

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/291295230>

Modélisation des transferts d'eau et des matières en suspension dans un continuum fluvial lors des événements extrêmes (crues/étiages sévères)

Research · January 2016

DOI: 10.13140/RG.2.1.4087.4004

CITATIONS

2

READS

384

2 authors:



Ratha Chea

University of Battambang

15 PUBLICATIONS 133 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



José Miguel Sánchez Pérez

French National Centre for Scientific Research

225 PUBLICATIONS 3,254 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



AGUAFLASH [View project](#)



Bioaccumulation of REE in plant culture [View project](#)

Master 2 Recherche

« Hydrologie- Hydrochimie-Sol-Environnement »

Etudiant :

Ratha CHEA

Encadré par :

José-Miguel SANCHEZ PEREZ



**Modélisation des transferts d'eau et des matières en suspension
dans un continuum fluvial lors des événements extrêmes
(crues/étiages sévères).**

***Laboratoire d'Ecologie Fonctionnelle et Environnement (ECOLAB) – UMR 5245 CNRS-UPS-
INPT avenue de l'Agrobiopole BP 32607 31326 Castanet Tolosan Cedex 4***

Septembre 2012

REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été faits au sein du Laboratoire d'Ecologie Fonctionnelle et Environnement (ECOLAB) à Toulouse et ont pu être réalisés grâce à l'aide et au soutien de nombreuses personnes. À son terme, je voudrais donc adresser mes remerciements les plus sincères à :

Tout d'abord, mon maître de stage : **M. José-Miguel SANCHEZ-PEREZ** pour la confiance avec laquelle il m'a confié ce stage, ses connaissances, son aide, ses conseils, sa compréhension, sa correction et modification de mon rapport, et particulièrement sa patience et sa gentillesse. Sans lui, il est certain que je n'aurais pas pu réaliser mon mémoire de fin d'études et finaliser mon cursus.

Je voudrais exprimer également mes remerciements à **Mme Sabine SAUVAGE** et **M. Chantha OEURN** pour leurs conseils, leurs temps sacrifiés et leurs aides afin d'améliorer mes travaux.

Je tiens à remercier aussi à **M. Jean-Luc Probst**, Directeur du laboratoire d'ECOLAB, pour leurs conseils concernant le choix des stations d'hydrométrie et climatologiques. Merci à l'équipe **Biogéochimie et des transferts aux interfaces**, ainsi qu'aux personnels du laboratoire ECOLAB : Anne Probst, Annick Corrège, Arnaud Mansat, Maritxu Guiresse, Laurie Bothias, Cyril Garnaux, Hugues Alexandre, ainsi que mes amis au laboratoire: Yi Hong, Graziella, Adrian, Christian, Adrien, Frédéric et Youri.

Je remercie également aux Professeurs **Philippe Behra** et **Jérôme Viers**, responsables de ma formation, pour leur admission au cursus et leurs connaissances au cours de mes études, et aussi un grand merci à mes professeurs et enseignants du Master 2 Recherche Hydrologie-Hydrochimie-Sol-Environnement « H2SE ».

Mes remerciements s'adressent également à **l'Ambassade de France au Cambodge** qui finance mes études.

Enfin, merci énormément à toute ma famille pour son soutien permanent qui me donne toujours le courage de continuer et de terminer mes études. Je n'oublie pas de remercier à toutes les familles cambodgiennes et à mes amis que je connais à Toulouse.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	i
SOMMAIRE	ii
LISTE DES FIGURES.....	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	iv
LISTE DES ABREVIATIONS.....	iv
I. INTRODUCTION	1
II. ETAT DE L'ART.....	3
II.1 Rôle des événements extrêmes dans les transports d'eau et de MES.....	3
II.2 Impact des activités anthropiques sur les transports de MES.....	3
II.3 Modélisation des flux d'eau et de MES sur les grands bassins versants	4
III. MATÉRIELS ET MÉTHODES.....	5
III.1 Site d'étude : bassin versant de la Garonne.....	5
III.1.1 Description générale	5
III.1.2 Climatologie et hydrologie	6
III.2 Source des données	7
III.3 Approche de modélisation.....	8
III.3.1 Modèle SWAT 2009.....	8
III.3.2 Discrétisation des processus dans le modèle SWAT.....	8
III.4 Structure et fonctionnement du modèle SWAT	9
III.4.1 Module hydrologique de SWAT (Figure 5)	9
III.4.2 Module des sédiments de SWAT	9
III.5 Données d'entrée (Input Data) de SWAT	10
III.6 Critère d'évaluation du modèle	13
III.7 Calibration et validation	14
III.7.1 Calibration du module hydrologique	14
III.7.2 Calibration des sédiments	14
IV. RÉSULTATS ET DISCUSSION	15
IV.1 Impact des nombres des sous-bassins sur la réponse hydrologique.....	15
IV.2 Résultats de la simulation du module hydrologique	16
IV.2.1 Simulation des débits journaliers.....	16
IV.2.2 Evolution des valeurs de E_{NS} et de R^2 des 20 stations de jaugeage.....	19
IV.2.3 Typologie des sous-bassins versants de la Garonne.....	20
IV.3 Résultat de la simulation de MES et de sédiments	21
IV.3.1 Simulation de MES.....	21
IV.3.2 Variation de la charge en suspension en fonction des débits	23
IV.3.3 Flux annuel de MES	23
IV.3.4 Flux annuels des sédiments	24
IV.4 Identification des zones d'érosion critiques.....	24
V. CONCLUSION et PERSPECTIVES	26
BIBLIOGRAPHIE	28
ANNEXES	30

