouvelles applications en pluviométrie, grâce à un suivi global des systèmes nuageux. Les satellites les mieux adaptés sont les satellites géostationnaires dont l'orbite, située à 36 000 km de la Terre, autorise une rotation synchrone avec celle-ci. Leur position relative par rapport au sol demeure constante, ce qui permet une fréquence d'acquisition d'image élevée.

Suivant la technologie des capteurs embarqués, on observera soit dans les longueurs d'onde du visible et de l'infra-rouge la couverture nuageuse, soit dans le domaine des hyperfréquences, les volumes d'eau présents dans l'atmosphère. Ces mesures étant de natures indirectes, il est nécessaire de se référer à des mesures directes effectuées au sol.

Si ces techniques sont employées couramment depuis une vingtaine d'années, leur utilisation à des fins de mesure quantitative de lames d'eau en est à ses balbutiements. (Bennani, 2016).

## Chapitre I : Généralités sur les mesures des précipitations

### a) Estimation de lames d'eau à de grands pas de temps (décade, mois, saison) :

Les premières méthodes exploitent des images infrarouges (IR) de la couverture nuageuse afin de détecter les cellules convectives intenses. Celles-ci atteignant des altitudes importantes sont plus froides que les sommets des nuages avoisinants ; en définissant un seuil de température, on distingue sur une image satellite IR, les pixels froids des autres. Leur nombre, observé sur une période déterminée (décade, mois, saison, année...), peut être corrélé à la quantité d'eau précipitée au cours de cette même période. Des résultats intéressants sont obtenus par exemple grâce au satellite Météosat sur l'Afrique subtropicale. (Bennani, 2016).

### b) Estimation de lames d'eau à de petits pas de temps (30 minutes, 1 heure...) :

Bras, 1990, décrit une méthode développée par Ingraham en 1980 couplant la succession des images visibles et infrarouges du sommet des nuages avec un modèle physique simplifié décrivant la convection d'une masse d'air humide. Les évolutions de la surface et de la température du sommet du nuage sont reliées à la vitesse ascensionnelle de l'air dans le nuage, laquelle conditionne le volume d'air humide subissant la convection. La quantité d'eau susceptible d'être condensée par unité de temps découle de cette masse d'air, de sa teneur en humidité et de l'efficacité du processus pluvigène. De telles méthodes restent largement du domaine de la recherche et ne font pas encore l'objet d'une utilisation opérationnelle. (Bennani, 2016).

Il existe également de nombreux satellites réputés pour leurs mesures du climat et qui ont joué un rôle actif dans les prévisions météorologiques et contribué au développement de la recherche scientifique, par exemple : PERSIANN (*Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks*), CMORPH (*Climate Prediction Center Morphing Method*), et le TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*).

Dans cette recherche nous avons utilisé le TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*).

### **I.3.2. Mission de mesure des précipitations tropicales (TRMM)**

La NASA et l'Agence japonaise d'exploration aérospatiale (JAXA) ont développé conjointement le TRMM. Le satellite a été lancé en novembre 1997 avec une hauteur d'orbite de 350 km, une inclinaison de 35 degrés et un synchronisme non solaire. En août 2001, l'orbite

## Chapitre I : Généralités sur les mesures des précipitations

du satellite a été ajustée à 407 km, afin de prolonger son cycle de vie opérationnel. Il fait le tour de la Terre 16 fois par jour. TRMM a commencé à produire des données continues depuis décembre 1997 (Jaxa, 2018).

Les TRMM sont les premiers satellites météorologiques conçus pour estimer quantitativement les précipitations tropicales et subtropicales. Le satellite a opéré en orbite non-héliosynchrone au même moment dans différents endroits, ce qui permet d'étudier les changements journaliers des précipitations. L'objectif principal de TRMM est de comprendre le cycle global de l'eau et de l'énergie à travers la mesure des précipitations tropicales et de la chaleur latente (Elbasit et al., 2017). Le satellite TRMM a été lancé le 27 novembre 1997 et les données de tous les instruments sont devenues disponibles environ 30 jours après le lancement.

Depuis lors, de nombreux progrès ont été réalisés dans l'étalonnage des capteurs, l'amélioration des algorithmes de pluviométrie et l'application de ces résultats à des domaines tels que l'assimilation des données et l'initialisation des modèles. (Kummerow et al., 2000)

### I.3.2.1. L'histoire de TRMM

La TRMM a été proposée comme projet conjoint entre les États-Unis, la NASA et le Japon, l'Agence nationale de développement spatial du Japon (NASDA) et le Laboratoire de recherche sur la communication (CRL). Le Japon a mis au point le premier radeau de précipitations spatial au monde et a fourni une fusée H-deux pour lancer le satellite TRMM.

Les États-Unis ont fourni l'observatoire, quatre autres capteurs et les systèmes d'exploitation des satellites. Les données d'observation TRMM sont traitées dans les deux pays et réparties entre les utilisateurs.

En Décembre 2003, six ans après le lancement du satellite, il continue d'observer d'excellente qualité, bien que la durée de vie du satellite soit de trois ans. L'altitude du satellite a été augmentée en août 2001 pour prolonger la durée de vie en réduisant la traînée atmosphérique (Jaxa, 2018).

## Chapitre I : Généralités sur les mesures des précipitations

Tableau I.1 : Histoire de satellite TRMM (Jaxa, 2018).

Date	Evénement
1978	Les LCR ont commencé le développement des radars de précipitations (PR).
1985	Le projet de satellite conjoint Japon-États-Unis a été proposé par la NASA (étude conjointe NASA / GSFC-CRL)
1986	Approbation par le SSLG d'une mission conjointe Japon-Etats-Unis
Janvier 1987	L'étude de faisabilité a été réalisée
1988	Le développement du modèle de tableau de bord de TRMM PR a été lancé (et s'est poursuivi jusqu'en 1993).
1991	La NASA a commencé le développement de TMI, VIRS, CERES et LIS.
1992	NASDA a commencé le développement de PR
27 November 1997	TRMM a été lancé
1-2 Décembre 1997	PR a été activé
9 Décembre 1997	Archiver la première image de PR
1998	TRMM niveau 1 produit a été libérés.
1 Septembre 1998	Tous les niveaux de produits TRMM ont été libérés.
2000	Le service de distribution de données d'images en temps quasi réel par EORC a été opérationnel.
28 Septembre 2000	Symposium commémorant le troisième anniversaire du Lancement du satellite TRMM a eu lieu
31 Janvier 2001	Achèvement de la ligne de mission conçue et début des opérations de poste.
7 Out 2001	L'altitude du satellite a été portée à 400 km de 350 km en août
3 Octobre 2001	Le site de la base de données des cyclones tropicaux TRMM a été ouvert
14 November 2002	Symposium commémorant le 5ème anniversaire du Lancement du satellite TRMM a eu lieu
Mars 2004	En cours d'exploitation.

## Chapitre I : Généralités sur les mesures des précipitations

### I.3.2.2. Objectif de la mission TRMM

Les précipitations jouent un rôle central et important dans le cycle hydrologique, qui est le facteur important du mécanisme de changement climatique. Les tropiques et les subtropiques contiennent 2/3 des précipitations totales sur la Terre et sont supposés conduire la dynamique de la circulation atmosphérique impliquée dans le réchauffement atmosphérique correspondant aux précipitations.

TRMM porte cinq instruments pour étudier ces mécanismes et semble conduire des observations de la pluviosité à l'échelle mondiale, y compris la région des océans tropicaux où les points d'observation sont rares. Il est prévu que des données très précieuses stockées par l'observation TRMM pour la recherche sur le changement climatique contribueront à des enquêtes sur le système climatique et les conditions météorologiques anormales impliquant El Niño, et la prévision des inondations pour prévenir les catastrophes (Jaxa, 2018).



Figure I.5 - satellites TRMM (Jaxa, 2018).

## Chapitre I : Généralités sur les mesures des précipitations

Tableau I.2 - Principales caractéristiques du satellite TRMM (Jaxa, 2018).

Lancer le poids	Environ. 3,62 tonnes
Lanceur	H-II Rocket
Date de lancement	28 novembre 1997 (JST)
Altitude	Environ. 350 km (402,5 km depuis le 24 août 2001)
Inclination	Environ. 35 degrés
Forme à	Décollage : 5,1 m (longueur), 3,7 m (diamètre) En orbite : 5,1 m (longueur), 14,6 m (dans la direction de
Poids	Total: 3620 kg [3524 kg], Carburant: 890 kg, Poids à sec : 2730 kg [2634 kg]
Puissance	Environ. 1100 W [Ave. 850 W]
Contrôle d'attitude	Zéro élan à trois axes stabilisés
Transmission de données	Via TDRS 32Kbps (temps réel), 2Mbps (lecture)
Vie de conception	3 ans et 2 mois
Instrument de mission	Radar de précipitation (PR) TRMM Micro wave Imager (TMI)

### I.3.2.3. Les instrumentes de TRMM

Le satellite TRMM dispose de 5 capteurs embarqués : le radar de précipitation (PR), l'imageur TRMM (TMI), le scanner infrarouge visible (VIRS), les nuages et le CERES (*Earth Radiant Energy System*) et le LIS (*Light Imaging Sensor*). PR peut également mesurer la pluie du satellite en mouvement rapide par un balayage électronique proche en utilisant une technique d'antenne à réseau de phasage. TMI mesure la distribution horizontale de la pluie soit des moyens de recevoir des signaux d'émission et de dispersion dans 5 canaux de micro-ondes de la pluie. TMI a trois fois la largeur d'andain aussi grande que PR. Bien que le TMI puisse mesurer les précipitations quantitatives sur l'océan, il est difficile de mesurer les précipitations exactes sur la terre ferme. L'observation VIRS est dans une large largeur de bande dans une résolution fine. Puisque la VIRS ne mesure pas directement les précipitations, le taux de précipitations est estimé à partir de la hauteur et des caractéristiques des nuages (Figure 6) (Jaxa, 2018).

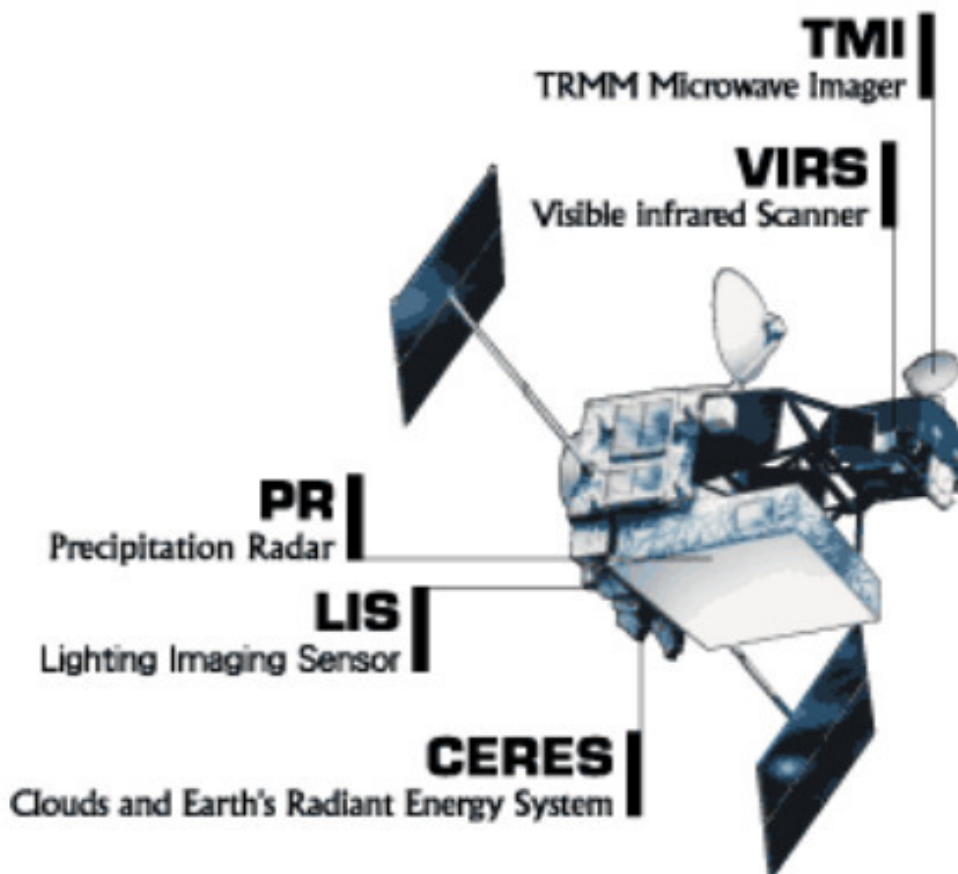


Figure I.6 - Schéma descriptif instrument du TRMM (Jaxa, 2018).

### I.3.2.3.1. Radar de précipitation (RP)

Le radar de précipitation (RP) à bord du TRMM est la première pluie spatioportée dans le monde. Il a été développé par la NASDA en collaboration avec le Laboratoire de recherche sur les communications (CRL) (Jaxa, 2018).

Les principaux objectifs du RP sont :

- de fournir une structure pluviométrique tridimensionnelle,
- de mesurer quantitativement les précipitations sur terre et sur océan, et
- d'améliorer la précision de la mesure TRMM par micro-ondes (TMI) en fournissant l'information sur la structure de la pluie.

## Chapitre I : Généralités sur les mesures des précipitations

Tableau I.3 - radar de précipitation (PR) (Jaxa, 2018) .

Objectifs de la mesure	Profil de pluie 3D Mesure quantitative des précipitations sur l'océan et la terre
Paramètre / Valeur	Fréquence d'observation 13,796 et 13,802 GHz Largeur de l'andain : 220 km / Gamme de résolution : 250 m / : 4,3 km

### I.3.2.3.2. TRMM Micro-ondes Imager (TMI)

Le TMI est un radiomètre hyperfréquences multi-canal / bipolarisé qui fournira des données relatives aux taux de précipitations sur les océans. Les données TMI ainsi que les données PR seront l'ensemble de données primaire de la mesure des précipitations. Les données TMI combinées avec les données du PR et du VIRS seront également utilisées pour obtenir le profil de précipitation (Jaxa, 2018).

Tableau I.4 - TRMM Micro-ondes Imager (TMI) (Jaxa, 2018).

Objectifs de la mesure	Taux de pluie sur l'océan
Paramètre / Valeur	Fréquence d'observation : 10,7 et 19,4 et 21,3 et 37,0 et 85,5 GHz Largeur de l'andain : 760 km / : 38.3 & 18.4 & 16.5 & 9.7 & 4.4 km

### I.3.2.3.3. Scanner infrarouge visible (VIRS)

Le VIRS est un radiomètre à balayage transversal passif qui mesure la radiance de la scène dans cinq bandes spectrales fonctionnant dans les régions spectrales du visible à travers l'infrarouge. La comparaison des données micro-ondes, visibles et infrarouges devrait fournir les moyens par lesquels la précipitation sera estimée de manière plus concluante par les seules données visibles et infrarouges (Jaxa, 2018).

Tableau I.5 - Scanner infrarouge visible (VIRS) (Jaxa, 2018).

Objectifs de la mesure	Distribution de nuages
Paramètre / Valeur	Bande d'observation : 0.63 & 1.6 & 3.75 & 10.8 & 12.0 $\mu\text{m}$ Largeur de bande : 720 km, résolution horizontale : 2 km



## Chapitre I : Généralités sur les mesures des précipitations

### I.3.2.3.4. Capteur d'imagerie de foudre (LIS)

Le LIS est un télescope à visée optique et un système d'imagerie par filtre qui permettra d'acquérir et d'étudier la distribution et la variabilité de la foudre intra cloud et de la foudre nuage-sol au-dessus de la terre. Les données LIS seront également utilisées avec les données PR, TMI et VIRS pour étudier la corrélation de l'incidence mondiale de la foudre avec les précipitations et autres propriétés de la tempête (Jaxa, 2018).

Tableau 1.6 : Capteur d'imagerie de foudre (LIS) (Jaxa, 2018).

Objectifs de la mesure	Répartition de la foudre
Paramètre / Valeur	Bande d'observation : 0.7774 $\mu\text{m}$ Largeur de bande : 600 km / Résolution horizontale : 4 km

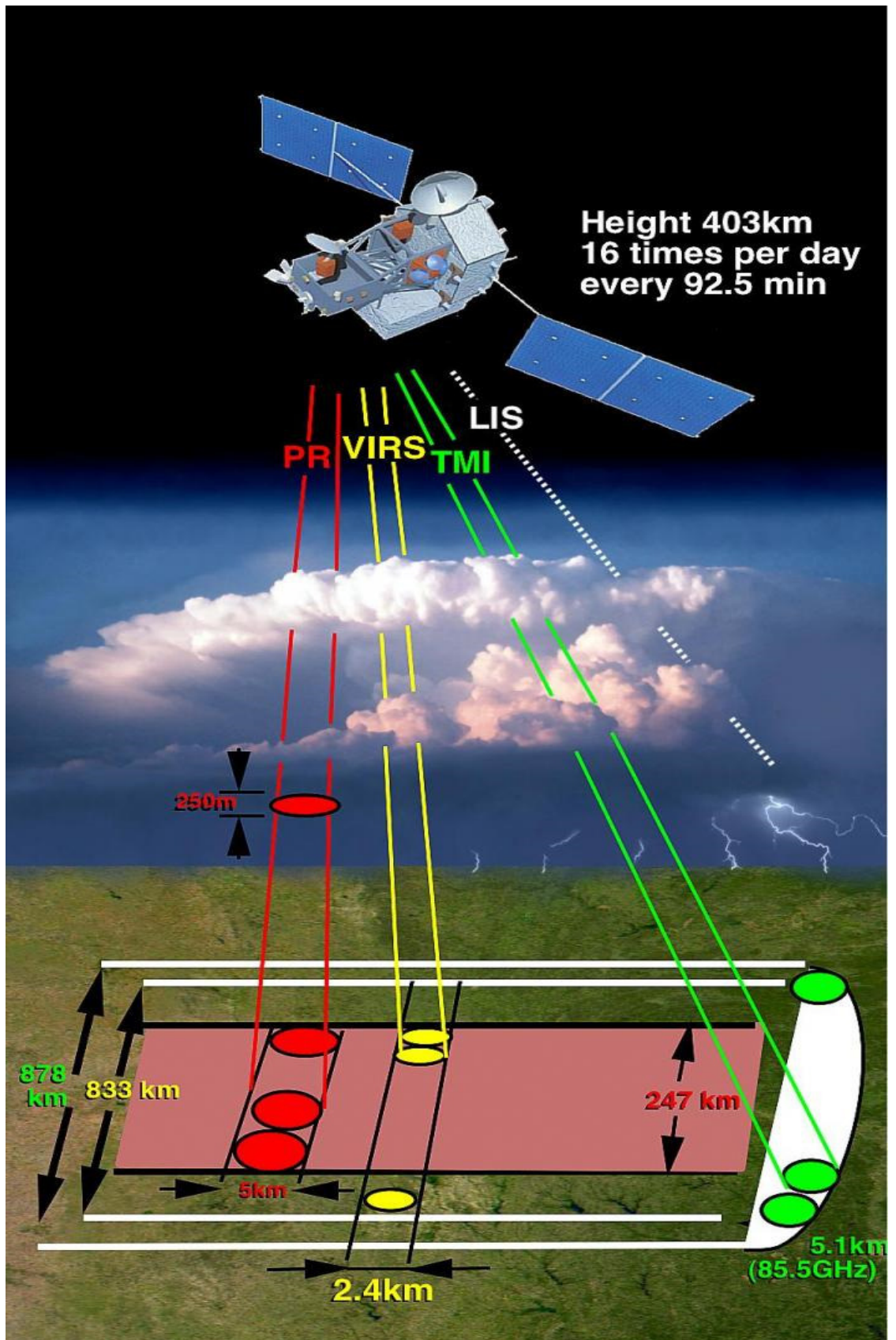


Figure I.7 - Diagramme du chemin de mesure des instruments TRMM.

## Chapitre I : Généralités sur les mesures des précipitations

### I.3.2.4. Le traitement des données

Les données 3B42RT sont disponibles environ neuf heures après les estimations en temps réel ce qui rend ce produit compatible avec les études de prédiction des crues. Le produit 3B42V7 incorpore les précipitations mensuelles du centre de climat de précipitation global (GPCC) pour la correction de biais, mais les données ne sont disponibles que 10-15 jours après la fin de chaque mois. Le produit 3B42RT utilise l'imageur micro-ondes de TRMM (en anglais *TRMM Microwave Imager* (TMI)) pour l'étalonnage, tandis que les produits de précipitation 3B42V7 est utilisés instrument de combiné de TRMM (en anglais *TRMM Combined Instrument* (TCI)). Les précipitations quotidiennes du TRMM 3B42V7 ont été estimées en additionnant 8 séries de précipitations sur 3 heures pour un jour donné à 00:00 UTC (Tan et al., 2015).

Les données utilisées ont été acquises à l'aide de la GES-DISC Visualisation en ligne interactif et l'analyse des infrastructures (Giovanni) dans le cadre des sciences de la Terre Goddard de la NASA (GES) Centre de données et des services d'information (DISC) (Tan et al., 2015).

## I.4. CONCLUSION

Une brève définition et une étude historique sur le développement des méthodes de mesures des précipitations, de pluviomètre direct au produits des précipitations satellitaires a été présenté. Nous avons aussi donné un aperçu sur la Mission de mesure des précipitations tropicales (TRMM) qui a été utilisé dans cette étude ainsi que ses instruments de mesures, et expliquons comment les deux produits (TRMM 3B42V7, et 3B42RT) traitent leur estimation.

Dans le chapitre suivant, on donne une présentation sur la zone d'étude, les différentes stations pluviométriques dont les données ont été recueillies à partir de l'organisme ANRH, mais aussi les données de précipitation satellitaires.

## CHAPITRE II

# Région d'étude et base de données

## II.1. Introduction

Ce chapitre a pour but de caractériser la zone d'étude, on y décrit son contexte géographique, morphométrique et hydrologique. Les différentes stations pluviométriques dont les données ont été recueillies à partir de l'organisme ANRH ainsi que les données de précipitation satellitaire sont aussi décrits.

Le sous bassin qui est codé (1406) par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH), et qui fait partie du grand bassin de Seybous (14) a été le sujet de cette étude.

## II.2. Situation géographique

Le sous bassin de oued Seybouse maritime (Mebarki, 2005) est situé au Nord Est Algérien (entre les Latitude  $36^{\circ} 56'$ ,  $36^{\circ} 24'$  et Longitude  $7^{\circ} 53'$ ,  $7^{\circ} 26'$ ). Ce sous bassin fait partie des surfaces de trois Wilaya (Annaba et El-Tarf et Guelma).

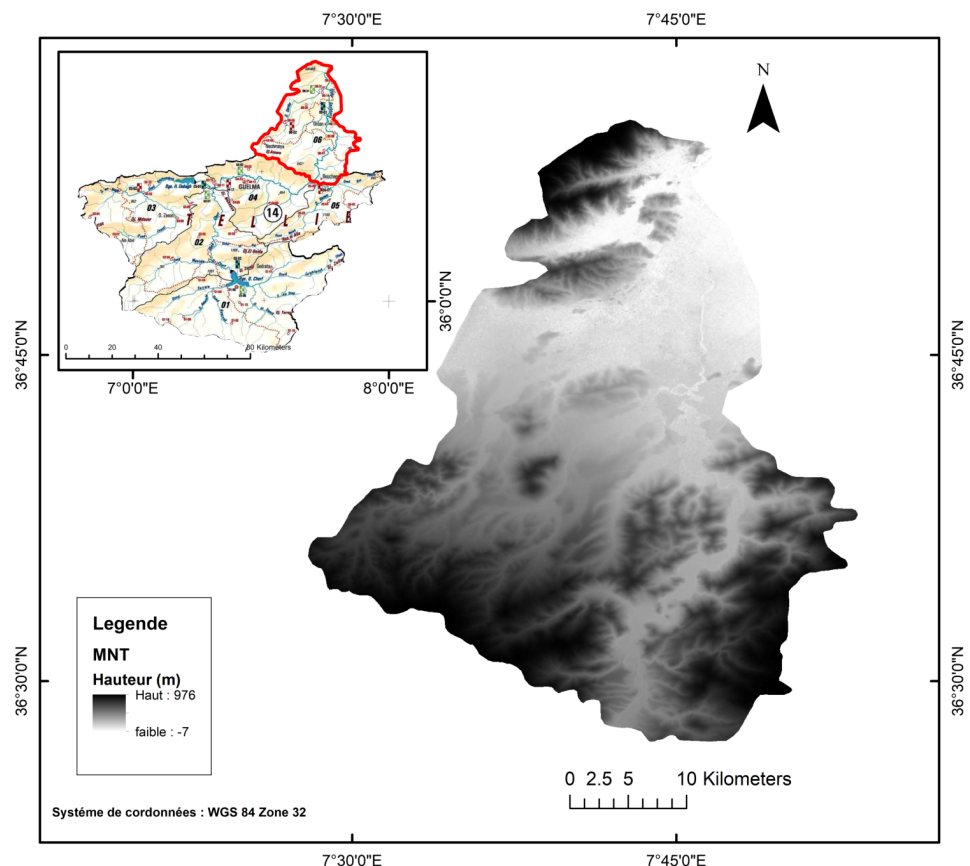


Figure II.1 - Localisation du sous bassin (1406) par rapport au bassin de la Seybous

### II.3. Caractéristique du sous bassin

Dans le but d'extraire les caractéristiques morphométrique du sous bassin versant (1406), un Modèle Numérique Terrain (MNT) (en Anglais Digital Elevation Model ou DEM) a été utilisé dans un logiciel de SIG (Système d'information géographique). Extrait d'une image satellitaire couvrant l'ensemble du continent africain (diffusion sur Internet par EROS Data Center de l'U.S Geological Survey).

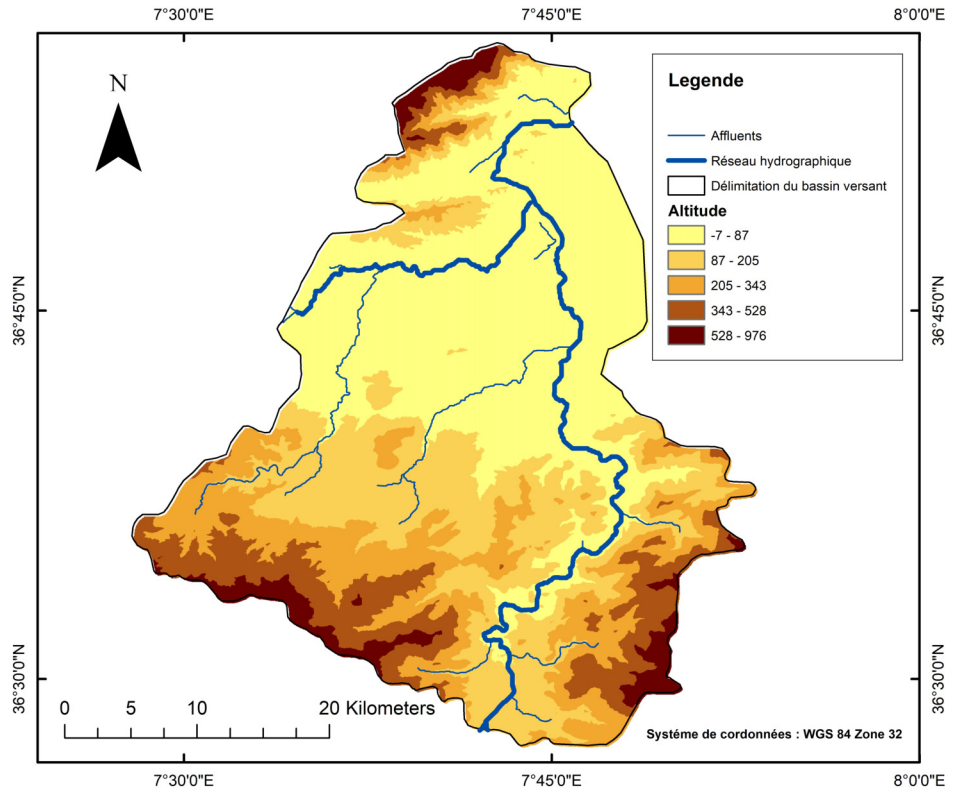


Figure II.2 - Relief et talwegs du sous bassin (1406)

Le sous bassin de oued Seybouse maritime draine une superficie de 1066 km<sup>2</sup> (Figure II.2) dont l'élévation varie entre -7 m et 976 m, avec une longueur du talweg principal mesuré à 69,8 km.

A partir d'un Modèle Numérique Terrain (MNT), une carte des reliefs du sous bassin (1406) a pu être extraite et est montrée dans la (Figure II.2).

## II.4. Base de donnée

### II.4.1. Pluie

Les données de mesure des précipitations journalières, enregistrées par sept stations pluviométriques (Tableau II.1), ont été fournies par L'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH). Les critères de choix des données se basent essentiellement sur la disponibilité des séries concomitantes et la situation géographique de leurs stations de mesures (densité du réseau pluviométrique). La période sélectionnée commence à partir de 1998 jusqu'à 2004. Ce choix est imposé non seulement de la disponibilité des données mais aussi du fait que la mission du satellite TRMM (utilisé dans cette étude) ne commence qu'à partir de 1998.

Le (Tableau II.1) indique la situation géographique des stations (longitude, latitude)

Tableau II.1 - Caractéristiques des stations pluviométrique principaux à travers la Zone d'étude, du L'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH)

NO	ID	Nom de La Station	LON	LAT
1	140609	-	7,66	36,75
2	140611	-	7,76	36,69
3	140631	-	7,72	36,81
4	140607	Boukhamouza	7,73	36,57
5	140505	Bouhegouf	7,70	36,45
6	140606	Ain berda	7,58	36,68
7	140605	Nechmaya	7,50	36,60

L'emplacement des stations de l'ANRH qui est distribué dans le sous bassin (1406) est représenté dans la (Figure II.3). Ces stations couvrent pratiquement la majeure partie du sous bassin (1406).

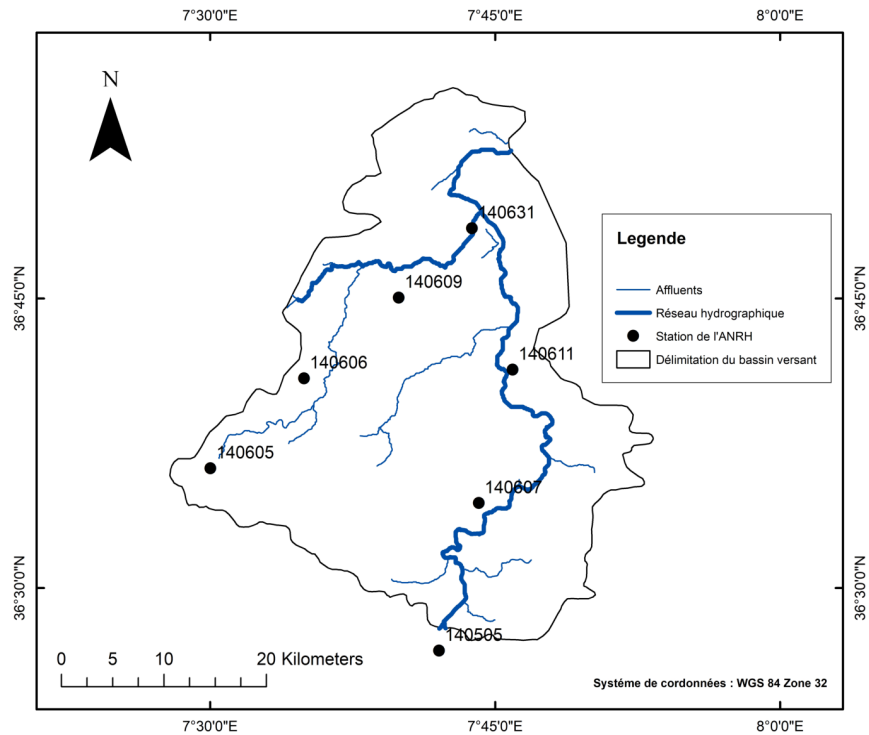


Figure II.3 - Localisation des stations pluviométrique dans le sous bassin (1406)

Les précipitations annuelles des stations pluviométrique du l'ANRH sont présentées dans la (Figure II.4). On peut visualiser dans cette dernière le minimum, la médian, le premier et le troisième quartile ainsi que le maximum des séries pluviométriques.

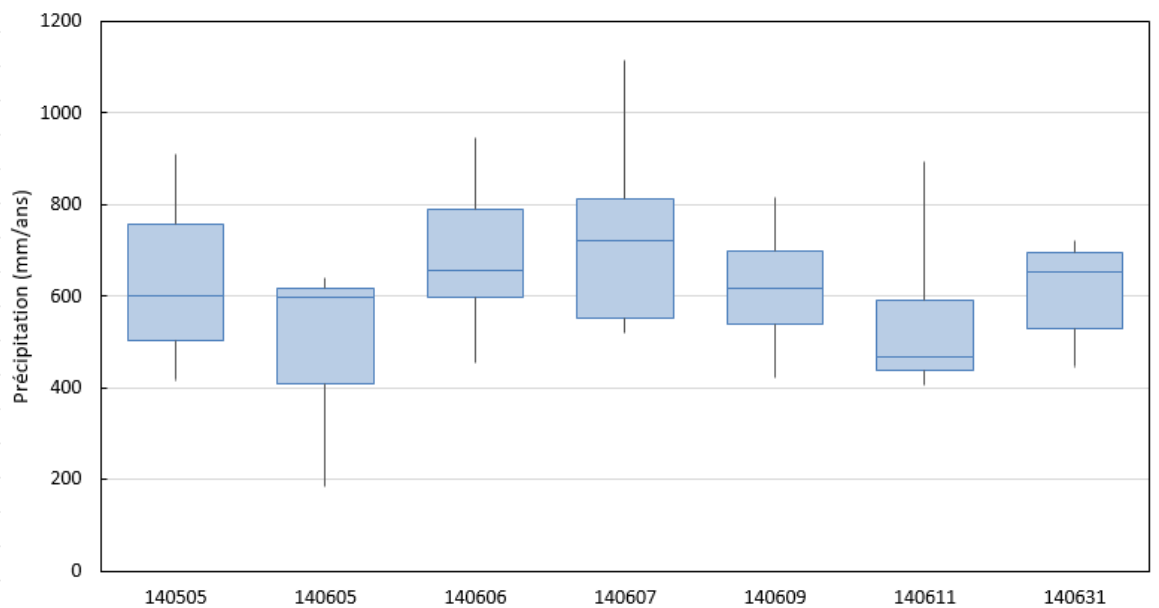


Figure II.4 – Distribution des séries pluviométriques dans les différentes stations (1998-2004)



En analysant la (Figure II.4), on remarque que la station (140607) c'est la station la plus pluvieuse pour la période 1988-2004. La station (140605) a enregistré la plus faible précipitation dans la même période.

Le (Tableau II.2) regroupe les 7 stations retenues. Ainsi que les caractéristiques des séries de données (dates de début et fin des séries, pourcentage de valeurs manquantes).

Tableau II.2 - caractéristiques des séries de données

NO	ID	Début série	Fin série	Total série	Présent	Valeurs manquantes	% Présent	% Valeurs manquantes
1	<b>140609</b>	01/01/1998	30/04/2004	2312	2281	<b>31</b>	98.66	<b>1.34</b>
2	<b>140611</b>	01/01/1998	30/04/2004	2312	2252	<b>60</b>	97.40	<b>2.60</b>
3	140631	01/01/1998	30/04/2004	2312	2312	0	100	0
4	140607	01/01/1998	30/04/2004	2312	2312	0	100	0
5	140505	01/01/1998	30/04/2004	2312	2312	0	100	0
6	140606	01/01/1998	30/04/2004	2312	2312	0	100	0
7	140605	01/01/1998	30/04/2004	2312	2312	0	100	0

L'inventaire des séries brutes journalières de précipitation rend compte des périodes des lacunes dans les données. Les stations (140609 et 140611) ont un taux de valeurs manquantes (1.34% et 2.60% respectivement). La première station est manquée un mois (08/1999), et la deuxième station est manquée 2 mois (09/1998 et 04/1999).

### II.4.2. Produits de précipitation satellitaires

Deux produits TMPA (*The TRMM multisatellite precipitation analysis*) sont utilisés dans cette étude, le TRMM 3B42RT et le TRMM 3B42V7. Le (Tableau II.3) présente des informations de base sur la résolution spatiale, la couverture et les périodes disponibles pour les deux produits. Les données 3B42RT sont disponibles environ neuf heures après les estimations en temps réel ce qui rend ce produit compatible avec les études de prédiction des crues. Le produit 3B42V7 incorpore les précipitations mensuelles du centre de climat de précipitation global (GPCP) pour la correction de biais, mais les données ne sont disponibles que 10-15 jours après la fin de chaque mois. Le produit 3B42RT utilise le TRMM Microwave Imager (TMI) pour l'étalonnage, tandis que les produits de précipitation TRMM Combined Instrument (TCI) sont utilisés dans 3B42V7. Les précipitations journalières du TRMM 3B42V7

ont été estimées en additionnant 8 séries de précipitations sur 3 heures pour un jour donné à 00:00 UTC (Tan et al., 2015).

Les données utilisées ont été acquises à l'aide de la GES-DISC Visualisation en ligne interactif et l'analyse des infrastructures (Giovanni) dans le cadre des sciences de la Terre Goddard de la NASA (GES) Centre de données et des services d'information (DISC) (Tan et al., 2015).

Tableau II.3 : Informations sur les produits de précipitation de satellites utilisés dans cette étude,

No	Nom	Spatiale/Temporelle	Couverture	Période
1	3B42RT	0,25°/ journalières	globale (50°N–S)	2000–présent
2	3B42V7	0,25°/ journalières	globale (50°N–S)	1998–présent

Les séries de la précipitation pour les deux produits sont obtenues dans un fichier Excel, à partir au site de Giovanni [<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>].

### II.5. Conclusion

Une description de la zones d'étude ainsi que les données (au sol et satellitaires) ont été présenté dans ce chapitre. Nous pouvons dire que La région d'étude est caractérisée par un climat méditerrané (humide). Les précipitations annuelles sont très hautes, on a un manque des données dans les stations (140609 et 140611) ont un taux de valeurs manquantes (1.34% et 2.60% respectivement).les données de précipitation de pluviométrique ont été fournies par L'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH), les données des produits satellitaires ont été acquises à l'aide de la Giovanni.

Dans le chapitre suivant on a comparés la performance de deux produits de précipitations satellitaires, TRMM 3B42V7 et TRMM 3B42RT présenté dans ce chapitre avec les mesures des stations au sol. Différents critères statistiques ont été utilisés pour la comparaison. Enfin, les résultats de cette dernière ont été discutés.

## CHAPITRE III

# Evaluation des précipitations satellitaires

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous avons comparé la performance de deux produits de précipitation satellitaires, TRMM 3B42V7, et TRMM 3B42RT, avec les mesures des stations au sol. La précision de chaque produit de précipitation a été évaluée à l'échelle de temps journalière en comparant les estimations des précipitations avec les observations de sept pluviomètres répartie dans le sous bassin (1406). La comparaison a été effectuée de janvier 1998 à décembre 2004.

### III.2. Etat de l'art

Diverses études examinant la performance et l'utilité des satellites précipitation produit sont déjà apparues. Liu et al. (2015) ont fait la comparaison entre trois satellites produits (TRMM 3B42, CMORPH, PERSIANN) et les stations pluviométriques, D'abord, ils ont converti les données du pluviomètre en précipitations de surface à la même échelle que les produits de précipitation par satellite en utilisant la méthode du polygone de Thiessen. Les critères statistiques utilisés pour l'évaluation ont été le coefficient de détermination ( $R^2$ ), le BIAIS, L'erreur quadratique moyenne (RMSE), et le RMSE%. Xue et al. (2013) ont étudié l'évaluation quantitative de l'analyse de précipitation multi-satellite (TMPA) de la mission de mesure des précipitations tropicales (TRMM), ils ont utilisé trois indices statistiques qui sont le BIAIS relatif (%), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le coefficient de corrélation (CC) afin d'analyse les performances des produits de précipitation 3B42V6 et 3B42V7 par rapport aux observations de pluviométrie. Tan et al. (2015) ont évalué six produits de précipitation à haute résolution par satellite et au sol en Malaisie. Ils ont utilisé diverses mesures statistiques pour évaluer les performance des différents produits de précipitations satellitaires par rapport aux données des pluviomètres, en utilisant le coefficient de détermination ( $R^2$ ), l'erreur quadratique moyenne (RMSE), l'erreur absolue moyenne (MAE), l'erreur moyenne (ME), le BIAIS relatif (RB). Franchito et al. (2009) ont validé le radar de précipitations (PRM) de la Mission de mesure des précipitations tropicales (TRMM) au Brésil, ils ont comparé les estimations PRM TRMM aux données des stations pluviométriques. Pour la comparaison ils ont utilisé divers indicateurs statistiques tel que, le pourcentage ou le MBE relatif (% MBE), l'erreur absolue relative (% AE) et le RMSE relatif (% RMSE) et le coefficient de corrélation (CC).

### III.3. Méthodologie

Les données du pluviomètre et les données des produits de précipitation par satellite ont été transformées en précipitations surfacique (bassin versant). Pour réaliser une telle transformation, de nombreuses méthodes d'interpolation peuvent être utilisées, telles que la méthode dite polygone de Thiessen.

#### III.3.1. Polygone de Thiessen

C'est une méthode simple et direct, les valeurs de pluie observées sur un point sont affecté aux zones qui ne sont pas couvert par des stations de mesure (Thiessen 1911). La procédure consiste a divisé la zone d'étude en polygones, ce dernier a une seule mesure observée qui représente la totalité de l'air ( $A_i$ ) qui la couvre. La précipitation moyenne pondérée  $P_{moy}$  pour le bassin, se calcule alors en effectuant la somme des précipitations  $P_i$  de chaque station, multipliées par leur facteur de pondération (aire  $A_i$ ), le tout divisé par la surface totale  $A$  du bassin (Boulmaiz, 2016). La précipitation moyenne sur le bassin s'écrit comme dans :

$$P_{moy} = \frac{\sum_{i=0}^n A_i \cdot P_i}{A}$$

Avec :

$P_{moy}$  : précipitation moyenne sur le bassin

$A$  : aire totale du bassin

$P_i$  : précipitation enregistrée à la station  $i$

$A_i$  : superficie du polygone associée à la station  $i$

La (Figure III.1) montre les surfaces résultant des polygones de Thiessen et qui ont été tracé en utilisant les stations pluviométrique. Nous avons calculé la surface des polygones par rapport au sous bassin (1406). Chaque mesure d'une station a été attribuée à l'intersection de la surface du polygone et du sous bassin couvrant son emplacement. Le ratio de cette surface par rapport à la surface totale du sous bassin est multiplié par la mesure de la station et enfin une somme de tous les résultats trouvés est effectué pour obtenir une pluie surface de tout le sous bassin. Pour mettre en lumière la procédure de cette approche, on donne l'exemple de la station « 140631 », la surface de son polygone est de 172.4 km<sup>2</sup> c-à-dire 16,17% de la surface totale du sous bassin. L'étape suivante est la détermination de la pluie tombée dans le polygone.

### Chapitre III : Evaluation des précipitations satellitaires

Pour le jour 19/01/1998, on observe dans cette station une pluie de 33.3 mm et on multiplie cette valeur par le ratio de surface trouvé (16.17%) pour trouver la pluie représentative de la première surface. Cette opération est répétée pour chaque station et les résultats trouvés sont additionnés.

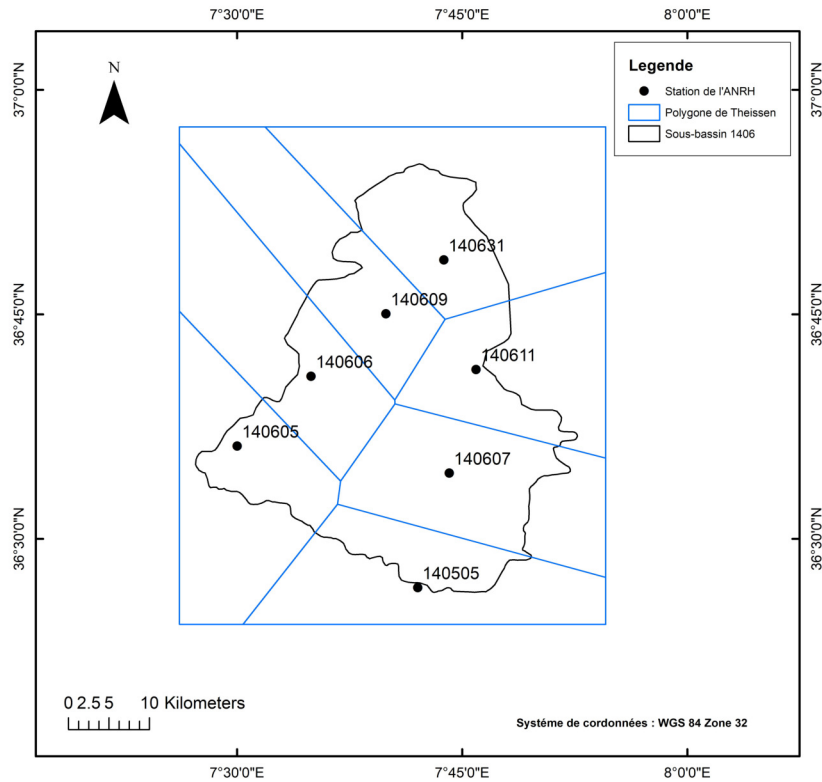


Figure III.1 - Emplacements des stations pluviométriques et Division des surfaces du sous bassin (1406) par rapport aux polygones de Thiessen

Pour la transformation des données des produits satellitaires, le même processus a été appliqué sur les grilles des satellites. Ce dernier estime la précipitation qui tombe par grille ( $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ ). Pour rappel, les données sont disponibles à 10-15 jours après la fin de mois pour le produit 3B42V7, pour 3B42RT sont disponibles environ neuf heures après les estimations en temps réel.

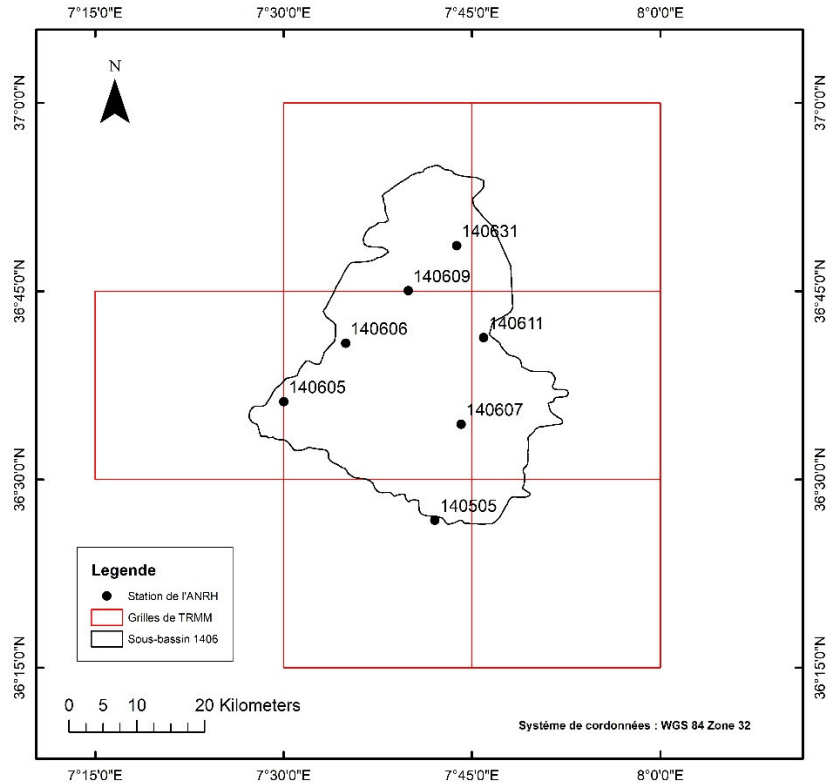


Figure III.2 - Emplacements des stations pluviométriques et couverture spatiale de grille de TRMM

Nous avons calculé la surface de chaque grille par rapport au sous bassin (1406). Le ratio de chaque surface des grilles par rapport au sous bassin a été multiplié par les précipitations des deux produits (TRMM 3B42V7, 3B42RT). Nous avons appliqué le même processus effectué dans la méthode du polygone de Thiessen, pour la période 1998-2004 du produit 3B42V7 et la période 2000-2004 du produit 3B42RT.

La comparaison a été effectuée de janvier 1998 à décembre 2004. Afin de déterminer la performance globale des produits de précipitation. Les comparaisons entre les données pluviométriques et les données TRMM 3B42 et 3B42RT ont également été effectuées spécifiquement pour chaque jour au cours de la période sélectionnée.

### III.4. Les critères d'efficacité

Nous avons utilisé divers mesures statistiques pour évaluer la performance des deux produits de précipitations satellitaires par rapport aux données des pluviomètres. On a utilisé le coefficient de détermination ( $R^2$ ), le BIAIS, La racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) ainsi que le RMSE%. Le coefficient de détermination ( $R^2$ ) est largement utilisé comme moyen

### Chapitre III : Evaluation des précipitations satellitaires

de quantifier la corrélation entre deux ensembles de données (dans ce cas, l'un des différents produits de précipitations satellitaires et les données pluviométriques), La valeur de  $R^2$  varie entre 0 (aucune corrélation) et 1 (corrélation parfaite) (Tan et al., 2015). Le BIAIS reflète le degré auquel la valeur mesurée est surestimée ou sous-estimée (Duan, Bastiaanssen, and Liu, 2012). La racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) a été utilisée comme mesure statistique standard pour mesurer la performance. Le RMSE est fréquemment utilisé, mesure des différences entre deux variables. Le %RMSE est calculé en tant que RMSE divisé par la moyenne de précipitation des données pluviométrique, et il peut être utilisé pour évaluer la fiabilité du produit de précipitation par satellite. Lorsque %RMSE est inférieur à 50%, les données de précipitation par satellite sont considérées comme fiables, alors qu'elles ne sont pas fiables lorsque %RMSE est égal ou supérieur à 50% (Liu et al., 2015). Les équations permettant d'évaluer tous ces indicateurs statistiques sont décrites comme suit :

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2$$

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n M_i} - 1$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - M_i)^2}{n}}$$

$$\%RMSE = \frac{RMSE}{\bar{M}}$$

Où  $P_i$  est la précipitation cumulative de bassins hydrographique à partir des données de précipitations par satellite,  $M_i$  est la précipitation à l'échelle du bassin versant agrégée à partir de pluviomètres.  $n$  le nombre total des données,  $\bar{P}$  la moyenne de  $P_i$ , et  $\bar{M}$  la moyenne de  $M_i$ .

#### III.5. Résultats de la comparaison et discussion

Nous avons comparés la performance de deux produits de précipitations satellitaires, TRMM 3B42V7, et TRMM 3B42RT, avec les mesures des stations au sol. Les données utilisées pour la comparaison sont les précipitations surfaciques (les données des stations et les données des produits satellitaires à l'échelle du bassin).