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Le bassin de la Garonne	6
Figure 2 : Précipitations moyennes annuelles du bassin de la Garonne des 20 dernières années sur les 39 stations pluviométriques choisies	6
Figure 3 : Carte des principales zones hydrologiques du bassin Adour-Garonne (Probst, 1983)	7
Figure 4: Représentation des sous-bassins et des Hydrological Response Units (HRUs) du modèle SWAT	8
Figure 5 : Cycle hydrologique considéré par le modèle SWAT	9
Figure 6 : Bassin versant de la Garonne délimité par le modèle SWAT à Tonneins.....	10
Figure 7 : Occupation du sol du bassin de la Garonne	11
Figure 8 : Occupation du sol du bassin Adour-Garonne fournie par CORINE Land Cover 2006 ..	11
Figure 9 : Carte pédologique du bassin de la Garonne	12
Figure 10 : Carte pédologique fournie par SGDBE FAO 85 (Portail de l'Europe).....	12
Figure 11 : Répartition des stations pluviométriques au sein du bassin versant étudié (Météo-France)	12
Figure 12 : Graphique de la comparaison des débits mensuels simulés avec les débits observés pour les trois types de découpage en sous-bassins versants (30, 130 et 262 sous-bassins)	15
Figure 13 : Bassin de la Garonne délimité par SWAT, les 20 stations de jaugeage de débit (DREAL), les 39 stations météorologiques (Météo-France)	16
Figure 14 : Comparaison des débits mensuels observés et simulés au cours de 20 ans (1990-2010) à la station de Tonneins.	17
Figure 15: Comparaison des débits journaliers simulés et observés au cours de 20 ans (1990-2010)	17
Figure 16 : Cartographie des transferts spécifiques des débits dans le bassin de la Garonne	21
Figure 17 : Concentrations en MES simulées de janvier 1990 à décembre 2010 et observées mesurées à Agen	21
Figure 18 : Corrélation entre la concentration en MES et le débit moyen journalier (Qmj)	23
Figure 19 : Débits et exportation annuelle de MES simulés à l'exutoire du bassin de la Garonne (Tonneins) et débit annuels simulés et observés.....	23
Figure 20 : Flux des sédiments simulés et flux des sédiments observés(a) et. Corrélation entre les sédiments et les débits (b).	24
Figure 21 : Taux d'érosion spécifiques des sédiments des 130 sous-bassins (a). et Corrélation entre les débits et les taux d'érosion (b).	25

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques hydrologiques de la Garonne au cours des 20 dernières années (Station de jaugeage - Garonne à Tonneins).....	7
Tableau 2 : Classification des valeurs de R^2 et E_{NS} (Parajuli et al., 2009).....	13
Tableau 3 : Classification du découpage des sous-bassins versants étudiés	15
Tableau 4 : Paramètres utilisés pour la calibration des débits à la station de jaugeage de la Garonne à Tonneins.	16
Tableau 5 : Paramètres utilisés pour la calibration des sédiments	16
Tableau 6 : Variation des valeurs de coefficient de Nash E_{NS} et de R^2 des 20 stations de jaugeage.....	19
Tableau 7 : Variation des transports spécifiques des débits des 20 stations de jaugeage.....	20

LISTE DES ABREVIATIONS

AEGA	: Agence de l'Eau Adour-Garonne
CACG	: Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne
CAMP	: Chambre d'Agriculture Midi-Pyrénées
CLC	: Corine Land Cover
DREAL	: Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
ECOLAB	: Laboratoire d'Ecologie Fonctionnelle et Environnement
FAO	: Food and Agriculture Organisation
HRU	: Hydrological Response Unit (Unité de Réponse Hydrologique, URH)
MES	: Matières En Suspension
MNT	: Modèle Numérique de Terrain
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
PTRDB	: PedoTransfer Rules Database
SBV	: Sous-Bassin Versant
SCS	: Service of Conservation Soils
SGDBE	: Soil Geographical Database Eurasia
SIG	: Système d'Information Géographique
SWAT	: Soil and Water Assessment Tool
USDA	: United States Department's Agriculture

I. INTRODUCTION

La récurrence des événements extrêmes (crues et étiages) est fortement conditionnée par les conditions climatiques, mais aussi par les aménagements humains et la gestion des ressources en eau. Les matières particulaires qui sont arrachées aux sols par l'érosion mécanique, transférées dans les versants et dans le continuum fluvial sont associées à la matière organique, qui peut être associée à d'autres molécules comme les pesticides. Ces matières peuvent représenter un risque pour la qualité des ressources en eau (notamment pour l'eau potable) et donc sur la santé des populations et de l'environnement.