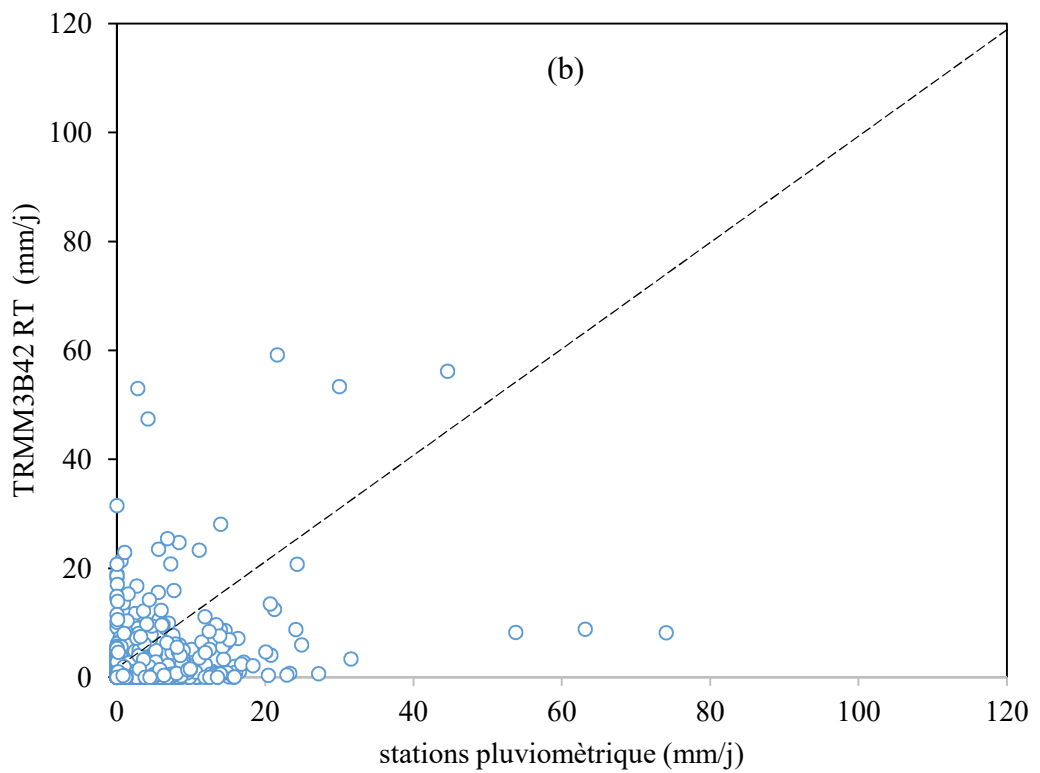
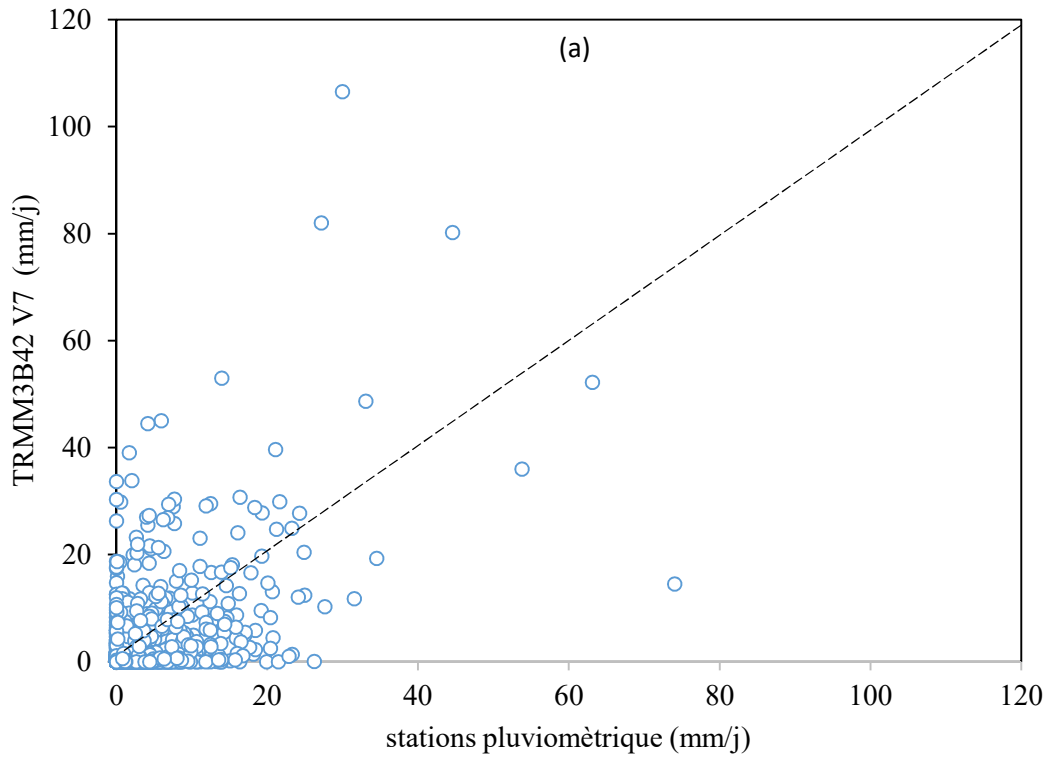


Figure III.3 – Nuages de points des précipitations journalières des stations par rapport aux (a) TRMM 3B42 (pendant la période 1998-2004) et (b) TRMM 3B42RT (pendant la période mars 2000-2004), à l'échelle de bassin versant

### Chapitre III : Evaluation des précipitations satellitaires

En analysant la (Figure III.3) on peut voir que l'estimation de 3B42RT montre un grand écart avec les données des stations avec un  $R^2$  de 0,14. Par contre la 3B42V7 avec  $R^2$  de 0,3.

Le (Tableau III.1) présente l'analyse des précipitations journalières entre les données des produits satellitaires (1998-2004 pour 3B42V7, 01 mars 2000-2004 pour 3B42RT) et les données de stations. Les données 3B42V7 montrent un meilleur accord avec les données de stations avec un  $R^2$  de 0,3 alors que le  $R^2$  du produit 3B42RT est égale à 0,14. Selon le critère BIAIS qui est positif, les mesures du produit 3B42V7 sont surestimées. Par contre les mesures du produit 3B42RT sont sous-estimée (BIAIS = -0,272). Le produit 3B42RT présente un RMSE le plus bas (5.1mm) par rapport au produit 3B42V7 (5.14 mm).

Tableau III.1 - Analyse statistique des précipitations journalières (1998-2004 pour 3B42V7, 01 mars 2000-2004 pour 3B42RT) entre les produits de précipitation satellitaires et les stations.

Temps		3B42V7	3B42RT
Journalière	$R^2$	0,3	0,14
	BIAIS	0,003	-0,272
	RMSE	5,14 mm	5,11 mm

La (Figure III.4), représente le RMSE% de deux produits de précipitation satellitaires (3B42V7 et 3B42RT) pour déférente intensité de précipitation (divisé en fonction des données des stations),

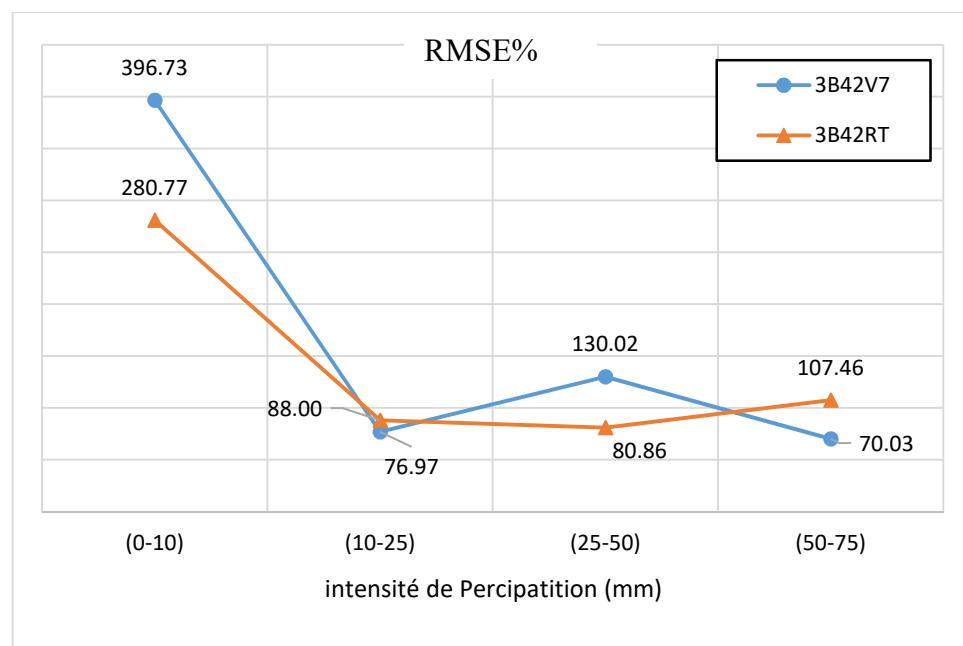


Figure III.4 - RMSE% de produits de précipitation satellitaires (3B42V7 et 3B42RT) pour déférente intensité de précipitation

### Chapitre III : Evaluation des précipitations satellitaires

En analysant la (Figure III.4) Généralement, le RMSE% a diminué avec l'augmentation de pluie intensité pour les deux produits de précipitation. Pour les précipitations moins de 10 mm, le RMSE% de deux produits a été tout haut (supérieur à 250), tandis que pour les précipitations plus de 10 mm, RMSE% les deux diminué de façon spectaculaire (inferieur a 100).

Les deux produits de précipitation avait relativement grande erreurs pour les petites précipitations, lorsque les précipitations intensités ont été plus grandes que 50 mm, les valeurs de RMSE% sont supérieur à 50% (107.46 pour 3B42V7, 70.03 pour 3B42RT lorsque l'intensité ont été 50–75mm).

Ces résultats qui sont en accord avec l'étude de Liu et al. (2015) indiquent que les données des deux produits ne sont pas fiables et cela est confirmé par le critère RMSE% qui est supérieur à 50%.

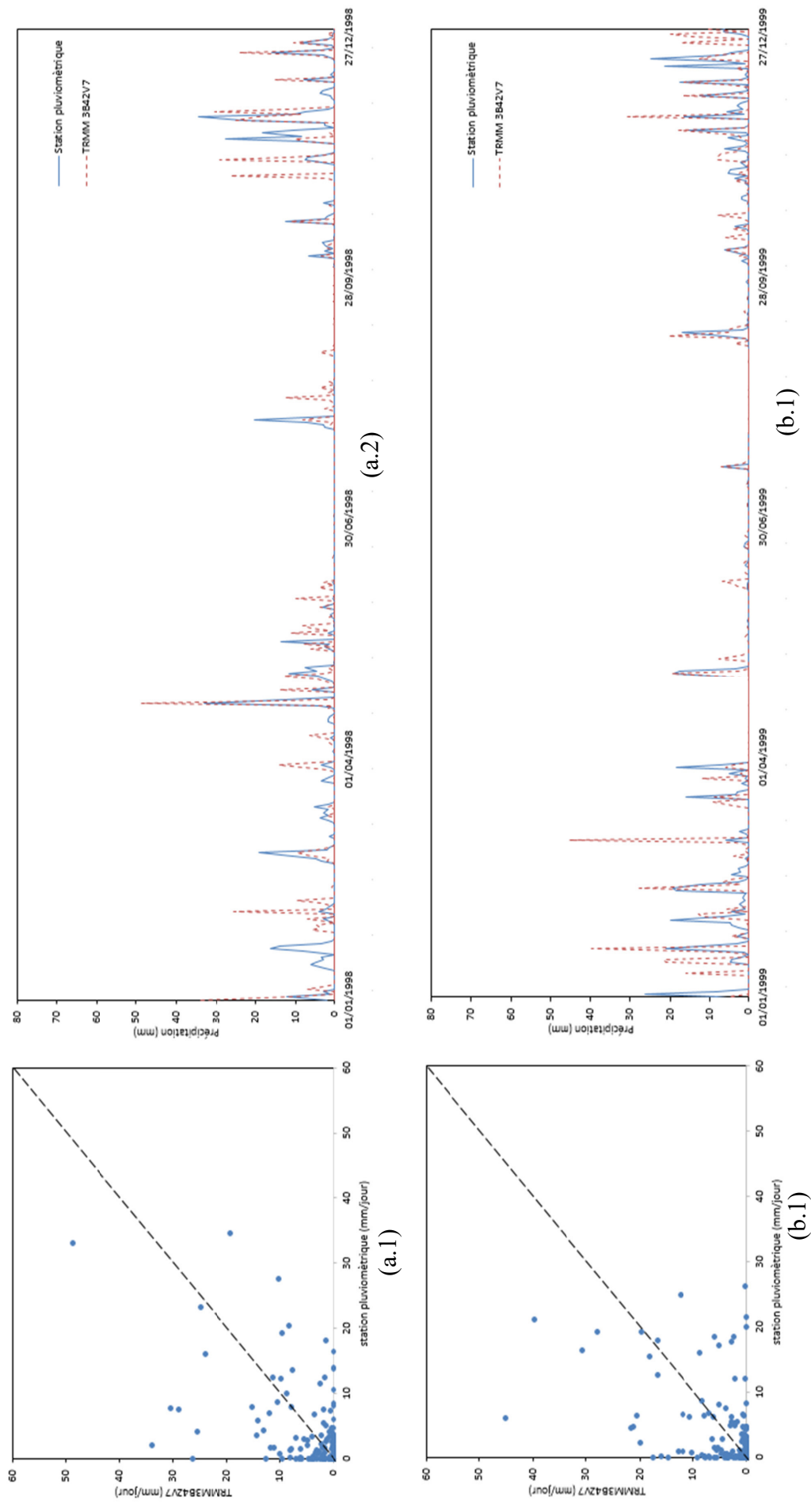


Figure III.5 : diagramme de dispersion et les Séries chronologiques de précipitations journalières des stations et les données de TRMM 3B42V7, 1998 et 1999.

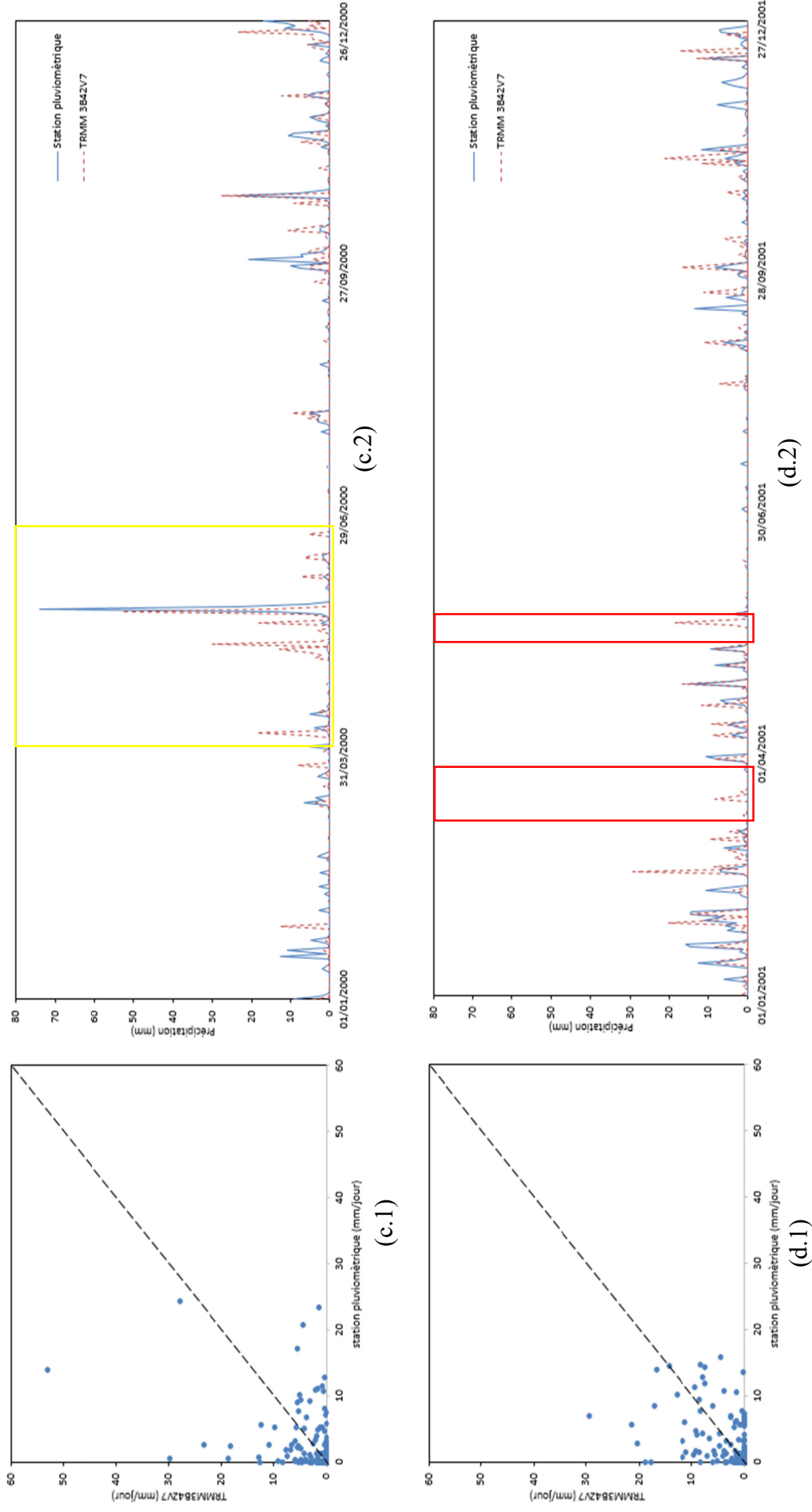


Figure III.6 : diagramme de dispersion et les Séries chronologiques de précipitations journalières des stations et les données de TRMM 3B42V7, 2000 et 2001.

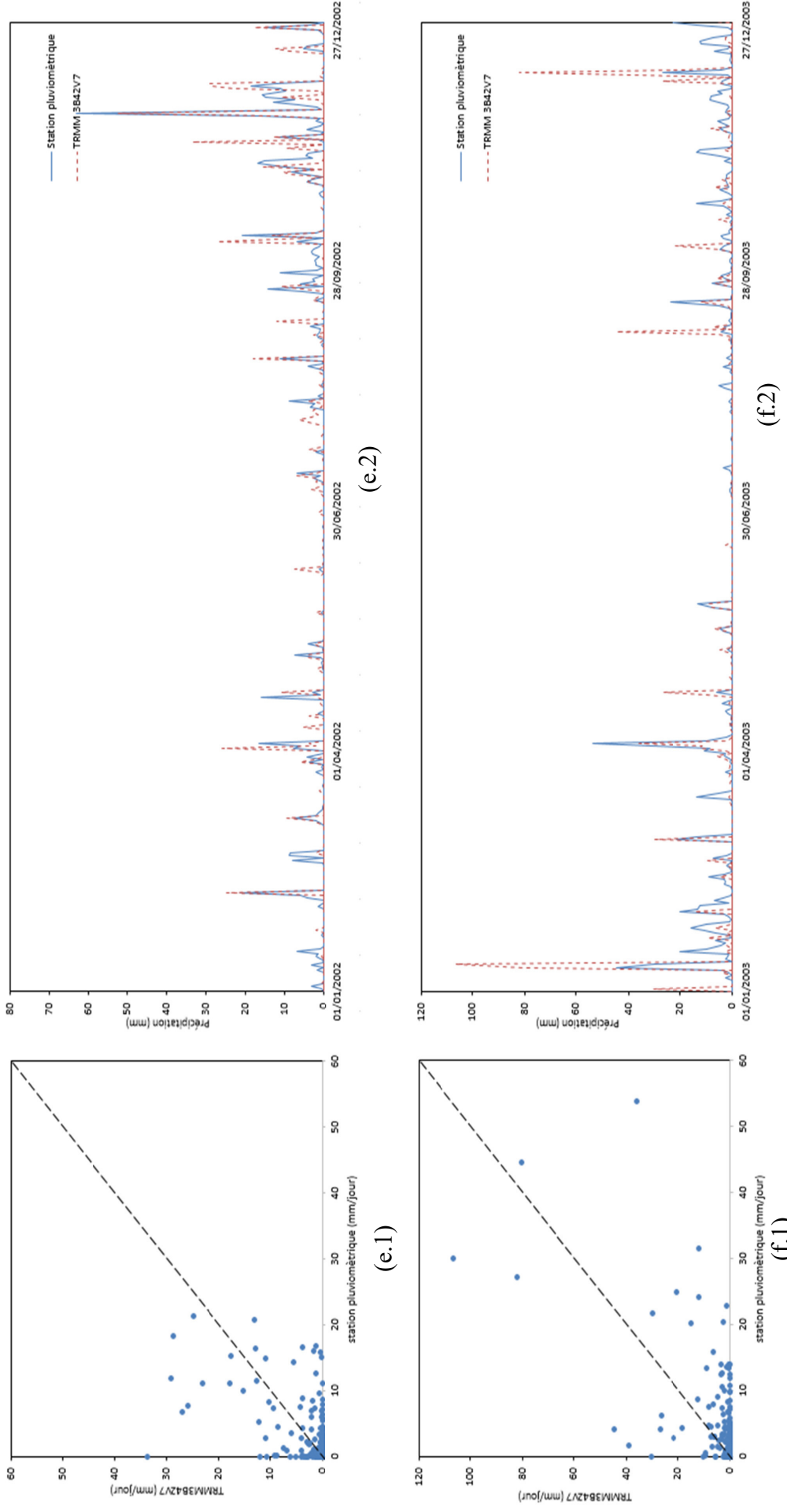


Figure III.7 : diagramme de dispersion et les Séries chronologiques de précipitations journalières des stations et les données de TRMM 3B42V7, 2002 et 2003.

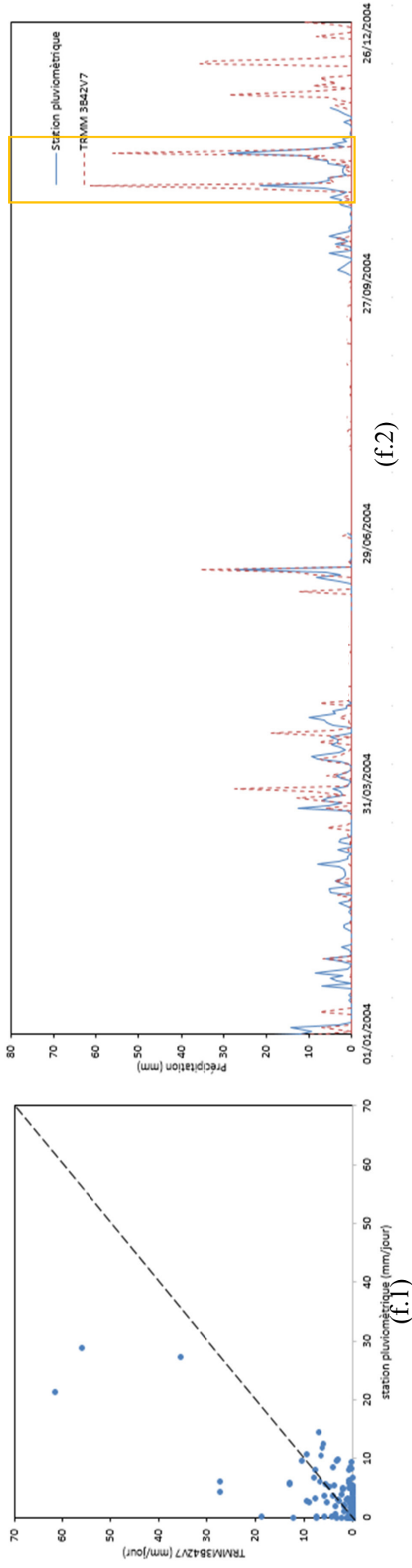


Figure III.8 : diagramme de dispersion et les Séries chronologiques de précipitations journalières des stations et les données de TRMM 3B42V7, 2004.

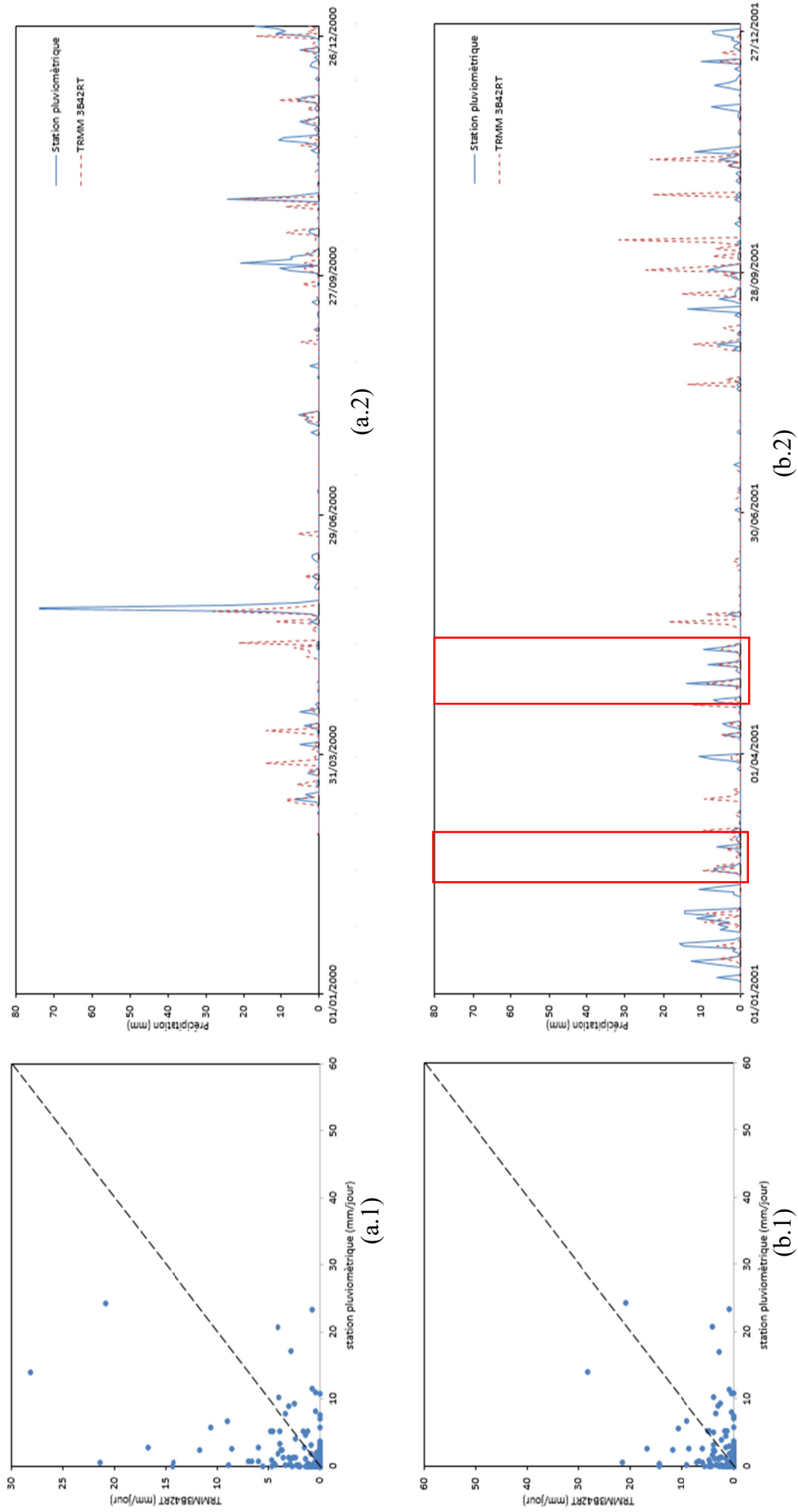


Figure III.9 : diagramme de dispersion et les Séries chronologiques de précipitations journalières des stations et les données de TRMM 3B42RT, 2000 et 2001.



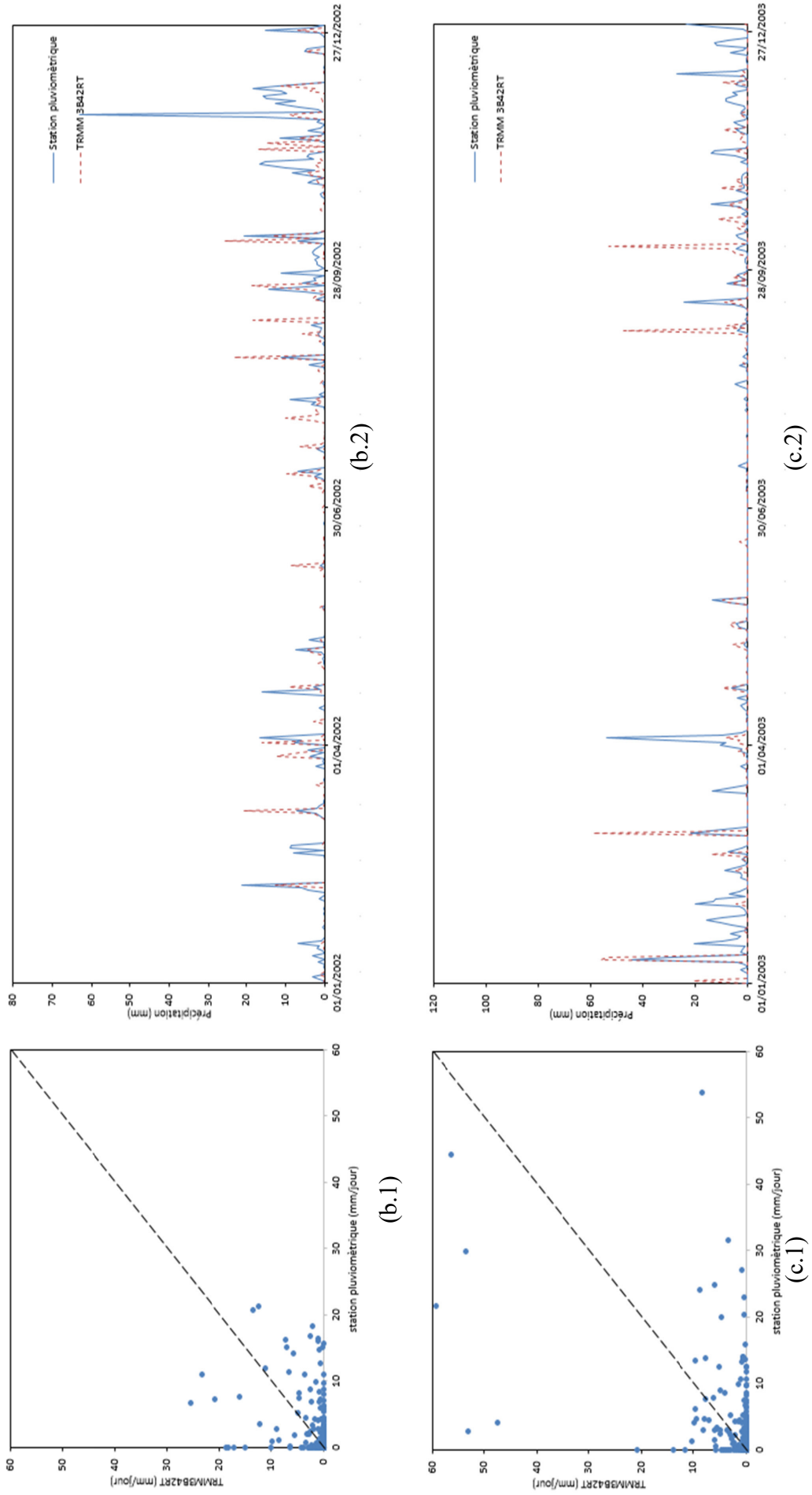


Figure III.10 : diagramme de dispersion et les Séries chronologiques de précipitations journalières des stations et les données de TRMM 3B42RT, 2002 et 2003.

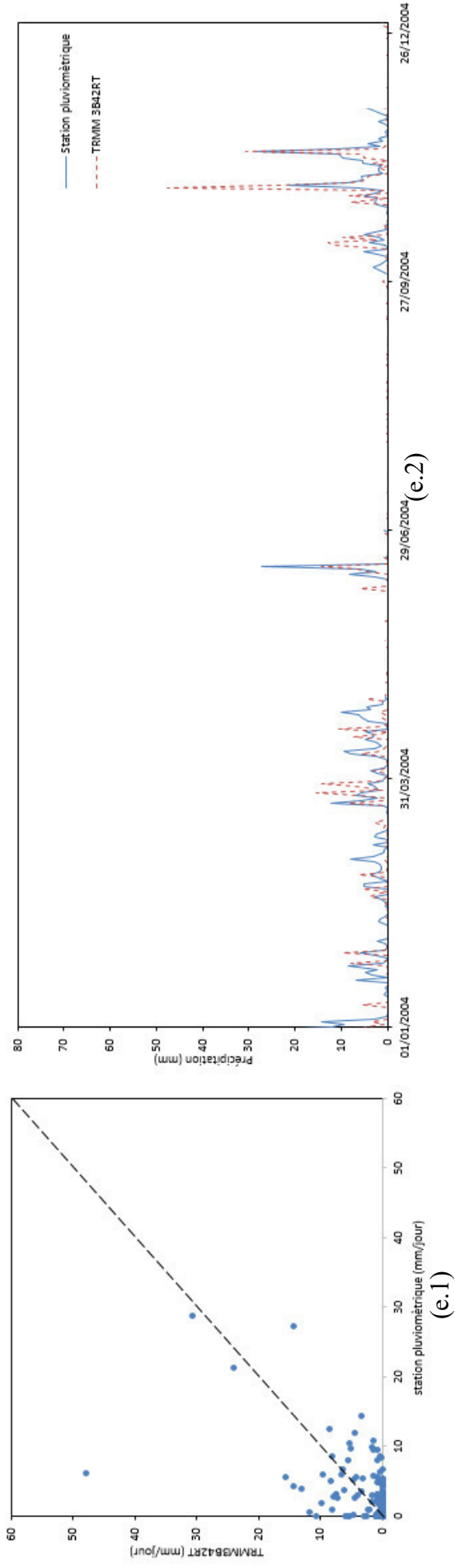


Figure III.11 : diagramme de dispersion et les Séries chronologiques de précipitations journalières des stations et les données de TRMM 3B42RT, 2004.

## Chapitre III : Evaluation des précipitations satellitaires

Les 3B42RT et 3B42V7 ont montré une largement surestimation dans la tout période, les nuages de points et les Séries chronologiques des précipitations journalières des stations et les données de 3B42V7 pour la période 1999-2004 sont montrés à les (Figures III.5, III.6, III.7, III.8), pour le produit 3B42RT dans les (Figures III.9, III.10, III.11).

Nous remarquons que les estimations de 3B42V7 suivent la dynamique des mesures du sol, mais ne donne pas des valeurs proches des précipitations enregistrées dans les stations. Le produit de précipitation a montré une forte surestimation (ex. Figure III.5, f2) dans les valeurs max de précipitation, et de mauvaises performances dans l'estimation de faibles valeurs de précipitation. On remarque aussi que les produits satellitaires estiment plusieurs fois dans l'année (ex. Figure III.6, d2) une tombé de pluie alors que les stations au sol n'enregistrent aucune pluie. On peut voir à partir des (Figures III.9, III.10, III.11) que le produit 3B42RT suit la dynamique de mesures du sol, mais contrairement au produit 3B42V7, il effectue des sous-estimations des précipitations. Toutefois, dans quelques cas, le 3B42RT donne une bonne estimation des précipitations (ex. Figure III.9, b2).

Depuis les nuages de points on peut voir que l'estimation des deux produits (3B42V7 , 3B42RT) montre un grande écart avec les données des stations.

Les produits 3B42V7 et 3B42RT ont tendance à surestimer les précipitations lorsque la quantité de précipitation est faible (ex. Figure III.6.c, 2) tandis que les estimations sont sous-estimées lorsque la quantité d'observation est importante.

### III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, deux produits de précipitations satellitaires (TRMM 3B43V7, 3B43RT) ont été évalués par rapport aux données des stations pluviométriques sur une période de sept-ans (quatre ans pour le produit 3B42RT) sur le sous bassin versant (1406) du Seybouse (14).

L'évaluation a été effectuée à une échelle spatiale de sous bassins versants et à une échelle temporelle journalière. Les pluies des pluviomètres et les pluies des produits de précipitation satellitaires ont d'abord été transformées à la pluie surfacique en utilisant la méthode des polygones de Thiessen. La comparaison entre les précipitations surfaciques (station et produits) a été effectuée à l'échelle du bassin versant

### Chapitre III : Evaluation des précipitations satellitaires

L'évaluation montrée que, les deux produits de précipitation par satellite présentaient un  $R^2$  de 0,3 à 0,14 pour les produits 3B42V7 et 3B42RT respectivement. Le 3B42V7 montre un meilleur accord avec les données de stations. Selon le critère BIAIS qui est positif, les mesures du produit 3B42V7 sont surestimées. Par contre les mesures du produit 3B42RT sont sous-estimées (BIAIS = -0,272). Le produit 3B42RT présente un RMSE le plus bas (5.1 mm) par rapport au produit 3B42V7 (5.14 mm). L'évaluation montre que le 3B42V7 est la meilleure estimation. Les deux produits de précipitation avaient relativement grandes erreurs pour les petites précipitations, lorsque les précipitations intensités ont été plus grandes que 50 mm, les valeurs de RMSE% sont supérieures à 50% (107.46 pour 3B42V7, 70.03 pour 3B42RT lorsque l'intensité ont été 50–75mm), le RMSE% indique que les données des deux produits ne sont pas fiables.

Après la comparaison nous avons utilisé plusieurs méthodes d'intelligences artificielles afin d'ajuster les produits satellitaires et améliorer leurs précisions.

Le chapitre suivant est une généralité sur les différentes méthodes utilisées pour l'ajustement des mesures satellitaires, à savoir les méthodes de Perceptron Multi Couches (PMC) et de la Fonction à Base Radiale (RBF).

CHAPITRE IV

# Modèles d'intelligence artificielle

### IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, une brève définition des réseaux de neurones artificiels (RNA) est présentée. L'historique de ces modèles et les principes de fonctionnement de deux types de RNA à savoir les Perceptrons multicouches (PMC), et Fonction de base radiale (RBF) sont exposés.

### IV.2. Les réseaux de neurones artificiels

Avant d'entamer l'état de l'art des réseaux de neurone, il est important de connaître comment fonctionne les réseaux de neurones et connaître les notions de base de cette technique.

### IV.3. Historique des RNA

Aujourd'hui de nombreux termes sont utilisés dans la littérature pour désigner le domaine des réseaux de neurones artificiels, comme connexionnisme ou neuromimétique. La notion basic des réseaux de neurones artificiels (RNA), comme on l'a connaît aujourd'hui a été formalisé par McCulloch et Pitts (1943) dans leur modèle d'un neurone artificiel. Depuis ce temps, les réseaux de neurones ont évolué en trois phases distinctes. La première ère implique les travaux préliminaire du développement d'un neurone artificiel jusqu'à Minsky et Papert (1969) qui ont identifié plusieurs facteurs limitant. La seconde ère a commencé avec la redécouverte et la popularisation de l'algorithme de rétropropagation. Avant ce travail fondateur, il était très difficile de former des réseaux de neurones de n'importe qu'elle taille pratique. La troisième époque est caractérisée par des évaluations plus rigoureuses de limitations du réseau et les généralisations, la fusion avec d'autres technologies (comme les algorithmes génétiques et la logique floue) et la mise en œuvre des RNA utilisant du matériel dédié (Boulmaiz, 2016).

#### IV.3.1. Neurone biologique

Le neurone est composé de trois principales parties : les dendrites, le corps cellulaire et l'axone (Figure IV.1). Les dendrites forment un maillage de récepteurs nerveux qui permettent d'acheminer vers le corps du neurone des signaux électriques en provenance d'autres neurones.

Celui-ci agit comme une espèce d'intégrateur en accumulant des charges électriques. Lorsque le neurone devient suffisamment excité (lorsque la charge accumulée dépasse un certain seuil), par un processus électrochimique,

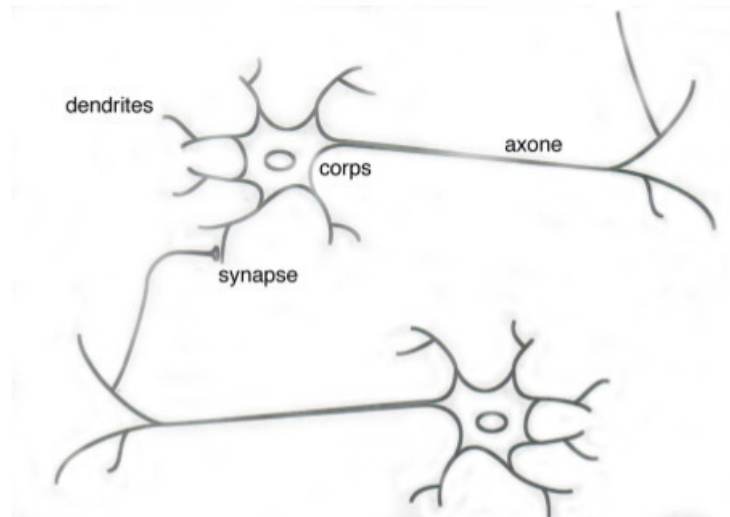


Figure IV.1 - Schéma d'un neurone biologique (Parizeau, 2004).

### IV.3.2. Neurone formel

Le neurone formel est une modélisation mathématique qui reprend les principes de fonctionnement du neurone biologique. Un neurone formel est constitué d'un noyau, d'une liaison synaptique de sortie et des liaisons synaptiques d'entrée. A chaque liaison d'entrées est attachée un poids appelé « poids synaptique ».

Les poids synaptiques : ce sont des coefficients numériques indiquant l'importance de la connexion.

La Figure IV.2 montre la structure d'un neurone artificiel. Chaque neurone artificiel est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones amont. A chacune de ces entrées est associé un poids  $w$  abréviation de weight (poids en anglais). Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones avals. A chaque connexion est associé un poids synaptiques (Touzet, 1992). En effet, tout se passe comme si le neurone ne reçoit qu'une entrée  $E$  et que celle-ci prend la valeur une fois l'entrée connue. Le neurone effectue une opération qui dépend de  $E$ , cela revient à dire qu'il applique une fonction  $f$  à la valeur  $E$ , cette fonction  $f$  est appelée fonction d'activation (fonction de traitement des entrées fournissant la sortie du neurone) (Parizeau, 2004).. Les variables de cette fonction sont habituellement appelées "entrées" du neurone, et la valeur de la fonction est appelée sa "sortie" (Boulmaiz, 2016).

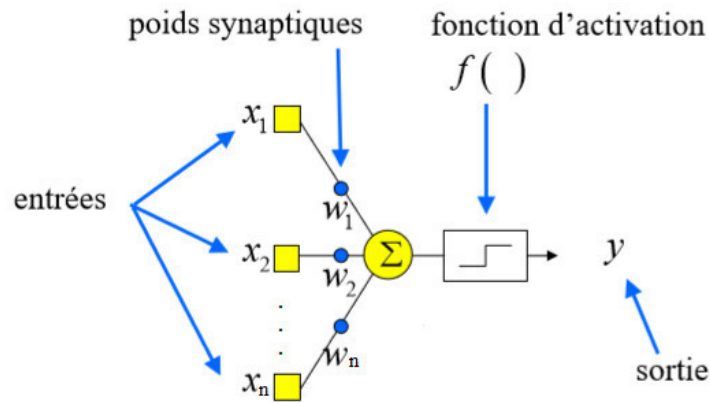


Figure IV.2 - Un neurone formel (Wira, 2009)

$$y = f(P)$$

où :

- $y$  : Sortie du modèle
- $f$  : Fonction de transfert
- $P$  : somme pondérée

$$P = \sum_{i=0}^n x_i w_i$$

- $x$  : Entrées du modèle
- $w$  : Poids

De façon générale, on définit un neurone formel par les cinq paramètres suivants :

- 1- La nature des entrées (booléenne ou réelle)
- 2- La fonction d'entrée totale, définissant le prétraitement effectué sur les entrées
- 3- La fonction d'activation du neurone définissant son état interne en fonction de la somme pondérée de ses entrées.
- 4- La fonction de sortie calculant la sortie du neurone en fonction de son état d'activation
- 5- La nature des sorties du neurone.



### IV.3.3. Les différents types de fonction de transfert

#### IV.3.3.1. Fonction binaire

Les premiers modèles de neurones étaient caractérisés par une fonction d'activation à seuil simple (binaire: 0=inactif, 1=actif). Le déclenchement de l'activité intervient si la somme des excitations dépasse un certain seuil propre au neurone (Boulmaiz, 2016).

Si  $P > 0 \implies$  Excitatrice

$y = 1$  Si  $P < 0 \implies$  Inhibitrice

$y = -1$  Si  $P = 0 \implies$  Non Connectée

La fonction binaire confère une certaine efficacité aux réseaux et correspond à un modèle proche de la réalité (Boulmaiz, 2016).

#### IV.3.3.2. Fonction linéaire par morceaux

Dans l'intervalle  $[-1, 1]$  :

$$f(x) = A \cdot x$$

Alors qu'en dehors de l'intervalle :

$$f(x) = -1 \text{ ou } + 1$$

Ce modèle est plus réaliste en faisant apparaître des phénomènes de saturation (Boulmaiz, 2016).

#### IV.3.3.3. Fonction linéaire

$$f(x) = A \cdot x$$

Lorsque la fonction d'activation est dérivable, il est possible d'utiliser des algorithmes d'apprentissage performants (Boulmaiz, 2016).

#### IV.3.3.4. Fonction sigmoïde

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

Ce type de fonction (Equation) combine l'avantage de l'effet de seuil et de la dérivabilité. Les fonctions sigmoïdes sont donc très utilisées (Boulmaiz, 2016).

IV.3.3.5. Fonction gaussienne

$$f(x) = \exp\frac{x^2}{2 * \text{Sigma}^2}$$

Fonction non monotone : effet inhibiteur d'une trop grande sollicitation. Utilisée dans les réseaux de type «RBF» (*Radial Basis Functions*) (Boulmaiz, 2016).

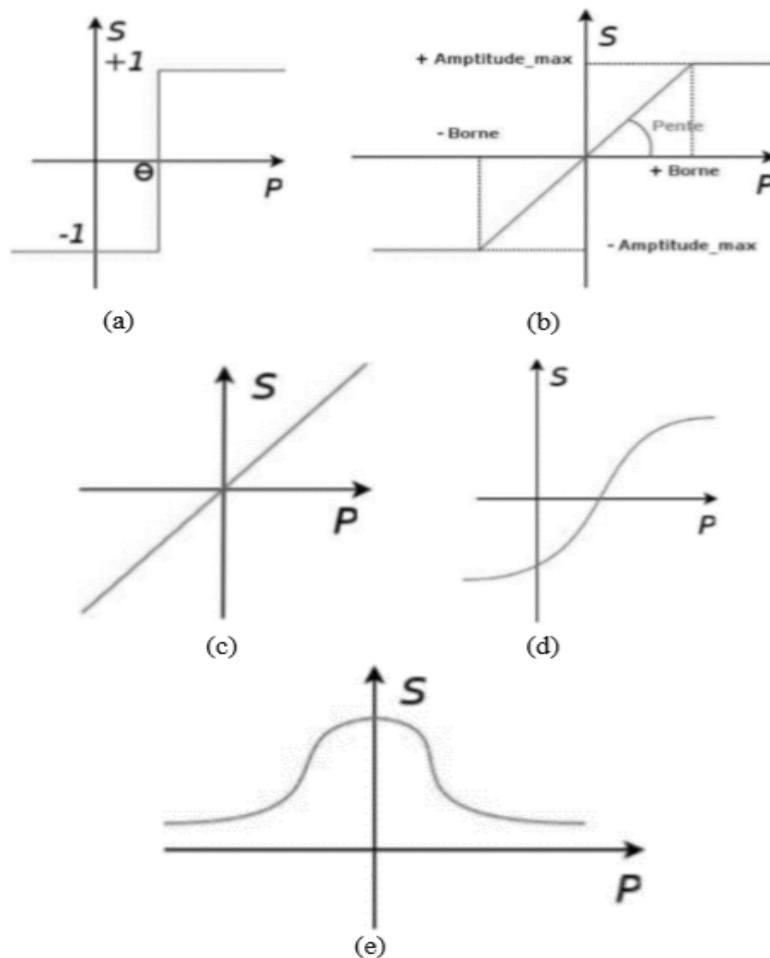


Figure IV.3 - Les différents type de fonction de transfert dans les RNA(a) fonction binaire, (b) fonction linéaire par morceaux (c), fonction linéaire (d) fonction sigmoïde, (e) fonction gaussienne (Boulmaiz, 2016).

### IV.3.4. Définition d'un réseau de neurone

Un réseau de neurone est un assemblage de neurone formel associé en couches fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit. Toute structure hiérarchique de réseaux est évidemment un réseau.

### IV.3.5. Classification topologique des réseaux de neurones

#### IV.3.5.1. Les réseaux feed-forward (Non bouclés)

Appelés aussi «réseaux de type Perceptron», l'information dans ce réseaux se propage dans un sens unique, des entrées vers les sorties sans aucune rétroaction (Parizeau, 2004).

#### IV.3.5.2. Le perceptron monocouche

Dans un réseau de neurone constitué de couches, les neurones sont organisés en fonction de ces derniers. Dans la forme la plus simple du réseau, on a une couche d'entrées des neurones sources qui projette directement sur une couche de sortie (neurones calculateurs), mais pas au sens inverse. En d'autres mots, ce réseau est strictement un type feedforward. Comme illustré dans la (Figure IV.4) pour le cas de quatre neurones dans les deux couches (entrée et sortie). Un tel réseau est appelé réseau monocouche désignant la seule couche de sortie qui comporte les neurones de calcul. On ne prend pas en considération la couche d'entrée vu qu'il n'y a pas de calcul dans cette couche (Boulmaiz, 2016).

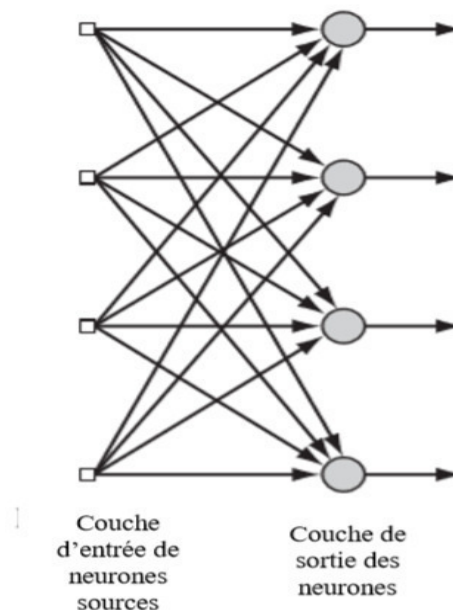


Figure IV.4 - Schéma descriptif du perceptron monocouche (Boulmaiz, 2016).

### IV.3.5.3. Le perceptron multicouches (PMC)

Le perceptron multicouche est un des réseaux de neurones les plus utilisés pour des problèmes d'approximation, de classification et de prédiction. Il est habituellement constitué de deux ou trois couches de neurones totalement connectés (Parizeau, 2004). Dont ses neurones de calcul sont appelés des neurones cachés ou unité cachée. Ce terme « caché » se réfère dans le fait que cette partie du réseau de neurone n'est pas directement visible ni par les entrées ni par les sorties du réseau. La fonction des neurones de la couche cachée est d'intervenir entre les entrées extérieures et les sorties du réseau d'une certaine manière utile. En ajoutant une ou plusieurs couches cachées, le réseau est capable d'extraire des statistiques d'ordre élevé à partir des entrées. Les neurones sources dans la couche d'entrée du réseau constituent les signaux d'entrée appliqués sur les neurones de la seconde couche (ex : première couche cachée). Les signaux de sortie de la deuxième couche sont utilisés comme entrée pour la troisième couche, et ça continue jusqu'à la fin du réseau. Typiquement, les neurones dans chaque couche du réseau ont comme entrée que les signaux de sortie de la couche précédente. L'ensemble des signaux de sorties des neurones dans la couche de final du réseau constitue la réponse globale de ce dernier par rapport aux neurones sources de la couche d'entrée. Un schéma de la structure d'un PMC est montré dans la (Figure 5) (Boulmaiz, 2016).

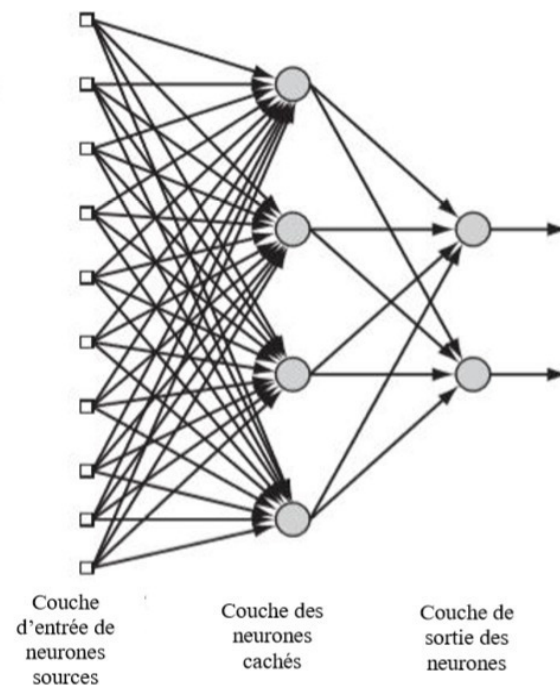


Figure IV.5 - Schéma descriptif du perceptron multicouche (Boulmaiz, 2016).

### IV.3.5.4. Les réseaux à fonction radiale (RBF)

Les réseaux à fonction radiale (RBF) qui possèdent deux couches forment une classe particulière de réseaux multicouches. Chaque cellule de la couche cachée utilise une fonction d'activation Gaussienne (Boulmaiz, 2016).

### IV.3.6. Apprentissage des RNA

C'est le processus (de calculs) qui permet de mettre à jour les poids des neurones à partir d'une ou plusieurs mesures (Wira, 2009). On peut classer les processus d'apprentissage qu'ont les réseaux de neurone pour fonctionner en : apprentissage supervisé, un apprentissage non supervisé et un apprentissage par renforcement.

#### IV.3.6.1. Apprentissage supervise

En anglais « Supervised learning », doit disposer d'un comportement de référence précis pour pouvoir l'inculquer au réseau neuronal (Wira, 2009). L'apprentissage supervisé est caractérisé par la présence d'un Enseignant qui possède une connaissance approfondie de l'environnement dans lequel évolue le réseau de neurones (Parizeau, 2004).