Les matières arrachées au continent et véhiculées par les fleuves réduisent le potentiel des terres agricoles, génèrent des pertes de surfaces productives et ont un impact sur les processus biogéochimiques se déroulant en milieu aquatique (Meybeck, 1988). Il est donc essentiel de comprendre les cycles des apports aux rivières et les processus qui affectent les matières qui y sont transportées si l'on veut maintenir une bonne qualité physico-chimique des eaux de rivières. De plus, l'étude du régime hydrologique ainsi que de la qualité de l'eau peut nous aider à mieux comprendre la relation entre les activités humaines en amont et la qualité de l'eau qui résulte en aval (Jalel et al., 2009).

Plusieurs études ont été effectuées sur des petits bassins versants agricoles inférieurs de 100 km² (Lefrançois et al., 2007) afin de quantifier et étudier les facteurs de contrôle des flux d'eau et des transports de MES. Actuellement, peu d'études ont été réalisées pour étudier et quantifier les flux d'eau et de MES pour les grands bassins versants tels que la Garonne, bassin versant composé de différents contextes climatiques et hydrologiques, influencés par la région montagneuse des Pyrénées mais aussi du massif central, par l'océan Atlantique et la mer Méditerranée. Particulièrement, la typologie des sous-bassins se caractérise par une grande variation spatio-temporelle du climat, de l'occupation des sols et de la texture du sol.

Il est certain que les mesures sur le terrain et les échantillonnages sont généralement des tâches difficiles, rarement achevés sur le long terme pour des grands bassins versants. De part ces contraintes de terrain, les modèles jouent un rôle essentiel pour caractériser sur le long terme les flux d'eau et de MES. Beaucoup de modèles ont été développés tels que les modèles statistiques, empiriques, conceptuels et déterministes, afin de résoudre ces problèmes.

L'objectif principal de mon stage est d'étudier et modéliser les transferts d'eau et des matières en suspension dans le continuum fluvial au sein du bassin versant de la Garonne au cours des 20 dernières années (1990-2010) à l'aide de l'approche de modélisation. Nous essayons de :

- Simuler et calibrer sur une longue période les débits journaliers et les flux de MES à l'exutoire du bassin versant (Garonne à Tonneins).
- Identifier les zones des principaux contributeurs des flux d'eau du bassin versant.
- Quantifier les flux d'eau, les flux de MES et des sédiments.
- Identifier les taux d'érosion des sédiments à l'échelle des sous-bassins, ainsi que la corrélation entre les flux d'eau et les transports de sédiment.

A l'échelle des grands bassins versants, la modélisation des processus hydrologiques et des transferts de MES nécessite la prise en compte de l'occupation du sol, du type du sol, des systèmes de culture (pour les bassins versants agricoles) et leur spatialisation ainsi qu'une description de la dynamique des écoulements dans les différents compartiments, tout ceci, en fonction des conditions climatiques.

Pour cela, le choix se porte sur un modèle agro-hydrologique intégrant l'ensemble des données d'entrée telles que l'occupation du sol et des systèmes de culture (via un SIG), les données climatiques, un modèle numérique de terrain (MNT), les données pédologiques, les données liées aux aménagements (barrages, canaux, etc.), ainsi que les processus de transferts dans les différents compartiments du bassin versant, au pas de temps annuel, mensuel et journalier. Le modèle proposé pour cette étude est le modèle SWAT 2009 (Arnold et al., 1998).

La modélisation hydrologique et de MES du bassin de la Garonne, un grand bassin versant très hétérogène d'un point de vue de l'occupation du sol, de la pédologie et climatologique, est une tâche longue et difficile d'une part pour la récolte des données et d'autre part pour la préparation des données d'entrée en adéquation avec le modèle. A ceci s'ajoute les étapes de calibration et de validation du modèle en différents points où les données sont disponibles. La bonne calibration doit se faire à l'échelle des sous-bassins versants de l'amont vers l'aval. Donc, dans le cadre de mon travail, j'ai fait une seule calibration au pas de temps journalier à l'exutoire du bassin versant (Garonne à Tonneins) et des calibrations au pas de temps mensuels des sous-bassins versants proches des stations d'hydrométrie générale choisies.