La forme d'apprentissage supervisé décrite juste au-dessus est basée sur l'apprentissage de correction d'erreur. Cette erreur peut être de type MSE appliqué à l'échantillon de donnée d'apprentissage, définie comme fonction de paramètres libres (poids) du système. Cette fonction peut être visualisée comme étant une surface d'erreur. Chaque opération faite sur le réseau (changement des poids) représente un point sur la surface d'erreur, pour que le système améliore ses performances, ce point doit descendre vers le minimum de cette surface. Faut savoir aussi que ce minimum peut être local ou global (Boulmaiz, 2016).

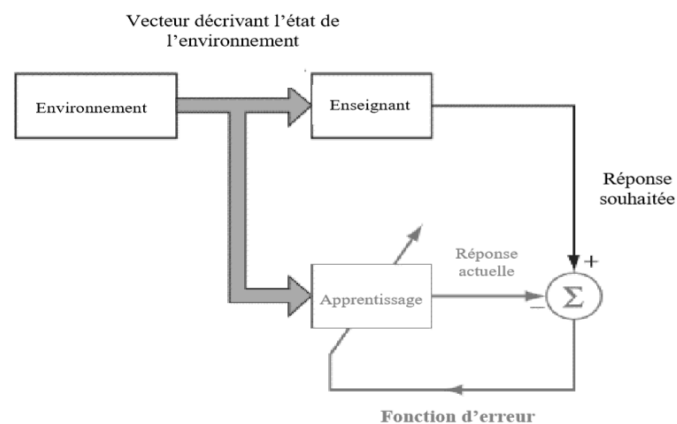


Figure IV.6 - Schéma descriptif d'un apprentissage supervisé (Boulmaiz, 2016).

### IV.3.6.2. Apprentissage non Supervisé

S'effectue sous le contrôle d'un expert, alors que l'apprentissage non supervisé est autodidacte. (Appelé en anglais « unsupervised learning »)

### IV.3.6.3. Apprentissage par renforcement

Dans l'apprentissage par renforcement, le réseau de neurone reçoit un feedback de son environnement, il n'y a pas de présence d'enseignant. Le système étant capable ici, de savoir si la réponse qu'il fournit est correcte ou non, mais il ne connaît pas la bonne réponse (Boulmaiz, 2016).

### IV.3.7. L'algorithme du LEVENBERG-MARQUADT

Cette méthode est utilisée pour modifier le paramètre d'apprentissage résultant en une interaction réduite avec l'oscillation. Qui est rapide et qui a une bonne stabilité de convergence.

Est une méthode d'ajustement a été faite en changeant le paramètre d'apprentissage pour accélérer l'algorithme LM. De plus, la fluctuation d'erreur a été réduite.

### IV.3.8. Perceptron multicouche (PMC)

En anglais (Multi Layer Perceptron « PMC»), Ce type de réseau est dans la famille générale des réseaux a «propagation vers l'avant», c'est-à-dire qu'en mode normal d'utilisation, l'information se propage dans un sens unique, des entrées vers les sorties sans aucune rétroaction. Son apprentissage est de type supervisé, par correction des erreurs. Dans ce cas uniquement, le signal d'erreur est «rétropropagé» vers les entrées pour mettre à jour les poids des neurones.

Ce réseau est composé d'une couche d'entrée, une couche de sortie et une ou plusieurs couches cachées. Les éléments de deux couches adjacentes sont interconnectés par des poids assurant la liaison des différentes couches (Fatima and Hamid, 2009). Chaque couche (i) est composée de  $N_i$  neurones, prenant leurs entrées sur les  $N_{i-1}$  neurones de la couche précédente. A chaque synapse est associé un poids synaptique, de sorte que les  $N_i \cdot A$  sont multipliés par ce poids, puis additionnés par les neurones de niveau i, ce qui est équivalent à multiplier le vecteur d'entrée par une matrice de transformation.

Mettre différentes couches l'une derrière l'autre reviendrait à mettre en cascade plusieurs matrices de transformation et équivaldrait à une seule matrice, produit des autres, s'il

n'y avait à chaque couche, la fonction d'activation qui introduit une non linéarité à chaque étape (Wira, 2009).

Le PMC est le type des réseaux les plus utilisés pour des problèmes d'approximation, de classification et de prédiction. Il est habituellement constitué de deux ou trois couches de neurones totalement connectés (Parizeau, 2004).

#### IV.3.8.1. Apprentissage

L'apprentissage est supervisé, consiste à adapter les valeurs des poids afin d'obtenir le comportement désiré du PMC, Pour ce réseau, l'algorithme de Levenberg-Marquard a été utilisé pour son apprentissage.

#### IV.3.8.2. Architecture

PMC est composé d'une couche d'entrée, une couche de sortie et une ou plusieurs couches cachées. Les éléments de deux couches adjacentes sont interconnectés par des poids assurant la liaison des différentes couches comme indiqué sur la (Figure 2) (Fatima and Hamid, 2009).

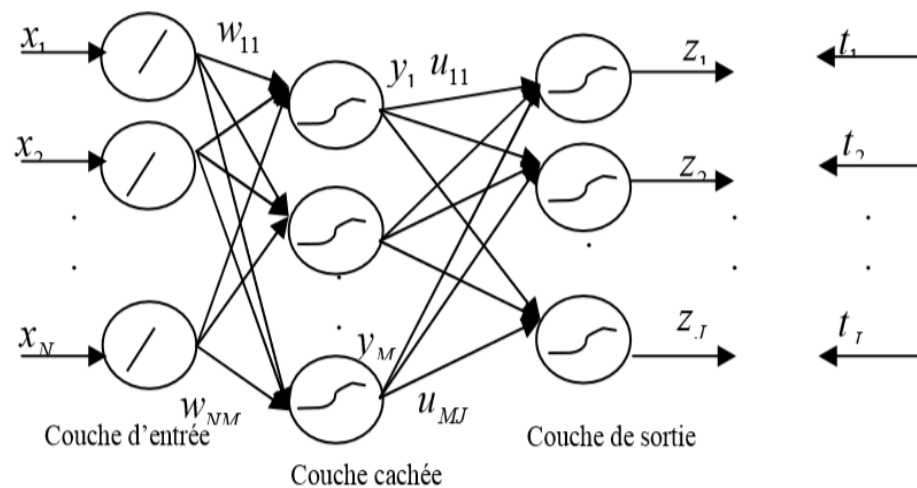


Figure IV.7 - Présentation schématique d'un PMC (Fatima and Hamid, 2009).

Où :

$w_{nm}$  représente les poids reliant la couche d'entrée avec la couche cachée

$u_{mj}$  représente les poids reliant la couche cachée avec celle de la sortie

Les composants du vecteur d'entrée  $X$  du PMC seront pondérés par les poids  $w_{nm}$  et ensuite transmis à la couche cachée selon les équations suivantes :

$$C_m = \sum_{i=0}^n x_n \cdot w_{nm}$$

$$y_m = f(c_m)$$

Les sorties de la couche cachée seront aussi pondérés par les poids  $u_{mj}$  et transmis ensuite à la couche de sortie selon les équations suivantes :

$$O_j = \sum_{i=0}^n y_m \cdot u_{mj}$$

$$t_j = g(O_j)$$

$f$  et  $g$  représentent respectivement les fonctions d'activations des neurones de la couche cachée et celle de la de sortie. Elles sont des sigmoïdes (Fatima and Hamid, 2009).

### IV.3.9. Les réseaux de neurones à base radiale (RBF)

Les réseaux de neurones à base radiale sont une classe particulière des réseaux de neurones multicouches (Yang et Paindavoine, 2005).

#### IV.3.9.1. Présentation des réseaux RBF

Le réseau de neurones à base radiale RBF (en anglais *Radial Basis Functions*) fait partie des réseaux de neurones supervisés.

#### IV.3.9.2. Architecture générale d'un réseau RBF

Il est constitué de trois couches, une couche d'entrée qui retransmet les entrées sans distorsion, une seule couche cachée qui contient les neurones RBF qui sont généralement des gaussiennes et une couche de sortie dont les neurones sont généralement animés par une fonction d'activation linéaire. Chaque couche est complètement connectée à la suivante et il n'y a pas de connexions à l'intérieur d'une même couche (Fatima and Hamid, 2009).



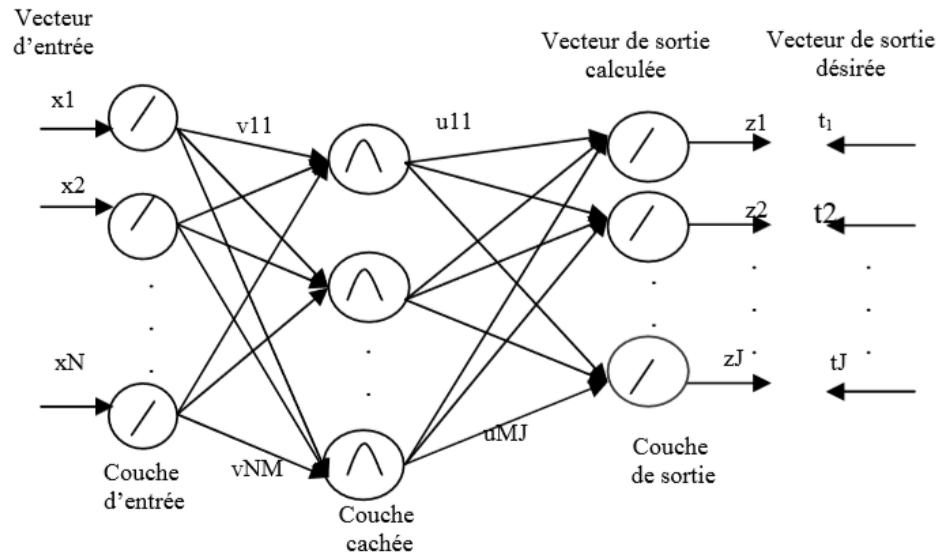


Figure IV.8 - Présentation schématique d'un réseau RBF (Fatima and Hamid, 2009).

Ce réseau est constitué de  $N$  neurones d'entrée,  $M$  neurones cachés et  $J$  neurones de sortie.

La sortie du  $m^{ième}$  neurone de la couche cachée est donnée par :

$$y_m^{(q)} = \exp\left[-\frac{\|x^{(q)} - v_m\|^2}{2\sigma_m^2}\right]$$

$y_m$  est le centre du  $m^{ième}$  neurone de la couche cachée où du  $m^{ième}$  neurone gaussien et  $\sigma_m$  est la largeur du  $m^{ième}$  gaussienne.

La sortie du  $j^{ième}$  neurone de la couche de sortie est donnée par:

$$z_j^{(q)} = \left(\frac{1}{M}\right) \cdot \left[ \sum_{(m=1,M)} w_{mj} y_m^{(q)} \right]$$

$m = 1, \dots, M$  et  $j = 1, \dots, J$ .

$w_{mj}$  sont les poids reliant la couche cachée à celle de la sortie.

### IV.3.9.3. Apprentissage du RBF

Plusieurs méthodes d'apprentissage ont été développées pour ces types de réseaux, on dit souvent que l'apprentissage du réseau RBF est hybride : non supervisé pour l'étape de construction du réseau, et supervisé pour la détermination des poids de la couche de sortie. Lors de l'étape de construction du réseau, il y a quatre paramètres principaux à régler :

- Le nombre de neurones RBF.
- La position des centres des gaussiennes de chacun des neurones.
- La largeur de ces gaussiennes.
- Le poids des connexions entre les neurones RBF et le (s) neurone (s) de sortie.

## IV.4. Application du modèles PMC et RBF dans l'ajustement des mesures satellitaires

Nous avons testé les deux méthodes d'intelligences artificielles, PMC et RBF dans l'objectif d'ajuster les produits satellitaires et améliorer leurs précisions.

L'amélioration peut s'agir de connecter deux ou plus de modèle existant, comme un simple filtre qui corrige les données d'entrée ou de sortie, ou pour combiner la simulation de multiple modèle (Boulmaiz, 2016).

### IV.4.1. L'apprentissage

Pour calculer les poids de la couche de sortie, on utilise un apprentissage supervisé pour les deux types de réseaux.

### IV.4.2. Normalisation des données

La normalisation des données est importante pour deux raisons : la première, c'est que les données d'entrées doivent avoir le même poids.

Les séries de données des deux réseaux (PMC et RBF) ont été normalisé suivant le type «normalisation min-max». Dans cette étude, les séries de données du réseau ont été normalisé suivant le type « normalisation min-max ». Cette dernière effectue une transformation linéaire des valeurs de données originaux (Boulmaiz, 2016).

$$y' = \frac{y - \min_x}{\max_x - \min_x} \cdot (\text{new\_max}_x - \text{new\_min}_x) + \text{new\_min}_x$$

Où  $y$  est l'ancienne données et  $y'$  la donnée normalisée.

#### IV.4.3. Division des données

Donc ce cas, on s'est orienté vers l'utilisation de l'une des techniques qui évite le sur-apprentissage et celle qui est très utilisé vu sa simplicité. On a utilisé l'arrêt anticipé « early stopping ». Cette technique consiste à diviser la période en trois parties au lieu de deux. La première est utilisée pour l'apprentissage du réseau dans le but d'ajuster les poids et biais (pour le RNA), selon une fonction objective (l'erreur « MSE » est utilisée dans cette étude). La deuxième (validation) est celle qui concerne le sur-apprentissage, elle est utilisée pour mesurer l'erreur de la généralisation du réseau et arrêter le processus d'apprentissage quand cette dernière ne s'améliore plus. La troisième (test) est une partie des données et qui n'ont aucun effet sur le processus d'apprentissage est utilisée pour voir les performances de notre réseau (PMC ou RBF).

La période totale utilisée pour les modèle PMC et RBF a été énumérées au (Tableau IV.1).

Tableau IV.1 - division de la période pour les deux modèles

		TRMM 3B42V7	TRMM 3B42RT
Apprentissage	50%	01/01/1998	01/03/2000
		16/04/2001	01/04/2002
Validation	25%	16/04/2001	01/04/2002
		23/10/2002	17/04/2003
Test	25%	23/10/2002	17/04/2003
		30/04/2004	30/04/2004

#### IV.4.4. Détermination des entrées pour les PMC et RBF

La sélection des entrées consiste à commencer par utiliser un seul pas de temps et en rajouter un autre jusqu'à atteindre un délai spécifique mis par le modélisateur. Dans cette étude, un maximum de deux jours de délais a été adopté. Cette procédure est répétée pour chaque variable seule ou combinée avec d'autres variables.

La précipitation surfacique des produits de précipitation (3B42V7 et 3B42RT) sont introduites séparément comme entrée du réseau de neurones, la précipitation surfacique des stations est utilisée pour la calibration des modèles.

Les variables et combinaisons de variables utilisées dans le PMC et dans RBF sont :

- C1 : Sat (t)
- C2 : Sat (t-1, t)
- C3 : Sat (t-2, t-1, t)
- C4 : Sat (t) et Stat (t-1)
- C5 : Sat (t) et Stat (t-2, t-1)
- C6 : Sat (t-1, t) et Stat (t-1)
- C7 : Sat (t-1, t) et Stat (t-2, t-1)
- C8 : Sat (t-2, t-1, t) et Stat (t-1)
- C9 : Sat (t-2, t-1, t) et Stat (t-2, t-1, t)

Où :

Sat : précipitation surfacique des produits de précipitation

Stat : précipitation surfacique des données des stations

Chaque combinaison est utilisée seule comme entrée. Nous avons développé un script de Matlab pour sélectionner les données d'entrées automatiquement selon les combinaisons citées au-dessus.

### IV.4.5. Evaluation du modèle

Trois critères d'efficacité ont été utilisés dans les deux modèles pour l'ajustement des mesures satellitaires. Ces critères sont les mêmes utilisés dans la comparaison de la performance des deux produits de précipitations satellitaires, TRMM 3B42V7, et TRMM 3B42RT, avec les mesures des stations au sol, à savoir le RMSE, BIAIS et  $R^2$  (montrés dans le chapitre 3)

### IV.5. Conclusion

Deux modèles d'intelligences artificielles ont été utilisés dans l'ajustement des produits satellitaires. Un réseau de neurone de type perceptron multicouches avec une seule couche cachée et un réseau de neurones à base radiale. Pour les deux réseaux, l'algorithme de Levenberg-Marquard a été utilisé pour son apprentissage. Nous avons développé un script de Matlab pour sélectionner les données d'entrées automatiquement selon les combinaisons (C1, C2, ....., C9) citées dans ce chapitre, les précipitations surfaciques (l'une des produits) issues la méthode de polygone de Thiessen, a été utilisés dans ces deux modèles comme entrée. Nous

## **Chapitre IV : Modèles d'intelligence artificielle**

avons varié les entrées (différentes combinaisons), pour obtenir les meilleures performances pour les deux modèles (PMC et RBF).

Les résultats obtenus après l'ajustement des mesures satellitaires, présentes dans le chapitre suivant.

Chapitre V

# Résultats et discussion

### V.1. Introduction

Ce chapitre est dédié à la présentation des résultats obtenus après l'ajustement des mesures satellitaires et une discussion à propos de cette amélioration.

Nous avons ajusté les mesures satellitaires en testant deux méthodes d'intelligences artificielles à savoir le Perceptron multicouches (PMC), et la Fonction de base radiale (RBF).

Nous avons appliqué les mêmes critères de performances ( $R^2$  %, BIAIS, RMSE et RMSE%) utilisés dans le chapitre 3 sur les valeurs observées et les valeurs simulées,

### V.2. Application du PMC

Le réseau PMC a été appliqué pour l'ajustement des deux produits de précipitation satellitaires (3B42V7 et 3B42RT). L'architecture à trois couches avec la fonction sigmoïde pour les neurones de la couche cachée et une fonction linéaire pour le neurone de sortie sont choisis pour cette simulation. L'apprentissage du réseau s'est fait en utilisant l'algorithme de Levenberg-Marquardt sur les combinaisons d'entrées dans le but de définir le vecteur le plus approprié pour une meilleure performance.

Afin d'obtenir la configuration optimale de la couche cachée, on a varié à chaque fois le nombre de neurone (de 2 jusqu'à 10) et mesurer la performance du modèle. Les résultats des configurations optimales ont été sauvegardés et montrés dans les tableaux et figures au-dessous.

#### V.2.1. TRMM 3B42V7

Le (Tableau V.1) résume les résultats obtenus des modèles PMC appliqués sur les données du produit de précipitation 3B42V7, en fonction des critères de performances ( $R^2$  %, BIAIS et RMSE),

A première vue sur le (Tableau V.1), les résultats obtenus avec les différentes entrées de combinaison sont généralement proches les uns aux autres. Dans la colonne (Station-Satellite) nous avons calculé les critères de performances sur les données (estimation de 3B42V7 et mesures des stations) avant l'application de modèle, pour comparer la performance de la modèle.

Dans la phase de test, le RMSE est varié entre 3,81 et 4,70, en remarque que la (C5) est de meilleure performance avec (RMSE=3,81mm). Le (C7) est de coefficient de détermination égale à 60,41 %, mieux que (C5) avec un  $R^2 = 58,66$  %.

Tableau V.1 - Résultats des simulations du modèle PMC pour le produit 3B42V7

station-satellite	Nombre de neurone dans la couche cachée	Apprentissage			Validation			Test		
		R <sup>2</sup> %	RMSE	BIAIS	R <sup>2</sup> %	RMSE	BIAIS	R <sup>2</sup> %	RMSE	BIAIS
	-	22,93	25,09	0,05	26,34	8,62	0,05	38,39	6,85	-0,11
C1	9	26,23	15,58	0,04	26,19	5,15	0,23	44,99	4,51	-0,13
C2	2	23,97	16,04	0,09	26,16	5,39	0,07	38,02	4,69	-0,17
C3	3	28,16	15,33	0,03	24,52	5,22	0,33	41,94	4,70	-0,30
C4	10	39,29	12,78	0,05	27,05	5,13	0,25	58,52	3,83	-0,14
<b>C5</b>	7	44,37	11,78	-0,01	24,57	5,56	0,09	<b>58,66</b>	<b>3,81</b>	<b>-0,13</b>
C6	8	47,72	11,21	0,17	24,48	5,32	0,41	52,66	4,08	-0,07
<b>C7</b>	6	35,56	13,63	0,00	26,11	5,14	0,15	<b>60,41</b>	3,92	-0,21
C8	4	45,44	11,62	0,16	22,89	5,66	0,34	52,44	4,08	-0,07
C9	6	37,19	13,59	0,03	30,39	4,78	0,27	54,57	4,10	-0,20



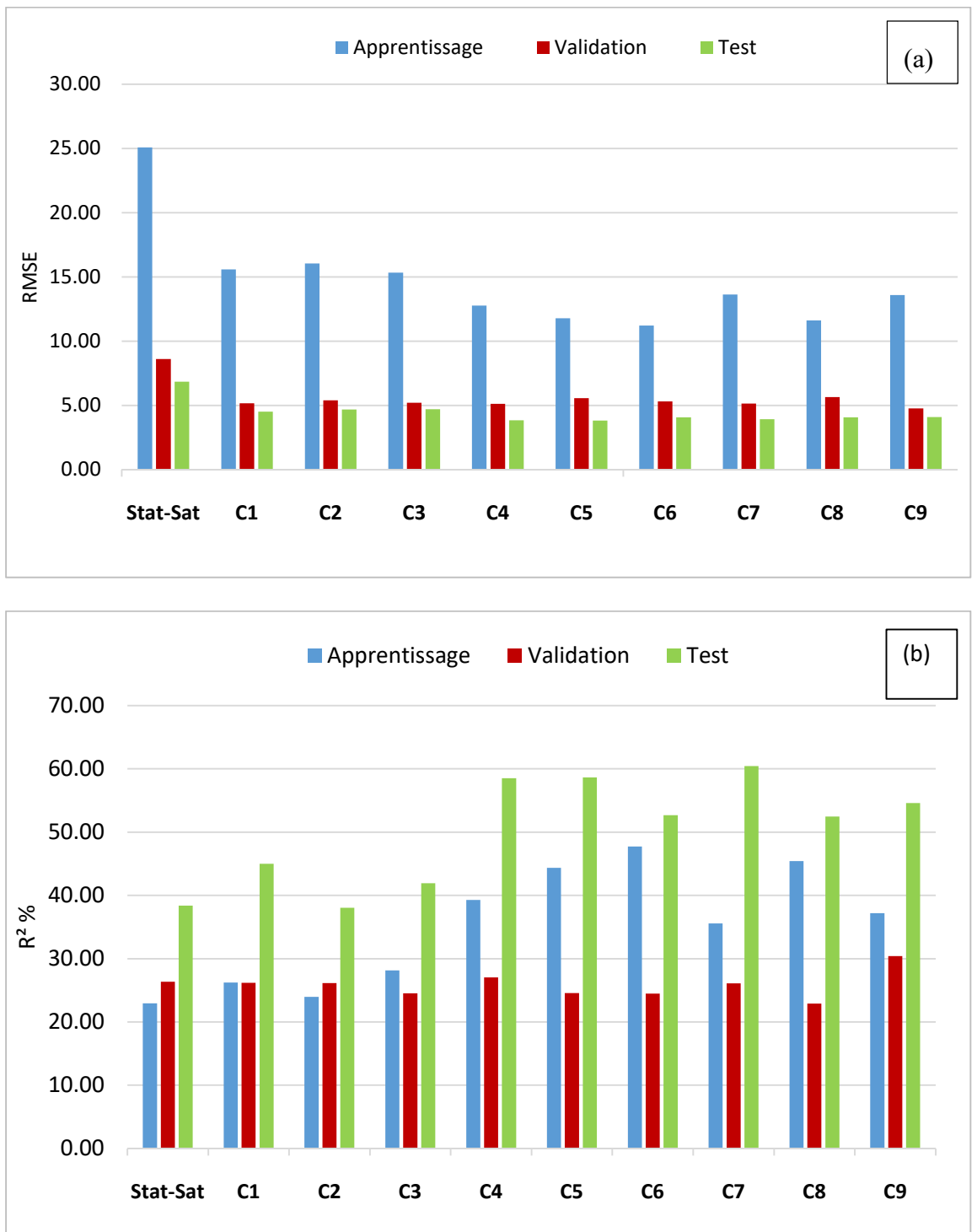


Figure V.1 - Performances des modèle PMC en fonction des combinaisons des entrées au niveau des critères (a) RMSE, (b) R<sup>2</sup> %, durant la période test



Figure V.2 - Performances des modèle PMC en fonction des combinaisons des entrées au niveau des critères (a) BIAIS, (b) RMSE%, durant la période test

On peut voir à partir de la (Figure V.1) qui illustre les performances atteintes par le modèle PMC utilisant différentes entrées (Combinaisons) au niveau des critères RMSE,  $R^2\%$ , que la combinaison C1 qui utilise seulement la pluie au temps  $t$  qui donne les plus mauvais

résultats. Ces résultats s'améliorent au fur et à mesure qu'on rajoute des variables en entrée. L'ajout d'un délai de pluie en plus fait qu'il y ait une amélioration considérable au niveau de la simulation.

La (C5) est celui qui donne de meilleurs résultats si on se base sur le critère de RMSE alors que le (C7) effectue une meilleure performance par rapport au critère  $R^2$  (60,41 %).

La (Figure V.2.a) montre que les données qui a été simulé a été grandement sous-estimé avec tous les combinaisons.

La (Figure V.3), représente le RMSE% de produit de précipitation satellitaires (3B42V7) et RMSE% de la meilleure performance la combinaison C5, pour déférente intensité de précipitation (divisé en fonction des données des stations),

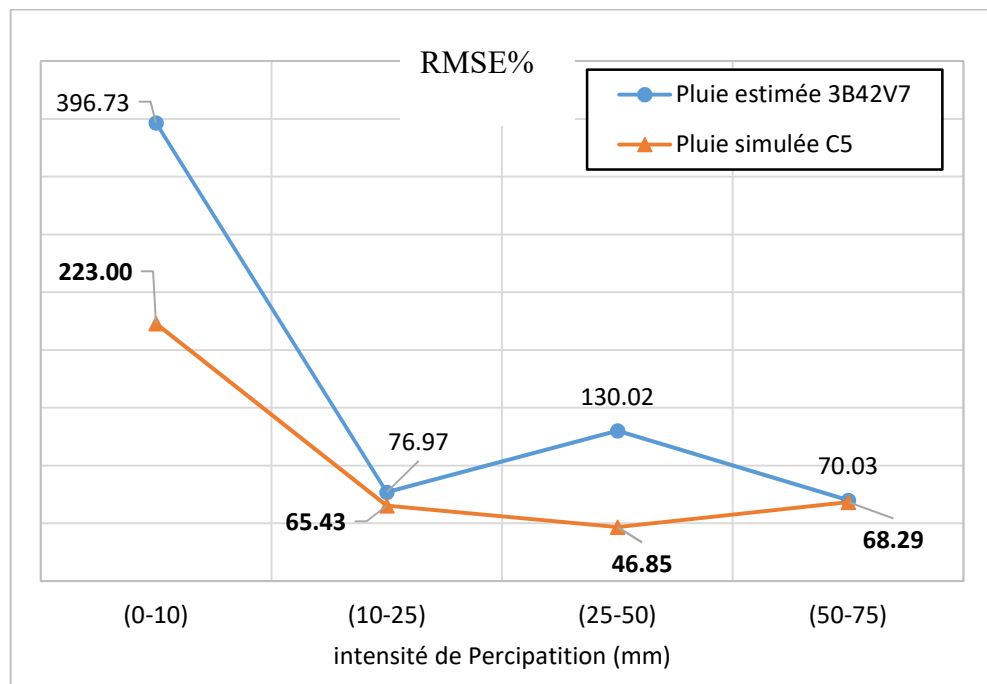


Figure V.3 - RMSE% de produits de précipitation satellitaires (3B42V7) et combinaison C5, pour déférente intensité de précipitation

On peut voir qu'au niveau de la simulation est inférieure que la pluie estimée, le RMSE% de la produit 3B42V7 diminué (de 360.73 à 233) pour les précipitations moins de 10 mm,

La valeur de RMSE% de la pluie simulée est égale ou inférieure à 50% (46.85 lorsque l'intensité de précipitation ont été 25-50)

La (Figure V.4) présente nuages de points, pluie simulé et pluie observé.

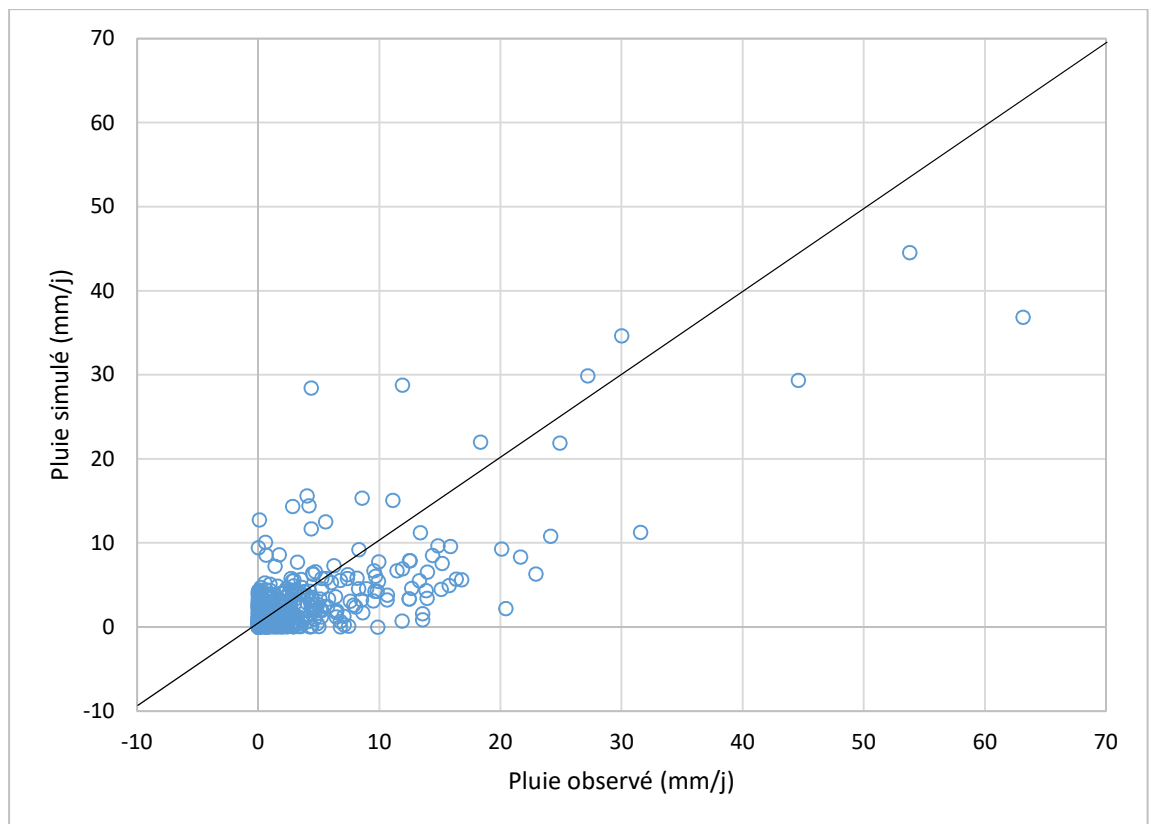


Figure V.4 - Nuages de points montre la simulation avec le modèle PMC utilisent les pluies du 3B42V7 durant la période test (C5)

D'après les (Figures V.4 et V.5) montrant les performances de la combinaison 5 avec le modèle PMC en fonction des précipitations journalières des stations et les données de 3B42V7 pour la période 1998-2004 durant la phase de test, on s'aperçoit que ces modèles suivent plus ou moins bien la dynamique de la pluie observe au sol en fonction du temps.

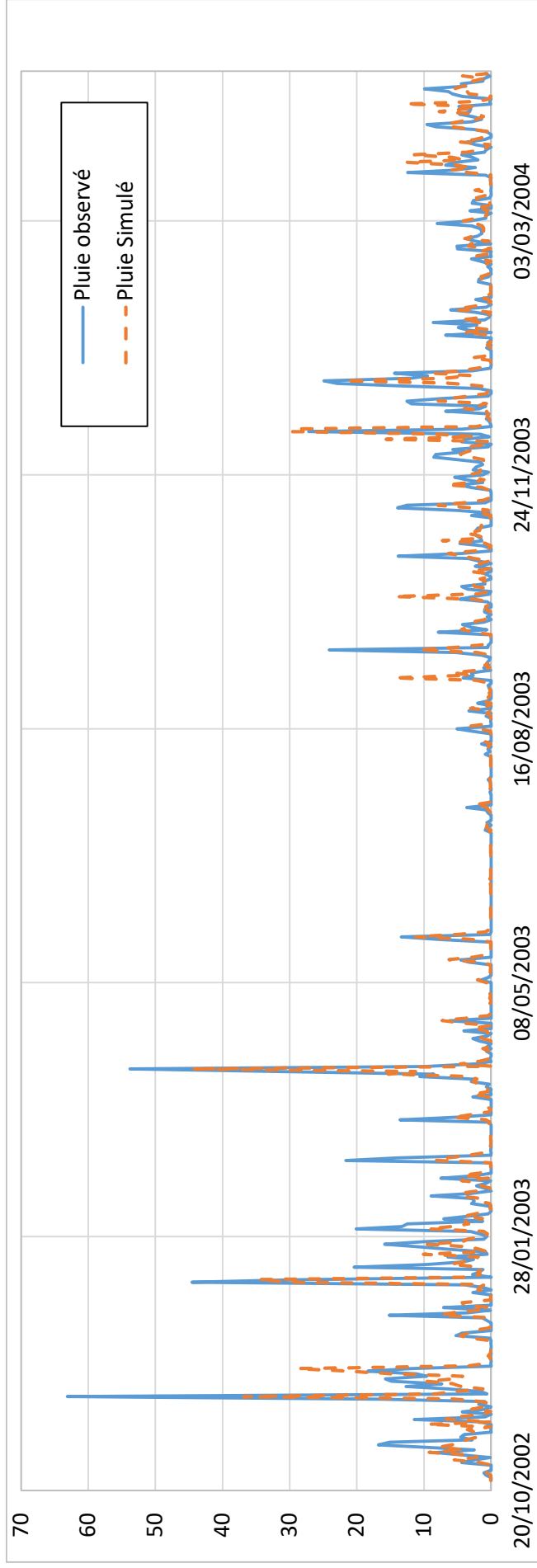


Figure V.5 - séries chronologiques montrant la simulation avec le modèle PMC utilisent les pluies du 3B42V7 durant la période test (C5)

### V.2.2. TRMM 3B42RT

Le (Tableau V.2) résume les résultats obtenus des modèles PMC appliqués sur le produit de précipitation 3B42RT, utilisant les précipitations surfacique en fonction des critères de performances ( $R^2$  %, BIAIS, RMSE), les résultats obtenues avec les différentes entrées de combinaison sont généralement proches les uns aux autres.

Pour la ligne Station-Satellite (Tableau V.2) nous avons calculé les critères de performances sur les données (estimation de 3B42RT et mesures des stations) avant l'application de modèle, pour comparer la performance de la modèle.

Dans la phase de test, le RMSE est varié entre 2,93mm et 3,43mm, en remarque que le (C5) est de meilleur performances avec (RMSE=2,93mm), et de coefficient de détermination ( $R^2= 36,65$  %).

Tableau V.2 - Résultats des simulations du modèle PMC pour le produit 3B42RT

station-satellite	Nombre de neurone dans la couche cachée	Apprentissage			Validation			Test		
		R <sup>2</sup> %	RMSE	BIAIS	R <sup>2</sup> %	RMSE	BIAIS	R <sup>2</sup> %	RMSE	BIAIS
C1	-	9,85	22,71	-0,28	22,39	4,77	0,16	4,87	5,02	-0,42
C2	3	14,19	20,68	0,17	19,00	4,55	0,70	13,49	3,39	-0,32
C3	6	24,76	15,61	0,07	15,55	3,95	0,58	14,80	3,37	-0,39
C4	3	14,84	20,11	0,04	21,12	4,48	0,58	11,89	3,43	-0,37
C5	10	34,97	14,29	0,03	21,12	3,78	0,29	11,89	2,96	-0,21
C6	<b>8</b>	35,39	14,10	-0,10	42,90	3,75	0,07	<b>36,65</b>	<b>2,93</b>	-0,29
C7	4	24,42	17,55	-0,04	21,27	4,19	0,22	31,52	3,02	-0,25
C8	6	26,33	14,17	-0,08	37,07	3,76	0,12	32,18	3,01	-0,27
C9	5	25,08	11,27	-0,12	32,73	3,36	0,16	31,40	3,06	-0,26
C9	4	30,87	15,46	-0,07	5,75	3,93	0,20	31,35	3,04	-0,16

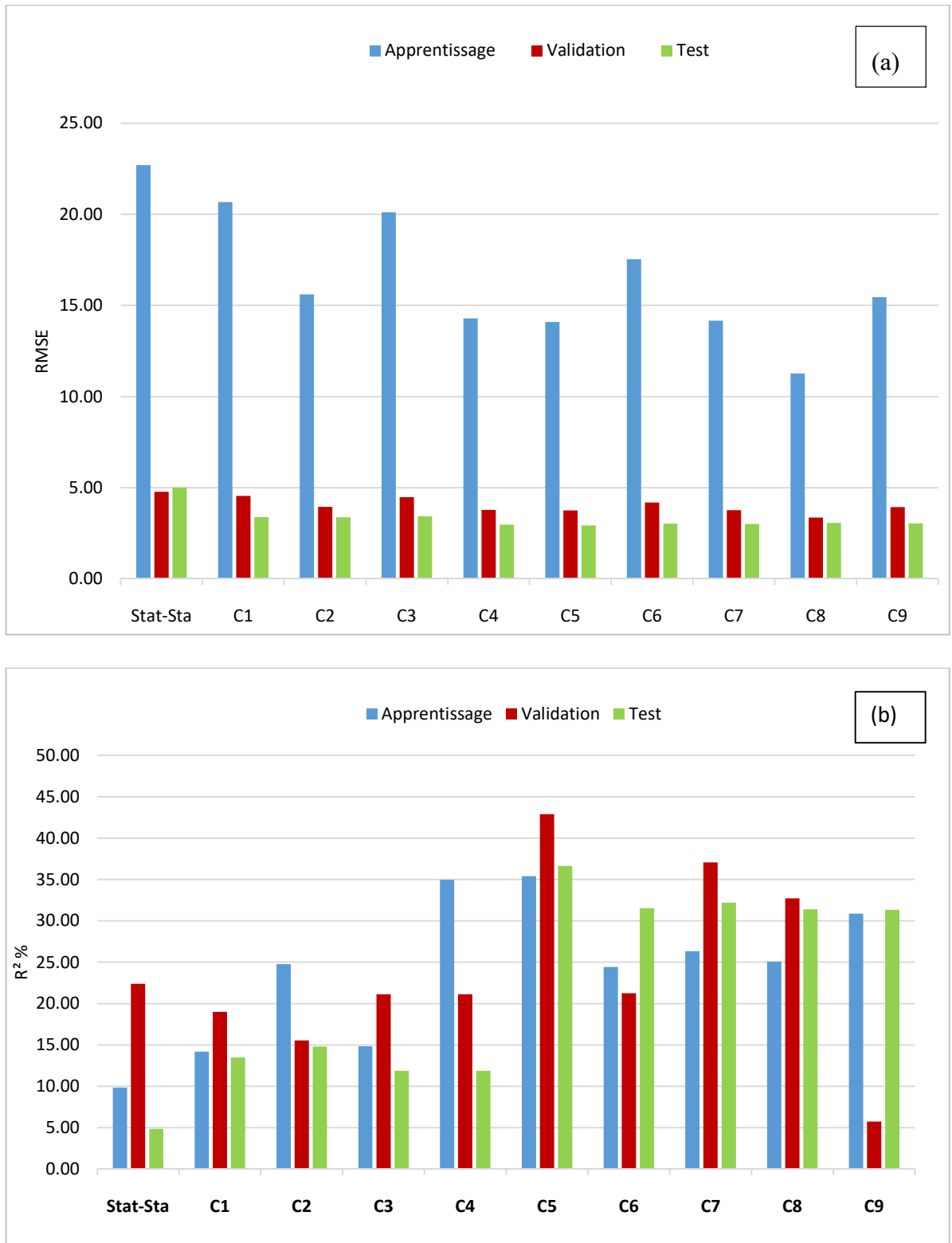


Figure V.6 - Performances des modèle PMC en fonction des combinaisons des entrées au niveau des critères (a) MSE, (b) R² %, durant la période test





Figure V.7 - Performances des modèle PMC en fonction des combinaisons des entrées au niveau des critères (a) BIAIS, (b) RMSE%, durant la période test

On peut voir à partir de la (Figure V.6) qui illustre les performances atteintes par le modèle PMC utilisant différentes entrées (Combinaisons) au niveau des critères RMSE,  $R^2$  %, que la combinaison C1 qui utilise seulement la pluie au temps  $t$  qui donne les plus mauvais

résultats. Ces résultats s'améliorent au fur et à mesure qu'on rajoute des variables en entrée. L'ajout d'un délai de pluie en plus fait qu'il y ait une amélioration considérable au niveau de la simulation. La (C5) est celui qui donne meilleurs résultats si on se base sur le critère de RMSE. la (Figure V.7. a) montre que les données qui a été simulé a été grandement sous-estimé avec tous les combinaisons.

La (Figure V.8), représente le RMSE% de produit de précipitation satellitaires (3B42RT) et RMSE% de la meilleure performance la combinaison C5, pour déférente intensités de précipitation (divisé en fonction des données des stations),

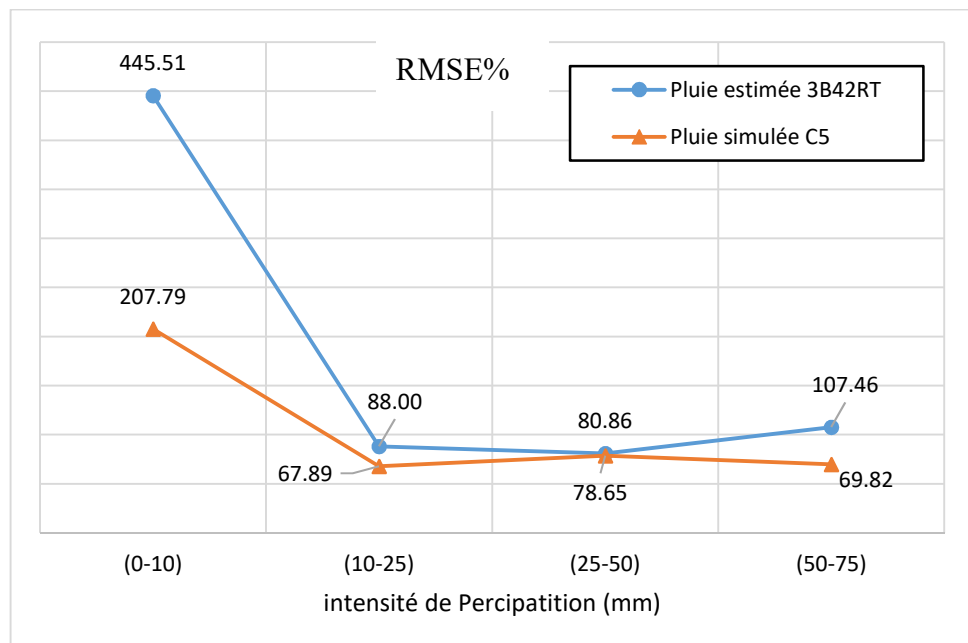


Figure V.8 - RMSE% de produits de précipitation satellitaires (3B42RT) et combinaison C5, pour déférente intensités de précipitation

La simulation est inferieur que la pluie estimée, généralement le RMSE% de la pluie simulée est inferieur que pluie estimée, le RMSE% de la produit 3B42RT diminué (de 445.51 à 207.79) pour les précipitations moins de 10 mm.

Le RMSE% pour la pluie simulée a diminué avec l'augmentation d'intensité de précipitation.

les (Figures V.9 et V.10) montrant les performances de la combinaison 5 avec le modèle PMC en fonction des précipitations journalières des stations et les données de 3B42RT pour la période 2000-2004 durant la phase de test, La simulation de la combinaison 5 suit plus ou moins bien la dynamique de la pluie mesures au sol en fonction du temps.

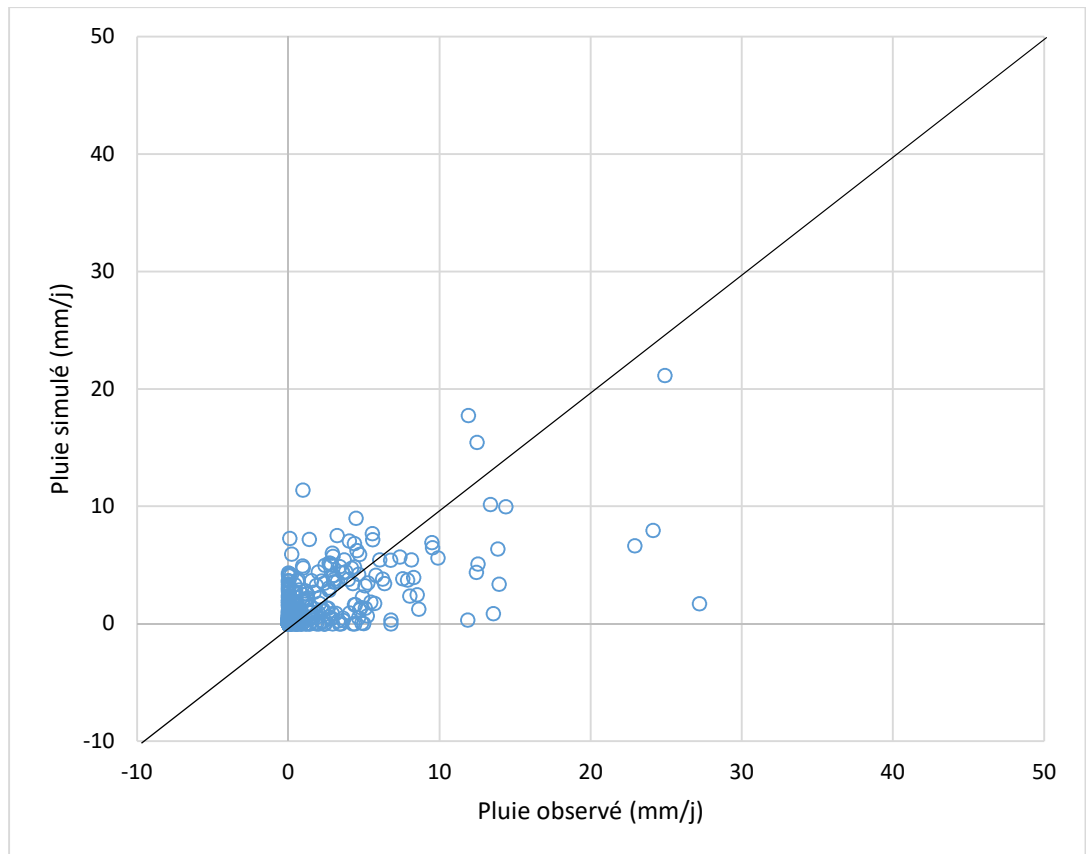


Figure V.9 - Nuages de points montre la simulation avec le modèle PMC utilisent les pluies du 3B42RT durant la période test (C5)

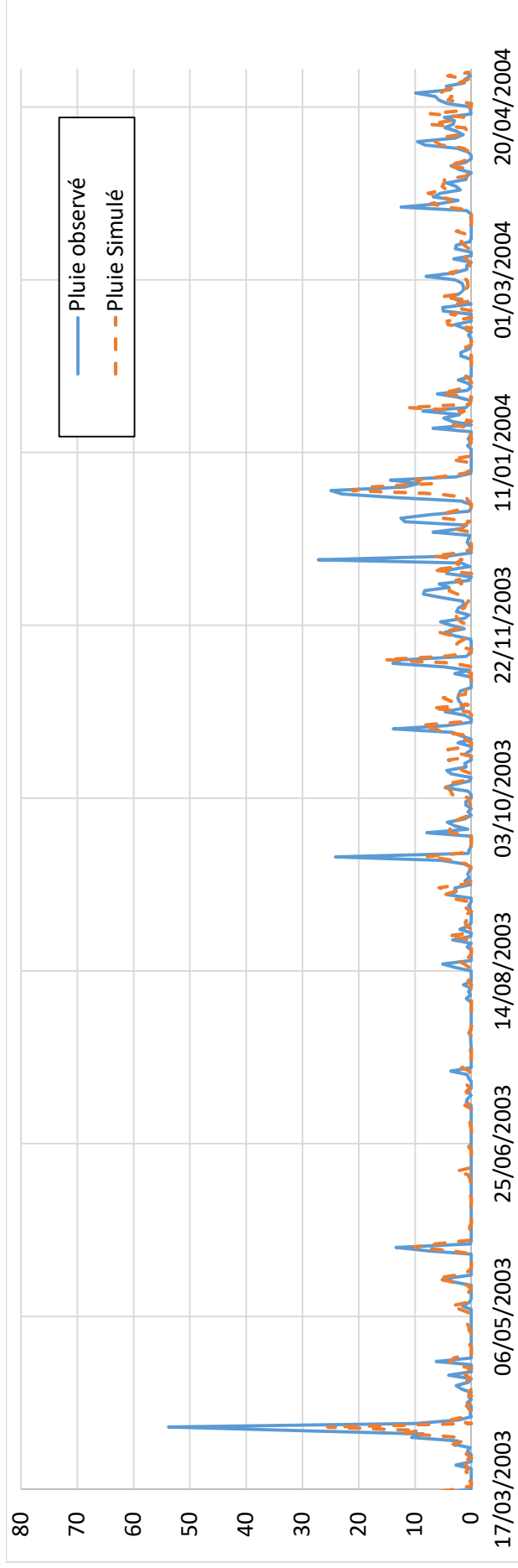


Figure V.10 - séries chronologiques montrant la simulation avec le modèle PMC utilisent les pluies du 3B42RT, durant la période test durant la période test (5)

### V.3. Application du RBF

Le réseau RBF a été appliqué pour l'ajustement des produits de précipitation satellitaires, la fonction sigmoïde pour les neurones de la couche cachée et la fonction linéaire pour le neurone de sortie sont choisies pour cette simulation, L'apprentissage du réseau s'est fait en utilisant l'algorithme de Levenberg-Marquardt sur les combinaisons d'entrées dans le but de définir le vecteur le plus approprié pour une meilleure performance.

Afin d'obtenir la configuration optimale de la couche cachée, on a varié à chaque fois le nombre de neurone (de 2 jusqu'à 10) et mesurer la performance du modèle. Les résultats des configurations optimales ont été sauvegardés et montrés dans les tableaux et figures au-dessous.

#### V.3.1. TRMM 3B42V7

Le (Tableau V.3) résume les résultats obtenus des modèles RBF appliqués sur les données du produit de précipitation 3B42V7, en fonction des critères de performances ( $R^2$  %, BIAIS, RMSE), les résultats obtenus avec les différentes entrées de combinaison sont généralement proches les uns aux autres, pour la période test.

Dans la phase de test, le RMSE est varié entre 3,88 et 5,93. la (C9) est de meilleure performance avec (RMSE=3,88mm), et de ( $R^2 = 59,47$  %).