Les résultats de cette étude pourront nous permettre de simuler sur des longues périodes la réponse hydrologique et des flux de MES du bassin de la Garonne et comprendre la typologie de ces sous-bassins en termes d'apports d'eau et de MES. Enfin, nous pouvons établir la relation empirique entre Débit-MES à l'exutoire et identifier les zones d'érosion critiques.

II. ETAT DE L'ART

II.1 Rôle des événements extrêmes dans les transports d'eau et de MES

Le bassin versant est un système complexe : milieu physique de plusieurs activités anthropiques et naturelles perturbant la quantité et la qualité des ressources en eau (Jalel et al., 2009). La récurrence des événements extrêmes (crues/étiages) joue un rôle très important dans les transports et les dépôts des sédiments dans les cours d'eau.

A l'échelle du bassin versant, l'augmentation des flux de MES est liée au phénomène climatique et conditionnée par les événements extrêmes tels que les crues. Au cours des épisodes de crues, le risque de contamination des eaux de surface par les polluants associés aux sédiments est élevé en provoquant des conséquences remarquables sur les milieux aquatiques. Par contre, ce risque est fortement lié au caractère ponctuel des crues et surtout observé durant les épisodes de crues, plus rarement observé au cours de réponse hydrologique stable du système.

Plusieurs travaux de recherche montrent l'importance d'événements ponctuels et intenses, comme les crues, dans la dégradation de la qualité des eaux de surface. Par exemple, sur la rivière de la Save, il a été montré que 95% des matières en suspension et 62% des nitrates sont transférés durant 20% du temps à l'exutoire (Oeurng et al., 2011a). Par ailleurs, la fréquence des événements climatiques extrêmes susceptibles de provoquer des crues intenses pourrait augmenter avec le changement climatique (Neitsch et al., 2005).

Dans le cas de l'étude de l'hydrologie du bassin de la Garonne à Portet (amont de Toulouse), Probst (1983) a illustré une forte relation linéaire entre le débit ruisselé sur les versants et la charge en suspension dans le cours d'eau, sa corrélation est très significative. Megnounif et al. (2004) a montré aussi que le transport de MES se fait principalement en période de crue et que les principaux facteurs qui contrôlent la production et le transport en suspension dans les bassins versants sont dus essentiellement à l'effet conjugué de l'intensité des précipitations, la configuration du bassin versant et les caractéristiques hydrauliques du cours d'eau.

II.2 Impact des activités anthropiques sur les transports de MES

L'érosion qui se passe régulièrement au sein du bassin versant peut être causée par les processus naturels du bassin en combinaison avec les activités anthropiques. La modification des pratiques agricoles, le changement de l'occupation du sol et l'urbanisation augmentent le taux d'érosion du bassin. Walling et He (1999) a montré qu'en fonction de la géographie du bassin, le taux d'érosion d'un sol qui est occupé par la culture peut varier de 16 à 900 fois plus que lorsque le sol se trouve en condition normale (prairie). Le changement de l'occupation du sol peut influencer le taux de perte du sol si les pratiques agricoles ne sont pas bonnes.

L'augmentation des surfaces imperméables (routes, parking, bâtiments) diminue le taux d'infiltration du sol et augmente le ruissellement de surface vers les cours d'eau. Ce dernier conduit l'écoulement rapide de l'eau provoquant l'érosion importante des berges.

En plus, la construction des barrages hydroélectriques et d'irrigation provoque aussi des impacts sur les transports des sédiments, la plupart des sédiments sont stockés dans la partie aval du barrage. C'est le cas du barrage Assouan sur le fleuve Nil, le flux de sédiment diminue de $100 \cdot 10^6$ t/an à 0 et celui de Mississippi en 1950 réduit 70% de sédiment total, (Walling et Fang, 2003).

II.3 Modélisation des flux d'eau et de MES sur les grands bassins versants

De nombreux travaux ont été réalisés sur les techniques de mesure et d'évaluation des flux d'eau et de MES dans les rivières, la fréquence d'observation et les méthodes de calcul sont les facteurs essentiels qui déterminent la fiabilité des mesures (Probst, 1983 et Maneux, 1998). Les problèmes d'intégration entre les relations des sols, végétation et climatologie sont plus difficiles à prendre en compte à l'échelle des grands bassins versants principalement en raison de la grande variabilité spatio-temporelle des états de surfaces et d'une densité faible de station de mesure (Maneux, 1998).

Au cours des dernières décennies, les suivis des flux d'eau et de MES nous permettent d'acquérir des bases de données permettant de tenter la modélisation des flux d'eau et de MES. Une des premières préoccupations de la modélisation des flux de MES est d'obtenir une bonne modélisation hydrique. Donc, il est important de pouvoir décrire au mieux les relations pluie-débit à l'échelle des bassins versants. Pour les petits bassins versants, certains modèles d'érosion reprennent les principes des modèles de pertes en sol sur une parcelle et intègrent le réseau hydrographique et des possibilités de stockage/déstockage des sédiments qui permet de reproduire d'une façon acceptable les hydrogrammes et les variations des concentrations en MES (Sharma et Singh., 1995). Pour les bassins de plus grande taille, ce type de modèle n'est plus utilisable car on est confronté plus significativement au problème du taux de restitution des sédiments qui est le rapport entre les flux exportés et l'érosion primaire des sols (Walling, 1983). C'est pourquoi à l'échelle des grands bassins fluviaux, les tentatives de modélisation sont essentiellement empiriques et cherchent à établir des bilans de masse annuels (Ludwig et Probst, 1996 et Maneux, 1998).

Beaucoup de modèles ont été développés pour estimer les transports de sédiments à l'échelle des grands bassins versants à savoir le modèle empirique : MUSCLE (William, 1995) et Ludwig and Probst empirical equation (Ludwig et Probst, 1998) ; le modèle conceptuel : LASCAM (Viney and Sivapalan, 1999); le modèle à base physique : CREAMS (Knisel, 1980), WEPP (Nearing et al., 1989), ANSWERS (Beasley et al., 1980), et SWAT (Arnold et al., 1998).

III. MATÉRIELS ET MÉTHODES

III.1 Site d'étude : bassin versant de la Garonne

III.1.1 Description générale

Le bassin de la Garonne est un bassin versant situé principalement en France avec une partie amont mineure en Espagne et en Andorre. La Garonne est le principal fleuve du Sud-ouest de la France. Elle prend sa source dans les Pyrénées espagnoles dans le Val d'Aran et se jette dans l'océan Atlantique après un parcours de 525 km à travers 4 départements français et 217 communes riveraines dont les agglomérations principales sont : Saint Gaudens, Toulouse, Tonneins, Marmande Agen, et Bordeaux. Elle occupe un bassin d'une surface totale de 55 000 km² comprenant le bassin du Lot (11 500 km²) et du Tarn (15 700 km²) qui sont les principaux affluents de la Garonne.

La Garonne quitte les montagnes des Pyrénées en aval de Saint Gaudens et reçoit l'Ariège sur la rive droite. Elle se dirige ensuite vers le nord-ouest en recevant les eaux du Tarn et du Lot qui sont les principaux affluents issus du Massif Central (cf. Figure 1). Les Pyrénées occupent l'ensemble du bassin en amont et le point culminant est de l'ordre 3 000 m, ceci implique des précipitations très abondantes.

En résumé, la Garonne est alimentée par deux châteaux d'eau, les Pyrénées et le Massif Central qui impliquent une forte variation de débit (crues comme étiage), décalés selon la saison.

Aujourd'hui, il y a à peu près 210 barrages présents au sein du bassin de la Garonne et la plupart des barrages sont des barrages hydroélectriques. Parmi ces barrages, 40% se trouvent en amont de la Garonne et 12 barrages ont été construits sur le cours d'eau principal (la Garonne) (Tisseuil et al., 2008). Ces barrages sont importants en termes de régulation de la fluctuation des débits journaliers dans le cours d'eau, (Sauvage et al., 2003). L'ensemble des ouvrages hydrauliques représente une capacité totale de retenue de plus de 3,2 milliards de m³ (Agence de l'eau Adour-Garonne). Plus de 1 milliard de m³ d'eau de surface sont prélevés à l'usage de la société (industries, centrales thermiques, irrigation, eau potable).