Tableau V.3 - Résultats des simulations du modèle RBF pour le produit 3B42V7

station-satellite	Nombre de neurone dans la couche cachée	Apprentissage			Validation			Test		
		R <sup>2</sup> %	RMSE	BIAS	R <sup>2</sup> %	RMSE	BIAS	R <sup>2</sup> %	RMSE	BIAS
C1	3	22,93	25,09	0,05	26,34	8,62	0,05	38,39	6,85	-0,11
C2	6	24,84	17,36	0,04	26,48	6,90	0,23	41,55	4,63	-0,13
C3	3	46,26	13,78	0,04	25,50	6,11	0,23	39,92	4,69	-0,13
C4	10	48,36	13,32	0,04	21,58	6,88	0,23	23,44	5,93	-0,13
C5	8	42,34	14,41	0,04	25,44	6,97	0,23	58,87	4,61	-0,13
C6	4	44,60	14,03	0,04	24,69	7,68	0,23	56,61	4,50	-0,13
C7	6	55,71	12,08	0,04	24,74	6,43	0,23	43,15	4,87	-0,13
C8	5	48,08	13,47	0,04	24,21	6,40	0,23	40,20	4,62	-0,13
<b>C9</b>	4	56,69	11,91	0,04	23,09	6,98	0,23	55,80	4,02	-0,13
		57,56	11,68	0,04	22,39	7,16	0,23	<b>59,47</b>	<b>3,88</b>	<b>-0,13</b>



Figure V.11 - Performances des modèle RBF en fonction des combinaisons des entrées au niveau des critères (a) RMSE, (b)  $R^2$  %, durant la période test

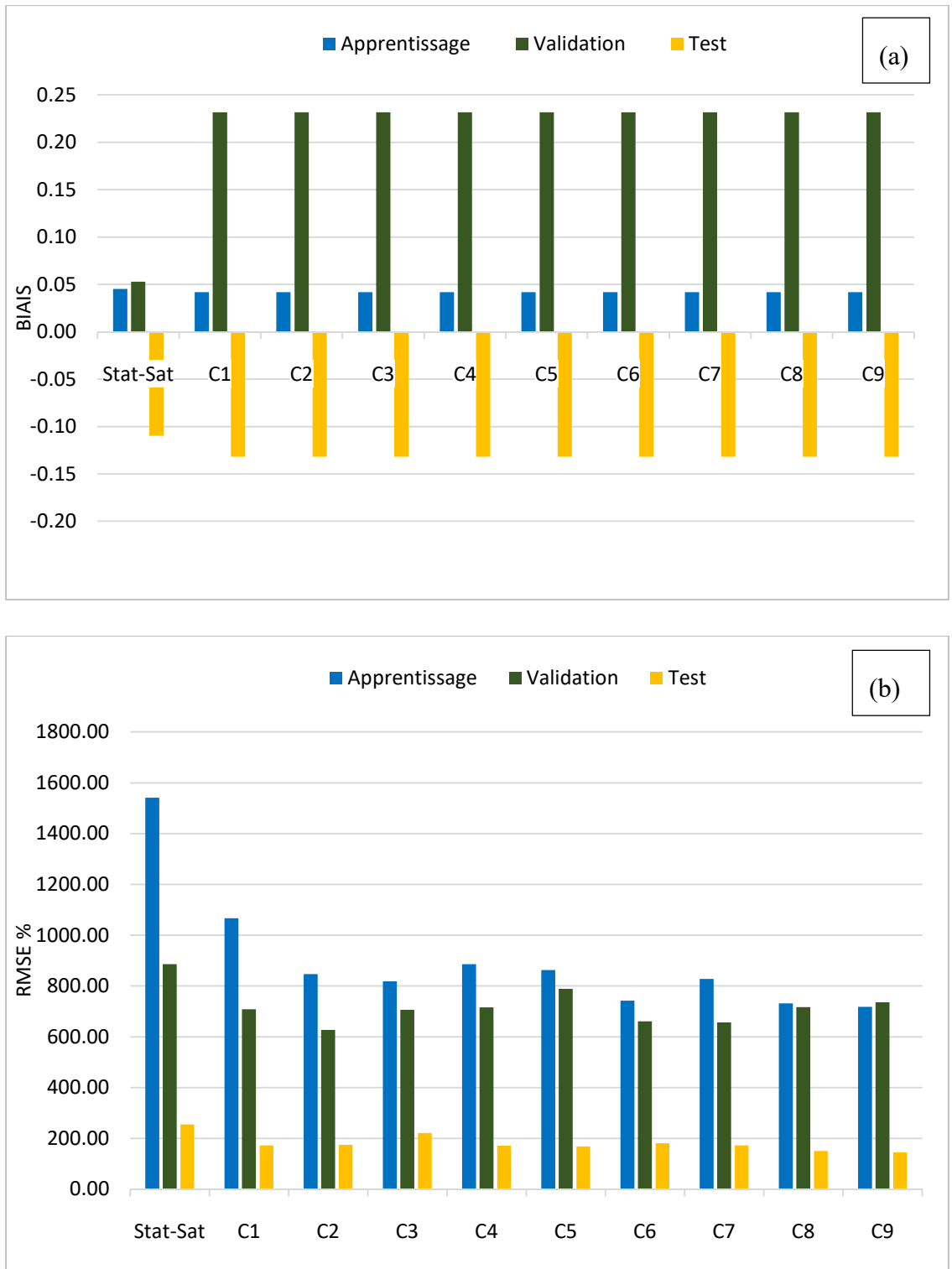


Figure V.12 - Performances des modèle RBF en fonction des combinaisons des entrées au niveau des critères (a) BIAIS, (b) RMSE%, durant la période test

On peut voir à partir de la (Figure V.11) qui illustre les performances atteintes par le modèle RBF utilisant différentes entrées (Combinaisons) au niveau des critères RMSE,  $R^2$  %,



que la combinaison C1 qui utilise seulement la pluie au temps  $t$  qui donne les plus mauvais résultats. Ces résultats s'améliorent au fur et à mesure qu'on rajoute des variables en entrée. L'ajout d'un délai de pluie en plus fait qu'il y ait une amélioration considérable au niveau de la simulation. La (C9) est celui qui donne de meilleurs résultats si on se base sur les critères RMSE et  $R^2$  % (3,88 et 59,47 respectivement). La (Figure V.12, a) montre que les données qui a été simulé a été grandement sous-estimé avec tous les combinaisons.

La (Figure V.13), représente le RMSE% de produit de précipitation satellitaires (3B42RT) et RMSE% de la meilleure performance la combinaison C9, pour déférente intensité de précipitation (divisé en fonction des données des stations),

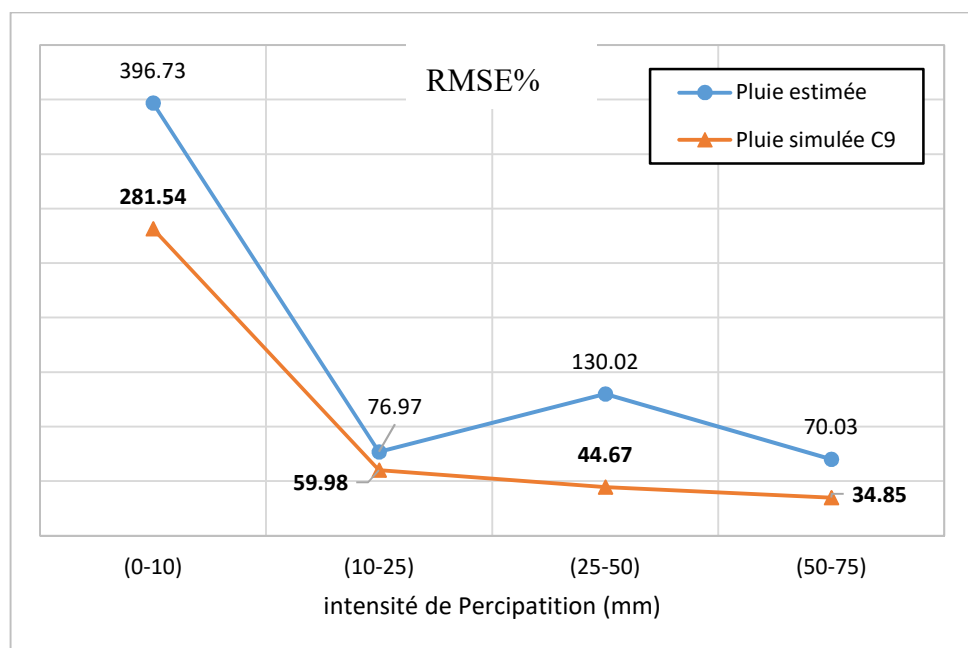


Figure V.13 - RMSE% de produits de précipitation satellitaires (3B42V7) et combinaison C9, pour déférente intensité de précipitation

Généralement le RMSE% de pluie simulée est inférieur que la pluie estimée, pour la pluie simulée le RMSE% a diminué avec l'augmentation de intensités de précipitation, le RMSE% du produit 3B42V7 diminué (de 396.73 à 281.54) pour les précipitations moins de 10mm. Les valeurs de RMSE% sont inférieur à 50% (44.67 et 34.85 lorsque les intensités de précipitation ont été 35-50 et 50-75mm respectivement), ces résultats indiquent que la pluie simulée est fiable lorsque la pluie est supérieure à 50mm.

Les (Figures V.14 et V.15) montrant que la pluie simulée de la combinaison C9 suit plus ou moins bien la dynamique de la variation de la pluie mesure du sol en fonction du temps.

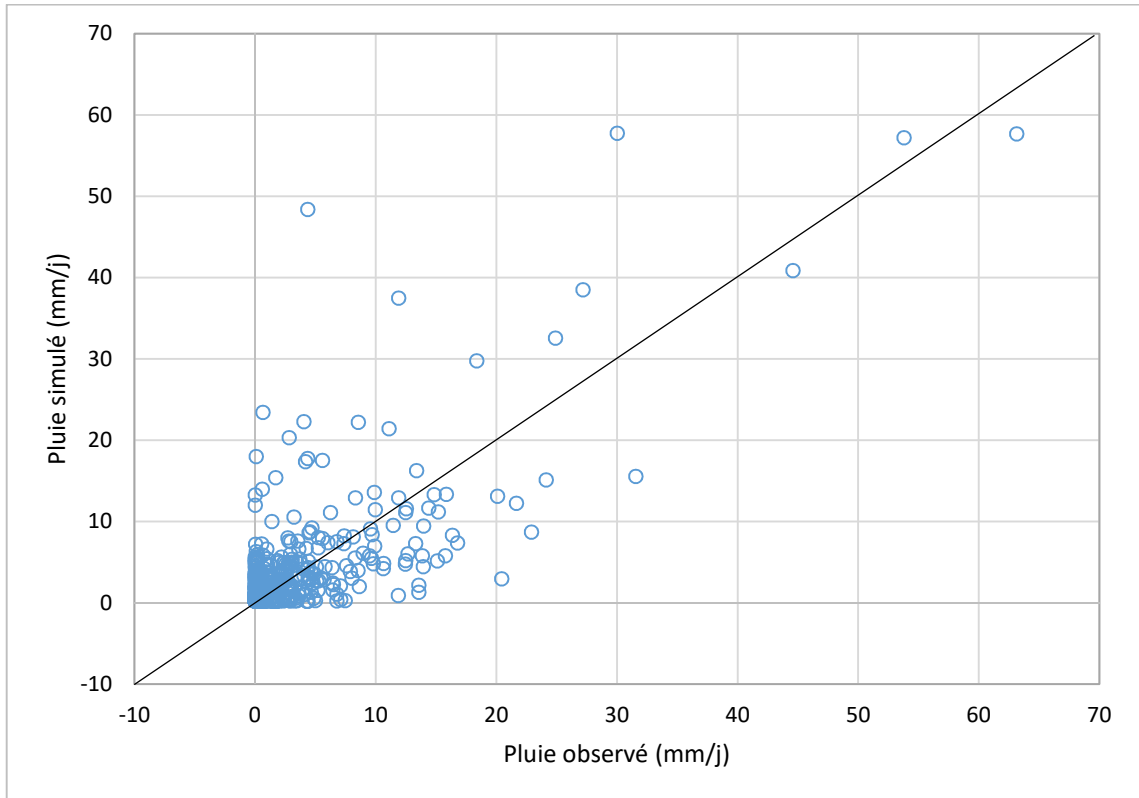


Figure V.14 - Nuages de points montre la simulation avec le modèle RBF utilise les pluies du 3B42V7 durant la période test (C9)

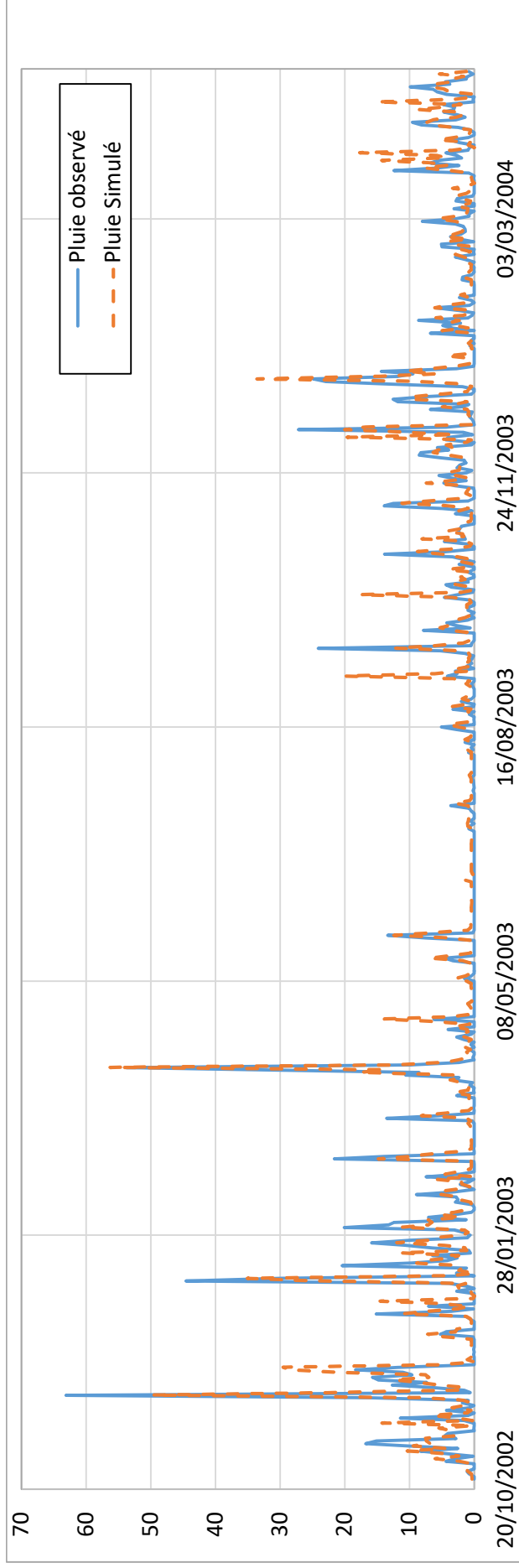


Figure V.15 - séries chronologiques montrant la simulation avec le modèle RBF utilisent les pluies du 3B42V7 durant la période test (C9)

### V.3.2. TRMM 3B42RT

Le (Tableau V.4) résume les résultats obtenus des modèles PMC appliqué sur les données du produit de précipitation 3B42RT, en fonction des critères de performances ( $R^2$  %, BIAIS, RMSE),

A partir le (Tableau V.4), on peut voir que les résultats obtenus avec les différentes entrées de combinaison sont généralement proches les uns aux autres.

Dans la (Station-Satellite) nous avons calculé les critères de performances sur les données (données estimât de 3B42RT et mesures des stations) avant l'application de modèle, pour comparer la performance de la modèle.

Dans la phase de test, le RMSE est varié entre 2,97 et 3,55. En remarque que les combinaisons (C6 et C8) sont de meilleur performances avec (RMSE = 2,97 mm), Le (C8) est de coefficient de détermination ( $R^2 = 59,47$  %), mieux que (C6) avec et de ( $R^2 = 34,12$  %).

Tableau V.4 - Résultats des simulations du modèle RBF pour le produit 3B42RT

Station-Satellite	Nombre de neurone dans la couche cachée	Apprentissage			Validation			Test		
		R <sup>2</sup> %	RMSE	BIAS	R <sup>2</sup> %	RMSE	BIAS	R <sup>2</sup> %	RMSE	BIAS
C1	-	9,85	22,71	-0,28	22,39	4,77	0,16	4,87	5,02	-0,42
C2	3	14,30	20,99	-0,33	11,59	4,58	-0,07	13,21	3,49	-0,62
C3	6	55,00	9,63	-0,26	10,27	3,10	-0,09	12,58	3,51	-0,62
C4	3	47,56	11,36	-0,30	8,08	3,37	-0,04	11,32	3,55	-0,64
C5	10	28,03	16,17	-0,10	30,37	4,02	0,16	30,23	3,06	-0,25
C6	8	30,01	15,70	-0,10	26,33	3,96	0,19	31,14	3,03	-0,27
C7	4	16,56	6,48	-0,04	27,68	2,55	0,12	34,12	<b>2,97</b>	-0,35
C8	6	49,82	8,78	-0,11	13,42	2,96	0,21	16,34	3,36	-0,46
C9	5	64,48	6,46	-0,04	27,43	2,54	0,11	<b>34,34</b>	<b>2,97</b>	-0,37
	4	66,58	6,00	-0,04	29,72	2,45	0,13	31,71	3,03	-0,30

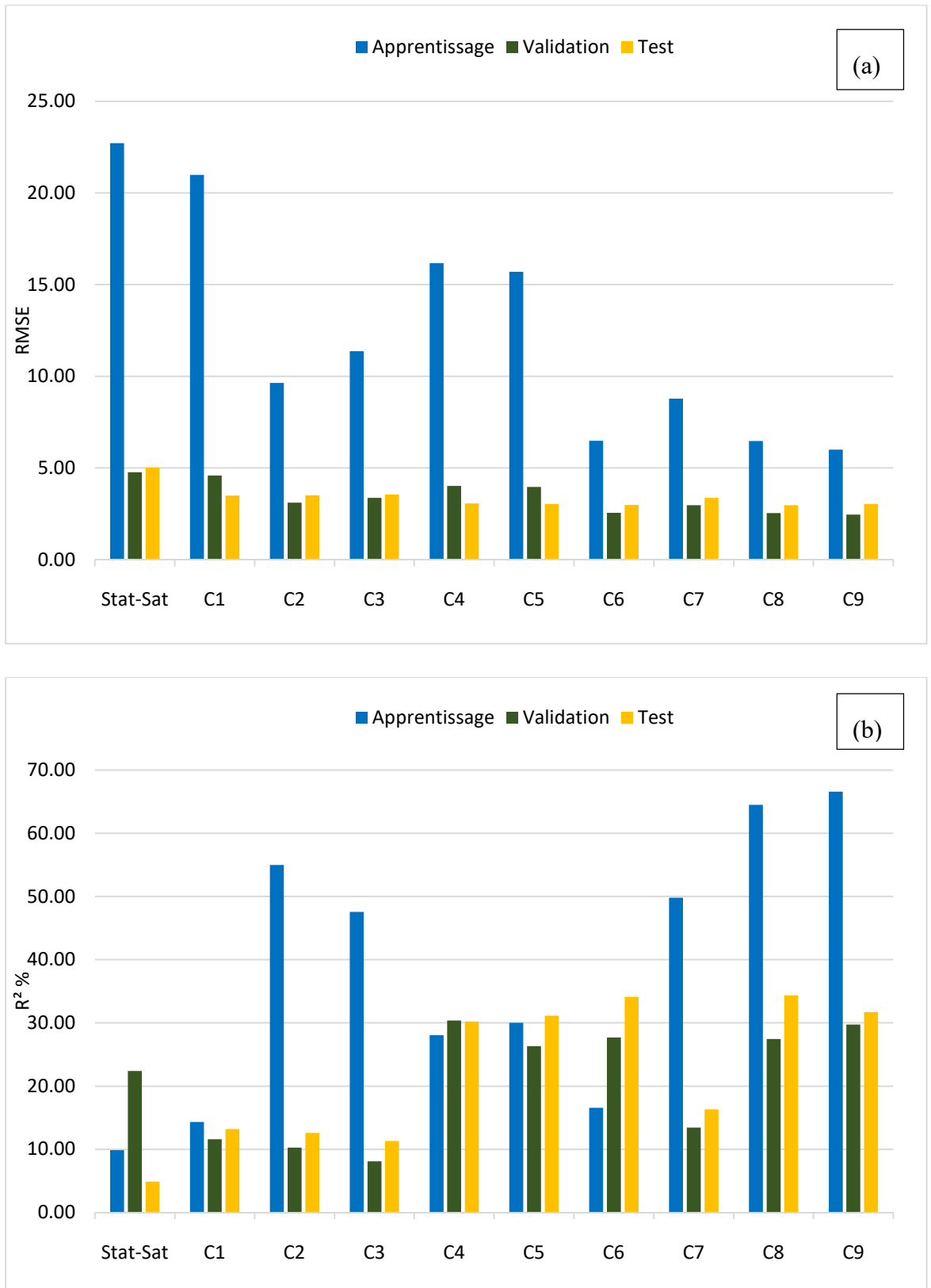


Figure V.16 - Performances des modèle RBF en fonction des combinaisons des entrées au niveau des critères (a) RMSE, (b) R<sup>2</sup> %, durant la période test

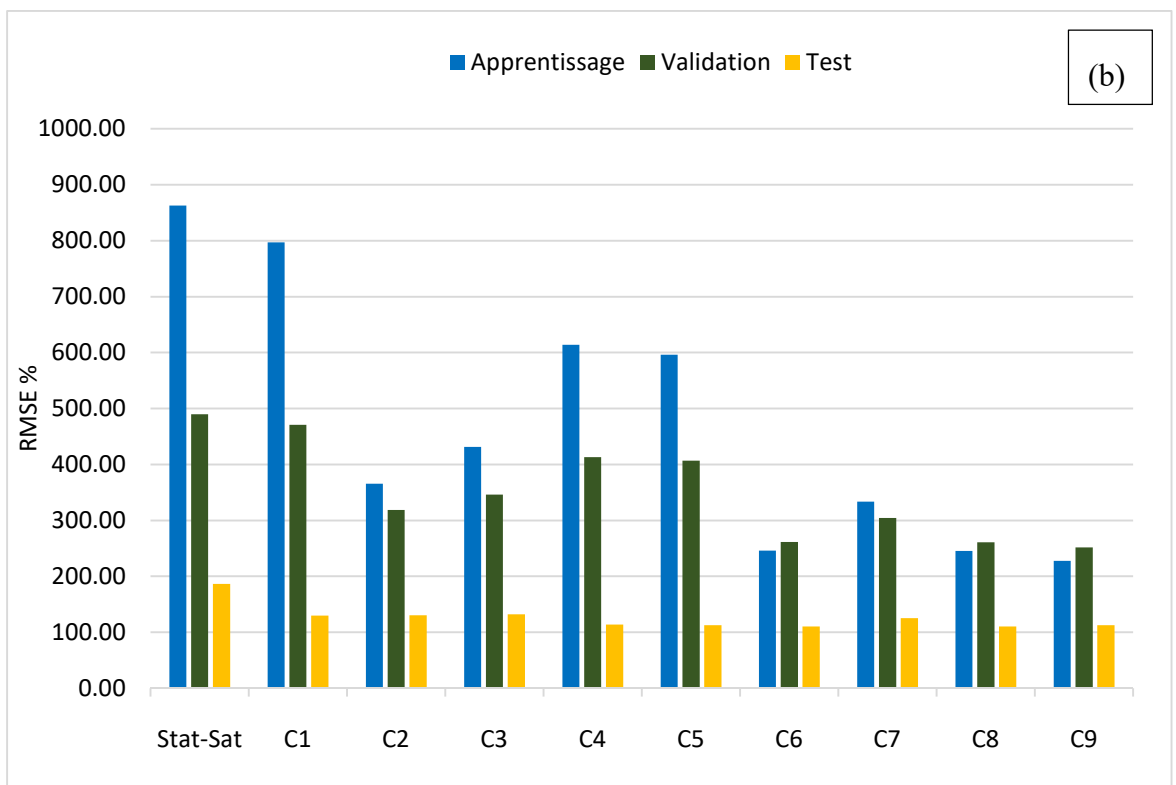
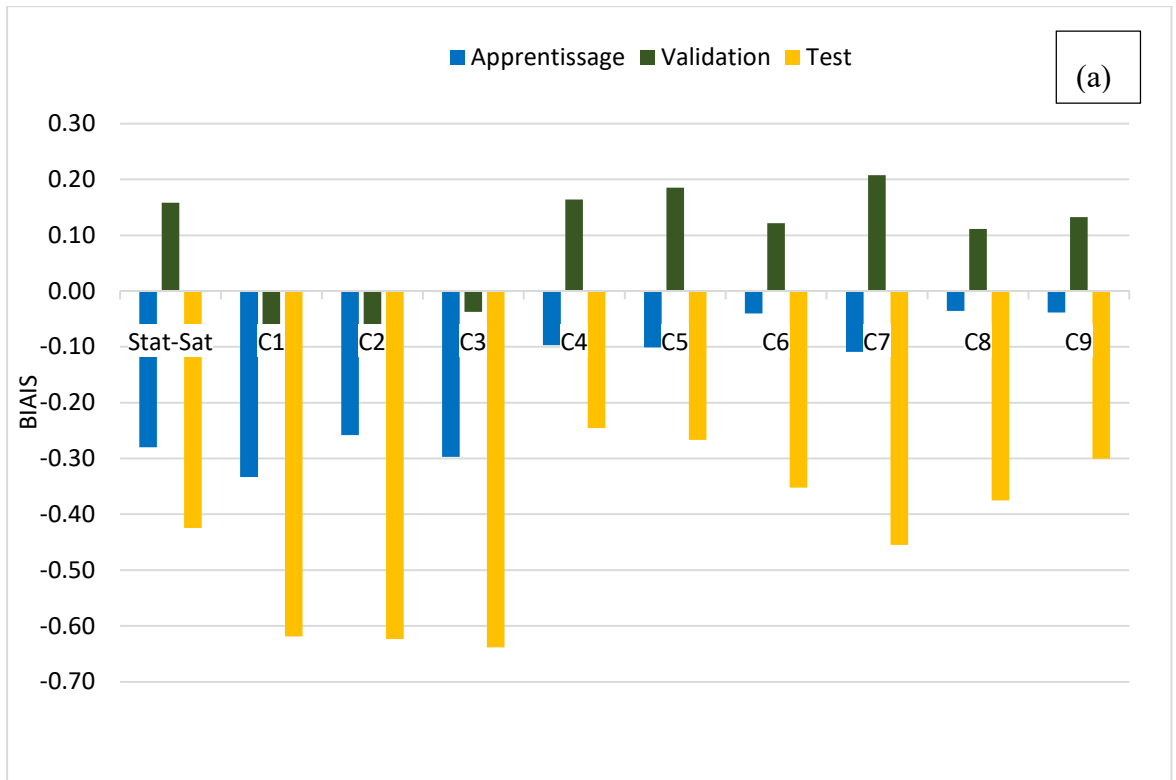


Figure V.17 - Performances des modèle RBF en fonction des combinaisons des entrées au niveau des critères (a) BIAIS, (b) RMSE%, durant la période test

On peut voir à partir de la (Figure V.16) qui illustre les performances atteintes par le modèle RBF utilisant différentes entrées (Combinaisons) au niveau des critères RMSE,  $R^2$  %, que la combinaison C1 qui utilise seulement la pluie au temps t qui donne les plus mauvais résultats. Ces résultats s'améliorent au fur et à mesure qu'on rajoute des variables en entrée. L'ajout d'un délai de pluie en plus fait qu'il y ait une amélioration considérable au niveau de la simulation. Les combinaisons (C6 et C8) sont celui qui donne de meilleurs résultats si on se base sur le critère de RMSE (2.97mm), alors que le (C8) effectue une meilleure performance par rapport au critère  $R^2$  (34,34 %).

La (Figure V.17, a) montre que les données qui a été simulé a été grandement sous-estimé avec tous les combinaisons.