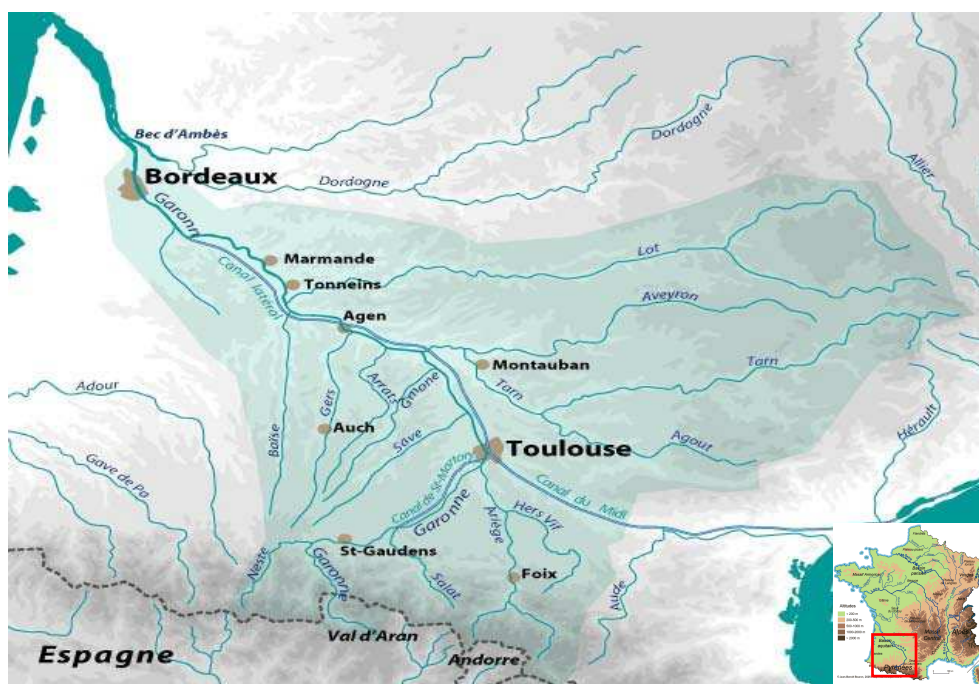


Figure 1 : Le bassin de la Garonne

Tenant compte de l'effet de la marée de l'estuaire de la Gironde dans la partie aval du bassin de la Garonne et pour éviter la complexité dans la modélisation, le bassin auquel nous avons limité pour notre étude est le bassin de la Garonne à Tonneins (l'exutoire où n'existe plus l'effet de la marée), qui draine la surface environ 50 000 km², à peu près 91 % de la surface totale du bassin.

III.1.2 Climatologie et hydrologie

Le bassin de la Garonne est soumis principalement à deux influences climatiques. D'une part l'influence de l'Atlantique et d'autre part l'influence de la Méditerranée, qui engendre une régulation thermique et pluviométrique.

■ Pluviométrie

La précipitation annuelle moyenne du bassin de la Garonne est de l'ordre 900 mm par an (Figure 2).

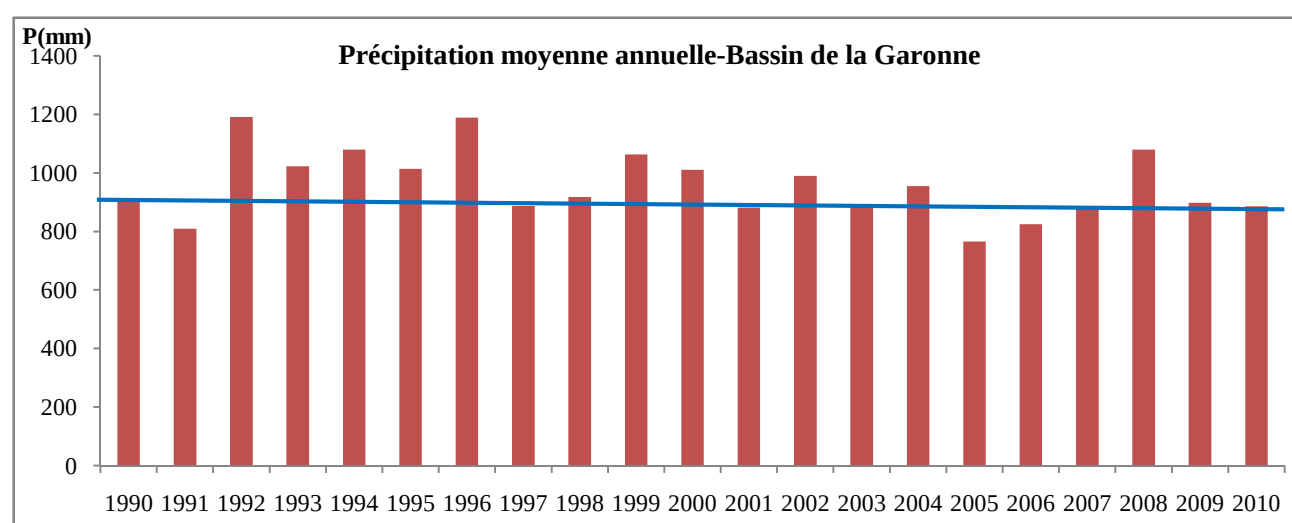


Figure 2: Précipitations moyennes annuelles du bassin de la Garonne des 20 dernières années sur les 39 stations pluviométriques choisies

▪ Hydrologie

Le contexte hydrologique du bassin de la Garonne subit l'influence des trois zones hydrologiques différentes qui caractérisent différents apports d'eau au cours de l'année. Les trois zones hydrologiques sont : A. la zone sous l'influence hydrologique Pyrénéenne, B. Zone sous l'influence hydrologique du Massif Central et C. Zone sous l'influence des plaines centrales, (cf. Figure 3). Le tableau 1 montre les modules hydrologiques de la Garonne au cours de 20 dernières années mesurées à station d'hydrométrie Garonne à Tonneins.

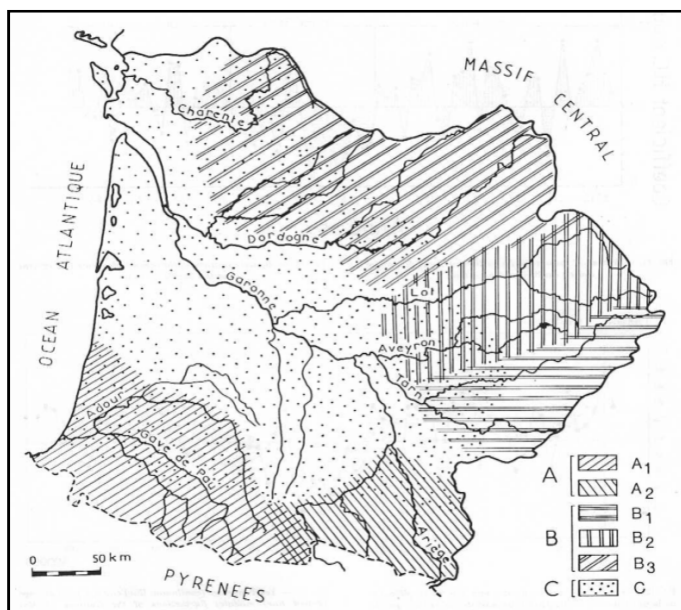


Tableau 1 : Caractéristiques hydrologiques de la Garonne au cours des 20 dernières années (Station de jaugeage - Garonne à Tonneins)

Débit moyen	537 m³/s
Débit instantané de crue	4 750 m ³ /s
Débit d'été	70 m ³ /s
Débit maximal journalier	1 990 m ³ /s
Débit spécifique	11 l/s/km ²

Figure 3: Carte des principales zones hydrologiques du bassin Adour-Garonne (Probst, 1983)

III.2 Source des données

Les données pour notre étude sont fournies par les organismes listés ci-dessous :

- METEO-FRANCE : Les données journalières de précipitations, températures maximales minimales, vitesses du vent, radiation solaire, humidité relative et évapotranspiration des 39 stations météorologiques réparties dans le bassin pour une période de 40 ans, à partir de 1970 jusqu'à 2010.
- L'Agence de l'Eau Adour-Garonne (AEAG) : Les données journalières de débits des 20 stations d'hydrométrie générale choisies au sein du bassin, ainsi que des données sur la qualité de l'eau (MES et NO₃).
- CORINE Land Cover (CLC) 2006 : Les données de l'occupation du sol du bassin de l'Adour-Garonne à l'échelle 1 : 1 000 000.
- FAO 85 et CAMP : Les données pédologiques du bassin de la Garonne et de la SAVE à l'échelle 1 : 1 000 000 et 1 : 250 000 pour la SAVE.
- NASA : Les données de topographie, MNT 90m x 90m du bassin de la Garonne.

III.3 Approche de modélisation

III.3.1 Modèle SWAT 2009

Le modèle SWAT, Soil and Water Assessment Tool (SWAT 2009), est un modèle agro-hydrologique à base physique et distribué qui calcule et simule les processus hydrologiques des bassins versants d'une façon continue au pas de temps élémentaire journalier (Neitsch et al., 2011).

Le modèle SWAT est développé par l'USDA pour prévoir les impacts des aménagements des terres sur la qualité de l'eau, les sédiments et les rendements chimiques agricoles (fertilisation chimique) pour les grands et complexes bassins versants avec des sols variables, des couvertures végétales variables et des conditions d'aménagement sur des longues périodes, (Neitsch et al., 2011).

Le modèle ARCSWAT est interfacé avec le système d'information géographique (SIG) d'ArcGis et un modèle Open-source qui peut être téléchargé sur le site (<http://www.brc.tamus.edu/swat/arcswat.html>). Il intègre les données spatiales : occupation du sol, types du sol et topographie avec les différentes conditions climatiques de la zone d'étude.

III.3.2 Discrétisation des processus dans le modèle SWAT

La modélisation hydrologique du modèle SWAT s'effectue à l'échelle des unités de réponses hydrologiques (Hydrological Response Unit, HRU) (cf. Figure 4), c'est à dire une unité homogène en termes de pente, de pédologie et d'occupation du sol. L'unité de discrétisation spatiale est le sous bassin, obtenu par le découpage du bassin à partir du MNT, de façon automatique par le positionnement d'exutoires. Les sous-bassins peuvent donc être définis assez librement, du moment qu'il y ait une cohérence topographique (les sous-bassins sont bien des bassins au sens hydrologique, et ont un seul exutoire). La HRU est représentée au sein du sous bassin par un pourcentage d'occupation de la surface. La partie hydrologique s'appuie en partie sur un arbre de drainage à l'échelle du bassin versant, issu d'un MNT. Celle-ci agrège les eaux issues des HRU par sous-bassins.