Le RMSE% de produit de précipitation satellitaires (3B42RT) et RMSE% de la meilleure performance la combinaison C8, pour déférente intensité de précipitation (divisé en fonction des données des stations), représentant dans La (Figure V.18),

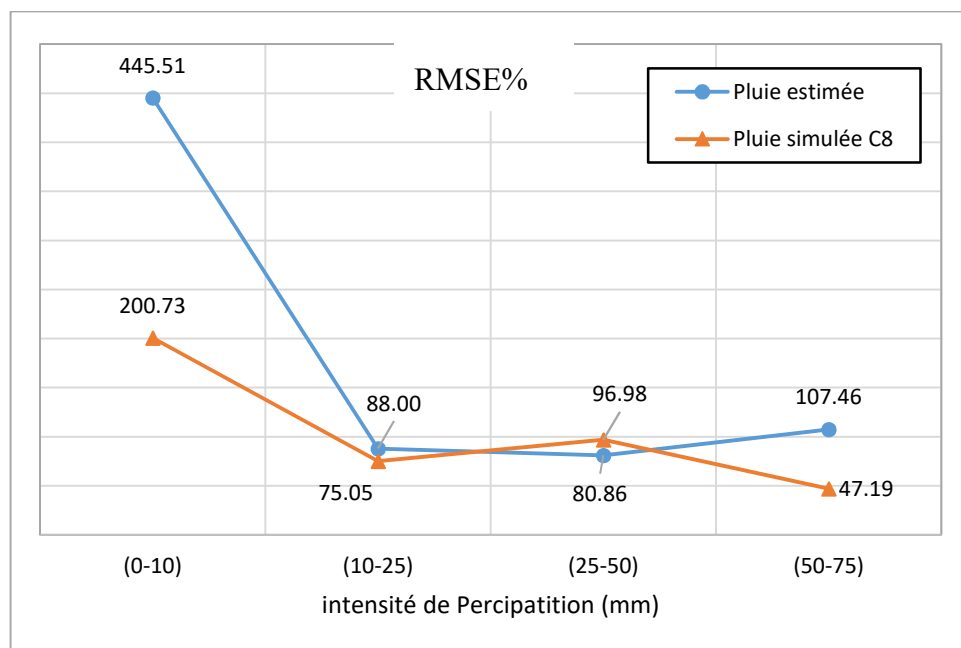


Figure V.18 - RMSE% de produits de précipitation satellitaires (3B42RT) et combinaison C8, pour déférente intensité de précipitation

Généralement Le RMSE% de pluie simulée est inférieur que la pluie estimée dans tous les intensités des précipitations, sauf dans l'intensité (25-50) elle est supérieur à pluie estimée, Le RMSE% pour la pluie simulée a diminué avec l'augmentation de intensité de précipitation, le RMSE% du produit 3B42V7 diminué (de 445.51 à 200.73) pour les précipitations moins de 10mm. RMSE% est inférieur à 50% (47.19 lorsque l'intensité de précipitation ont été 50–



75mm), Ces résultats qui sont en accord avec l'étude de Liu et al. (2015) indiquent que les données des deux produits sont pas fiables lorsque la pluie est supérieure à 50mm.

Les (Figures V.19 et V.20) montrant les simulations avec le modèle RBF en fonction des précipitations journalières des stations et les données de 3B42RT pour la période 2000-2004 durant la phase de test. La simulation de la combinaison 8, suit plus ou moins bien la dynamique de la variation de la pluie mesure du sol en fonction du temps.

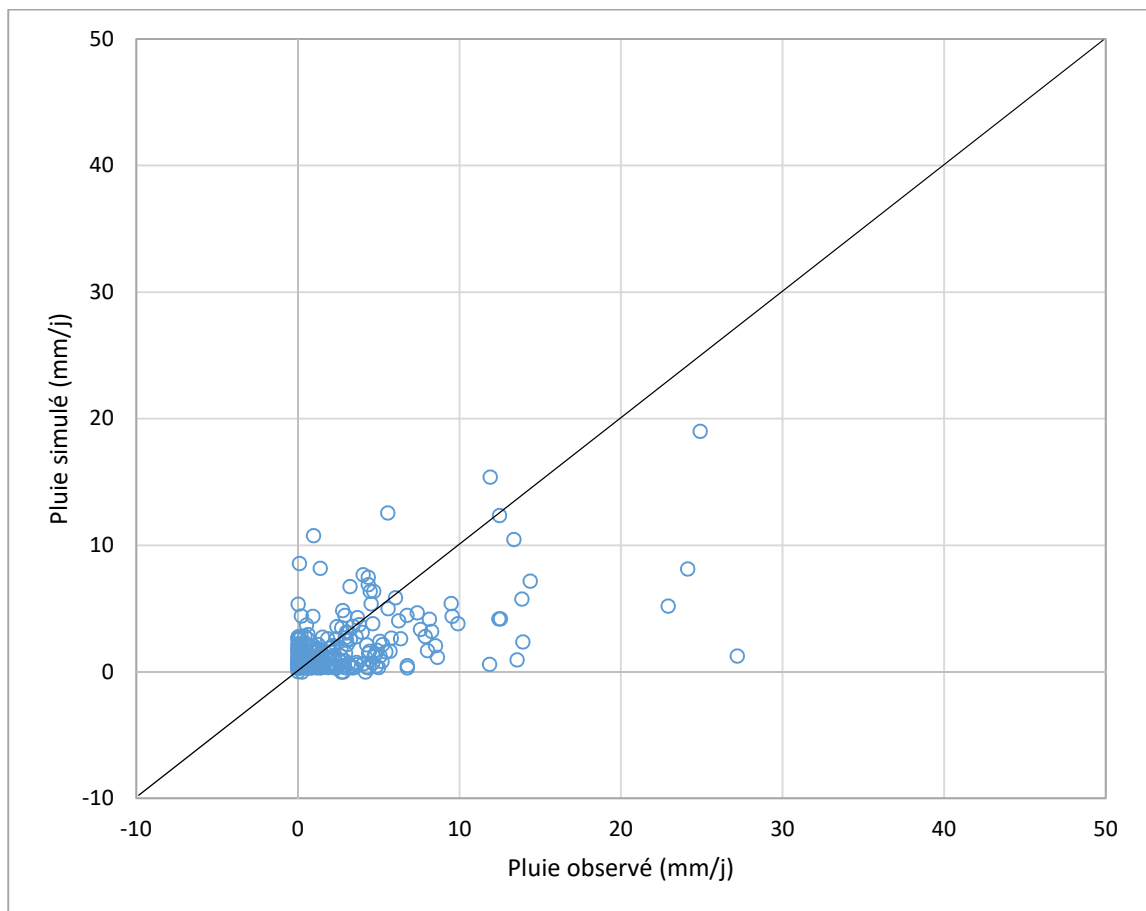


Figure V.19 - Nuages de points montre la simulation avec le modèle RBF utilisent les pluies du 3B42RT durant la période test (C8)

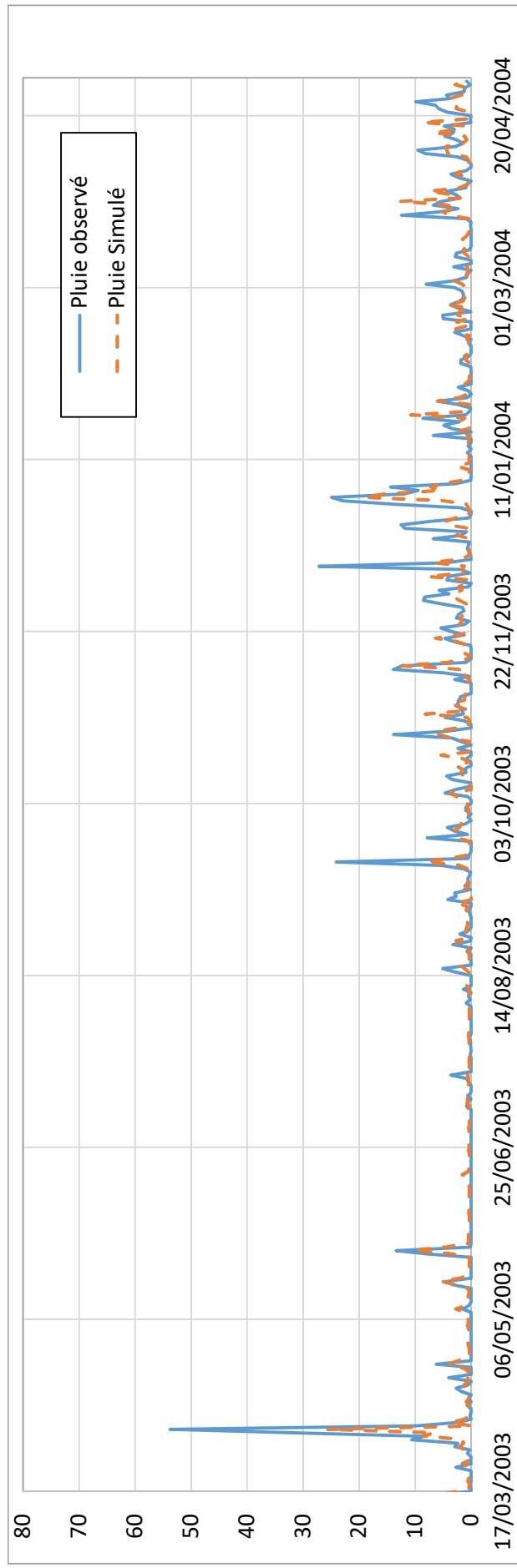


Figure V.20 - Séries chronologiques montrant la simulation avec le modèle RBF utilisant les pluies du 3B42RT durant la période test (C8)

### V.4. Conclusion

Pour l'ajustement des mesures satellitaires, deux modèles de type empirique ont été utilisées. Un réseau de neurone de type perceptron multicouches (PMC) avec une seule couche cachée et un réseau de neurones à base radiale (RBF). L'algorithme de Levenberg-Marquard a été utilisé pour son apprentissage. La précipitation surfacique des produits de précipitation (3B42V7 et 3B42RT) sont introduites séparément comme entrée du réseau de neurones, la précipitation surfacique des stations est utilisée pour la calibration des modèles. Dans les deux modèles nous avons varié les entrées (différentes combinaisons), les performances changent en ajoutant ou en retirant une variable ou un délai.

Dans l'application de PMC, de bons résultats ont été obtenus en utilisant les différentes entrées (Combinaison). En termes de critères RMSE, c'est la combinaison (C5) qui effectue les meilleures performances (pour les deux produits 3B42V7 et 3B42RT), alors qu'en termes de critère  $R^2$  % (coefficient de détermination) c'est les (C7) et (C5) pour 3B42V7 et 3B42RT respectivement.

Pour le modèle RBF, les résultats sont moins bons que ceux du PMC en terme de critères RMSE et  $R^2$  %, la combinaison (C9) effectue la meilleure performance par rapport aux critères RMSE et  $R^2$  % pour le 3B42V7, alors que c'est (C8) qu'on trouve de meilleures résultats au niveau des critères RMSE et  $R^2$  %.

On peut déduire que le produit 3B42V7 est de meilleures performances que le produit 3B42RT, la modèle PMC mieux que RBF, en termes de la performance des produits.

La pluie simulée c'obtient à partir de l'application du modèle RBF, pour les deux produits sont fiables lorsque la précipitation supérieure à 50mm, qui sont en accord avec l'étude de Liu et al. (2015). Les valeurs de RMSE% de la pluie simulée est égale ou inférieure à 50% (34.85 et 47.19 pour 3B42V7 et 3B42RT respectivement) lorsque la précipitation a été supérieure à 50mm. Par contre le RMSE% des pluies simulées du PMC est supérieur à 50% pour les deux produits (69.82 et 68.29 pour 3B42V7 et 3B42RT respectivement).

# Conclusion générale

### Conclusion générale

Le besoin de mesure pluviométrique est d'une importance capitale pour divers applications hydrologiques. Etant donnée la non disponibilité mais aussi la qualité médiocre des mesures dans les stations au sol en Algérie, il est plus qu'évident de trouver une alternative pour remplacer ou compléter le rôle de ces stations. On se tourne dans cette études aux mesures par satellite, qui non seulement sont disponibles mais couvrent la quasi-totalité du globe terrestre.

Nous avons étudié le taux de précipitation fourni par deux satellites, les avons comparés avec des mesures au sol et essayer de faire un ajustement utilisant deux méthodes d'intelligences artificiels (PMC et RBF) par rapport aux stations du sol.

Cette étude a été réalisée sur le sous bassin (1406) de oued Seybouse (nord-est de l'Algérie). L'étude a été effectuée à l'échelle de temps journalière entre 1998 et 2004. La disponibilité des produits 3B42RT ne débute qu'à partir de l'année 2000 et c'est à cet effet que la comparaison et l'ajustement de ces produits ne commencent qu'à partir de cette date.

Dans la comparaison, on a estimé les pluies surfaciques utilisant les stations au sol par la méthode dite, polygones de Theissen, mais aussi les produits satellitaires (3B42V7 et 3B42RT) utilisant les pixels qui couvrent la surface du sous bassin étudié. Cette comparaison s'est basée principalement sur l'utilisation de plusieurs critères d'efficacités ( $R^2$ , Biais, RMSE, RMSE%). les données 3B42V7 montrent un meilleur accord avec les données de stations avec un  $R^2$  de 0,3 alors que le  $R^2$  du produit 3B42RT est égale à 0,14. Selon le critère BIAIS, les mesures du produit 3B42V7 sont surestimées. Par contre la produit 3B42RT est sous-estimée avec (Biais = -0,272). Le produit 3B42RT présente le RMSE le plus bas (5.1mm/jour) par rapport au produit 3B42V7 (5.14), Les deux produits de précipitation avait relativement grande erreurs pour les petites précipitations, lorsque les précipitations intensités ont été plus grandes que 50 mm, les valeurs de RMSE% sont supérieur à 50% (107.46 pour 3B42V7, 70.03 pour 3B42RT lorsque l'intensité ont été 50–75mm). Le RMSE% indiquent que les données des deux produits ne sont pas fiables.

Nous avons observé une différence claire entre les mesures des stations au sol et les mesures par satellite, le produit 3B42V7 est mieux que 3B42RT dans l'estimation de la précipitation.

Les estimations de 3B42V7 suivent la dynamique des mesures du sol, mais ne donne pas des valeurs proches des précipitations enregistrées dans les stations elle est montrée une forte surestimation dans les valeurs max de précipitation, et de mauvaises performances dans l'estimation de faibles valeurs de précipitation. On remarque aussi que les produits satellitaires estiment plusieurs fois dans l'année une tombée de pluie alors que les stations au sol n'enregistrent aucune pluie. On peut voir que le produit 3B42RT elle suit le dynamique de mesures du sol, elle est inférieure que le 3B42V7 dans la surestimation. Parfois, cela nous donne une bonne estimation. Les deux produits de précipitation avaient relativement grandes erreurs pour les petites précipitations, lorsque les précipitations intensités ont été plus grandes de 50 mm, les valeurs de RMSE% sont supérieures à 50% (107.46 pour 3B42V7, 70.03 pour 3B42RT lorsque l'intensité ont été 50–75mm), le RMSE% indique que les données des deux produits ne sont pas fiables.

Deux modèles d'intelligences artificielles ont été utilisés dans l'ajustement des produits satellitaires. Un réseau de neurone de type perceptron multicouches (PMC) avec une seule couche cachée et un réseau de neurones à base radiale (RBF). Nous avons ajusté les mesures satellitaires en testant les deux méthodes (PMC et RBF). L'apprentissage a été effectué en utilisant l'algorithme de Levenberg-Marquard pour les deux modèles. La procédure de essai-erreur a été utilisée sur plusieurs entrées afin d'arriver aux meilleures performances.

La précipitation surfacique des produits de précipitation (3B42V7 et 3B42RT) sont introduites séparément comme entrée du réseau de neurones, la précipitation surfacique des stations est utilisée pour la calibration des modèles.

Les résultats de l'application des PMC et RBF ont montré que dans le PMC, de bons résultats ont été obtenus en utilisant les différentes entrées (Combinaison). En termes de critères RMSE, c'est la combinaison C5 qui effectue les meilleures performances (3.81 et 2.93 pour les deux produits 3B42V7 et 3B42RT, respectivement), alors qu'en termes de critère  $R^2$  (coefficient de détermination) c'est les C7 ( $R^2 = 60.41$ ) et C5 ( $R^2 = 36.65$ ) pour 3B42V7 et 3B42RT respectivement. Pour le modèle RBF, les résultats sont moins bons que ceux du PMC en termes de critères RMSE et  $R^2$ , la combinaison C9 effectue la meilleure performance par rapport aux critères RMSE et  $R^2$  (RMSE = 59.47,  $R^2 = 3.88$ ) pour le 3B42V7, alors que c'est C8 qu'on trouve de meilleurs résultats au niveau des critères RMSE et  $R^2$  (RMSE = 34.34,  $R^2 = 2.97$ ).

On peut déduire que le produit 3B42V7 est de meilleures performances que le produit 3B42RT en terme de précision et que la modèle PMC est meilleur que celui du RBF en termes de performance dans l'ajustement des produits satellitaires.

Ces résultats indiquent que TRMM 3B42V7 et TRMM 3B42RT ont un bon potentiel pour des applications hydrologiques journalières (exploitation des barrages, protection contre les inondations, la gestion de la ressource en eau...etc.).

L'approche développée dans cette étude, être exploité entre autres dans les applications suivantes :

- Régionalisation du modèle appliquée pour les bassins à proximité qui ne sont pas jaugés
- Dans le cas de problème dans des stations pluviométrique en peut compter sur les produits satellitaires.

Comme perspectives de cette étude, on recommande de :

- Tester d'autres méthodes d'intelligences artificielles (SVM, GEP...etc.) pour l'ajustement
- Tester d'autres produits satellitaires (PERSIANN, CMORPH...etc.) en passant par une évaluation méticuleuse.
- Appliquer dans un modèle pluie-débit comme entrées les données ajustées des produits satellitaires et les données mesurées au sol pour comparer les résultats de simulations obtenus.

# BIBLIOGRAPHIE



## BIBLIOGRAPHIE

- Ahmed, Sari. 2002. *L'hydrologie de surface* (Universié de Bab Ezzouar, Alger).
- Bellerby, Tim, Martin Todd, Dom Kniveton, and Chris Kidd. 2000. 'Rainfall estimation from a combination of TRMM precipitation radar and GOES multispectral satellite imagery through the use of an artificial neural network', *Journal of Applied meteorology*, 39: 2115-28.
- Bennani, Mohammed. 2016. 'Etude de la variabilité spatio-temporelle des précipitations dans le Nord-Est d'Algérie', M Achite.
- Boulmaiz, Tayeb. 2016. 'Contribution dans la modélisation de la relation pluie-débits', thèse de doctorat.
- Boushaki, Farid Ishak, Kuo-Lin Hsu, Soroosh Sorooshian, Gi-Hyeon Park, Shayesteh Mahani, and Wei Shi. 2009. 'Bias adjustment of satellite precipitation estimation using ground-based measurement: A case study evaluation over the southwestern United States', *Journal of Hydrometeorology*, 10: 1231-42.
- Bouthevillain, Karine, and Alexandre Mathis. 1995. 'Prévisions: mesures, erreurs et principaux résultats', *Economie et statistique*, 285: 89-100.
- Chai, Tianfeng, and Roland R Draxler. 2014. 'Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?—Arguments against avoiding RMSE in the literature', *Geoscientific model development*, 7: 1247-50.
- Duan, Zheng, WGM Bastiaanssen, and Junzhi Liu. 2012. "Monthly and annual validation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) products in the Caspian Sea Region for the period 1999–2003." In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International*, 3696-99. : IEEE.
- Elbasit, Mohamed A. M. Abd, Eltayeb O. Adam, Khaled Abu-Taleb, Fethi Ahmed, Hiroshi Yasuda, and Chandra S. P. Ojha. 2017. 'Space-Borne Rainfall Measurement over Arid Regions', *Sustainable Water Resources Management*.
- Fatima, Mrabti, and Seridi Hamid. 2009. 'Comparaison de méthodes de classification réseau RBF, MLP et RVFLNN1', *Damascus University Journal Vol,(25)-No.(2)*.
- Franchito, Sergio H, V Brahmananda Rao, Ana C Vasques, Clovis ME Santo, and Jorge C Conforte. 2009. 'Validation of TRMM precipitation radar monthly rainfall estimates over Brazil', *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114.
- Hu, Qingfang, Dawen Yang, Zhe Li, Ashok K Mishra, Yintang Wang, and Hanbo Yang. 2014. 'Multi-scale evaluation of six high-resolution satellite monthly rainfall estimates over a humid region in China with dense rain gauges', *International Journal of Remote Sensing*, 35: 1272-94.
- Huffman, George J, David T Bolvin, Eric J Nelkin, David B Wolff, Robert F Adler, Guojun Gu, Yang Hong, Kenneth P Bowman, and Erich F Stocker. 2007. 'The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales', *Journal of Hydrometeorology*, 8: 38-55.
- Kummerow, Christian, J Simpson, O Thiele, W Barnes, ATC Chang, E Stocker, RF Adler, A Hou, R Kakar, and F Wentz. 2000. 'The status of the Tropical Rainfall Measuring

- Mission (TRMM) after two years in orbit', *Journal of Applied meteorology*, 39: 1965-82.
- Liu, Junzhi, Zheng Duan, Jingchao Jiang, and A Zhu. 2015. 'Evaluation of three satellite precipitation products TRMM 3B42, CMORPH, and PERSIANN over a subtropical watershed in China', *Advances in Meteorology*, 2015.
- Mebarki, Azzedine. 2005. 'Hydrologie des bassins de l'Est algérien: ressources en eau, aménagement et environnement', *Thèse de doctorat d'état. Université Mentouri de Constantine*.
- Parizeau, Marc. 2004. *réseaux de neurones* ( université laval).
- Tan, Mou Leong, Ab Latif Ibrahim, Zheng Duan, Arthur P Cracknell, and Vincent Chaplot. 2015. 'Evaluation of six high-resolution satellite and ground-based precipitation products over Malaysia', *Remote Sensing*, 7: 1504-28.
- Tobin, Kenneth J, and Marvin E Bennett. 2010. 'Adjusting satellite precipitation data to facilitate hydrologic modeling', *Journal of Hydrometeorology*, 11: 966-78.
- Touzet, Claude. 1992. *Les réseaux de neurones artificiels, introduction au connexionnisme* (EC2).
- Wira, Patrice. 2009. 'Réseau de neurones artificiels : architectures et applications', *Université de Haute Alsace, Laboratoire MIPS (Modélisation, Intelligence, Processus, Systèmes)*.
- Xue, Xianwu, Yang Hong, Ashutosh S Limaye, Jonathan J Gourley, George J Huffman, Sadiq Ibrahim Khan, Chhimi Dorji, and Sheng Chen. 2013. 'Statistical and hydrological evaluation of TRMM-based Multi-satellite Precipitation Analysis over the Wangchu Basin of Bhutan: Are the latest satellite precipitation products 3B42V7 ready for use in ungauged basins?', *Journal of Hydrology*, 499: 91-99.
- Jaxa, Eorc. [http://www.eorc.jaxa.jp/TRMM/about/history/history\\_e.htm](http://www.eorc.jaxa.jp/TRMM/about/history/history_e.htm),
- <http://tpepluviometre.e-monsite.com>.
- <Http://www.meteofrance.fr>.

## Résumé

La disponibilité des données de précipitation à haute résolution spatiale est d'une importance fondamentale dans de nombreuses applications hydrologique. Il existe actuellement deux sources principales d'estimation des précipitations : les stations de précipitations et la technologie de télédétection en particulier dans les bassins non mesurés. Nous avons comparé la performance de deux produits de précipitations satellitaires, TRMM 3B42V7, et TRMM 3B42RT, avec les mesures des stations au sol. Nous avons essayé d'améliorer la technologie de télédétection dans une large mesure pour ajuster la qualité des observations de précipitations.

Nous avons utilisé les précipitations journalières (1998-2004) mesurées dans les stations au sol et par satellites dans un sous bassin situé au nord-est de l'Algérie. L'évaluation des deux produits satellitaires (3B42V7 et 3B42RT) a montré que les données 3B42V7 sont en meilleur accord avec les données de stations avec un coefficient de détermination ( $R^2$ ) de 0,3 alors que le  $R^2$  du produit 3B42RT est égale à 0,14. Selon le critère Biais trouvé positif pour le produit 3B42V7, les mesures de ce dernier sont surestimées. Par contre les mesures du produit 3B42RT sont sous-estimée (Biais = - 0,272).

En utilisant deux modèles d'intelligence artificiel qui sont le Perceptron Multi Couche (PMC) et la Fonction à Base Radiale (RBF) comme moyens d'ajustement des produits satellitaires, on s'est aperçu que le 3B42V7 avait la meilleure performance ( $R^2 = 60.4$ ). Pour la pluie supérieure à 50 mm RMSE% de 3B42RT a été inférieur a 50% et le modèle PMC est mieux que le RBF en termes de la performance des produits.

Cette approche présentée peut être utilisée pour ajuster les estimations des systèmes de mesure satellitaire dans n'importe quelle région. Ayant obtenu le modèle, on peut exploiter ces données ajustées efficacement dans le cas de défaillances des stations au sol. Aussi, ces données peuvent faire objet d'une régionalisation par proximité.

**Mots clés:** Produit satellitaire, précipitation, PMC, RBF, Seybous, TRMM, 3B42V7, 3B42RT

## Abstract

The availability of precipitation data at high spatial resolution is of fundamental importance in many hydrological applications. There are currently two main sources of precipitation estimation: precipitation stations and remote sensing technology especially in unmeasured basins. We compared the performance of two satellite precipitation products, TRMM 3B42V7, and TRMM 3B42RT, with ground station measurements. We have tried to improve remote sensing technology to a large extent to adjust the quality of precipitation observations.

We used the daily precipitation (1998-2004) measured in the ground and satellite stations in a sub-basin located in the north-east of Algeria. The evaluation of the two satellite products (3B42V7 and 3B42RT) showed that the 3B42V7 data are in better agreement with the data of stations with a coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0.3 whereas the  $R^2$  of the product 3B42RT is equal to 0.14. Based on the criterion Bias found positive for the product 3B42V7, the measurements of the latter are overestimated. On the other hand, the measurements of the product 3B42RT are underestimated (Bias = -0.272).

Using two artificial intelligence models that are the Perceptron MultiLayer (PMC) and the Radial Base Function (RBF) as tools of adjusting satellite products, we realized that the 3B42V7 had the best performance ( $R^2 = 60.4$ ). For rains greater than 50mm RMSE% of 3B42RT was less than 50% and the PMC model is better than RBF in terms of product performance.

This presented approach can be used to adjust estimates of satellite measurement systems in any region. Having obtained the model, this adjusted data can be exploited effectively in the event of ground station failures. Also, these data can be object of regionalization by proximity.

**Key words:** Satellite product, precipitation, PMC, RBF, Seybous, TRMM, 3B42V7, 3B42RT