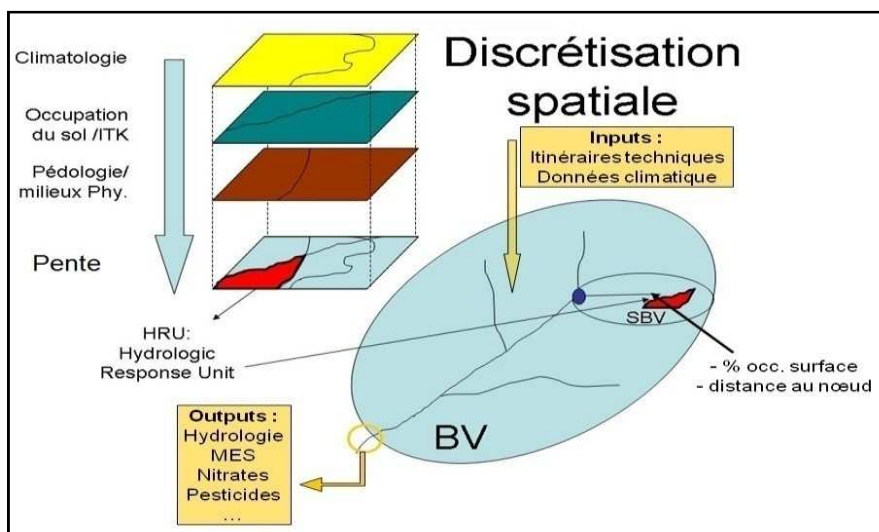


Figure 4: Représentation des sous-bassins et des Hydrological Response Units (HRUs) du modèle SWAT

III.4 Structure et fonctionnement du modèle SWAT

III.4.1 Module hydrologique de SWAT (Figure 5)

La réponse hydrologique simulée au cours de la modélisation est basée sur l'équation du bilan hydrique ci-dessous :

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{\text{jour}} - Q_{\text{surf}} - E_a - W_{\text{seep}} - Q_{\text{gw}})i$$

Tels que : SW_t est la teneur en eau finale du sol (mm d'eau), SW_0 est la teneur en eau initiale du sol (mm d'eau), R_{jour} est la hauteur de précipitation (mm d'eau), Q_{surf} est le ruissellement de surface (mm d'eau), E_a est l'évapotranspiration (mm d'eau), W_{seep} est la quantité d'eau entrant dans la zone de vadose (mm d'eau), Q_{gw} est le flux d'eau souterrain (groundwater flow) (mm d'eau), et t est le pas de temps (jours).

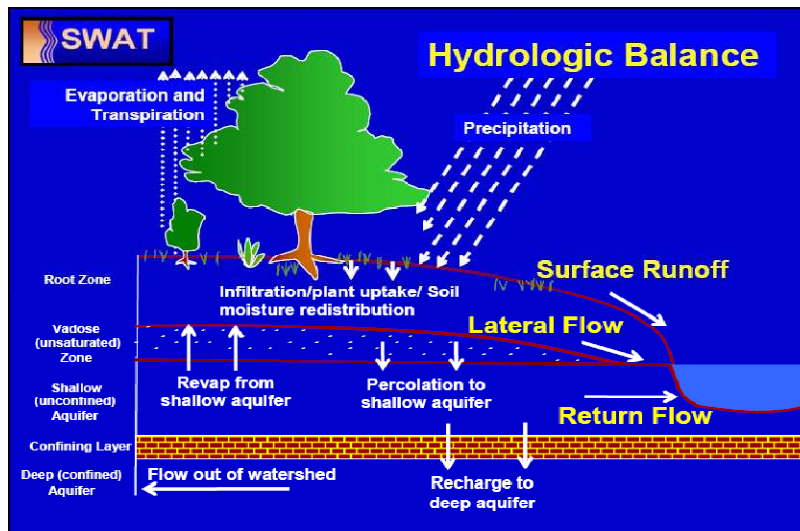


Figure 5: Cycle hydrologique considéré par le modèle SWAT

III.4.2 Module des sédiments de SWAT

L'érosion et les sédiments ont été calculés pour chaque HRU par la formule de MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation). La formule MUSLE est la version modifiée de l'équation Universal Soil Loss Equation (USLE) développée par Wischmeier and Smith (1978). USLE estime l'érosion moyenne en fonction de l'intensité de la précipitation. Par contre, dans MUSLE l'intensité de la précipitation a été remplacée par le facteur de ruissellement. Ce dernier améliore la prédiction des sédiments en éliminant le facteur de l'indice de distribution des sédiments et permet à l'équation du modèle d'estimer l'érosion correctement pour chaque événement pluvieux.

L'indice de distribution des sédiments (sediment delivery ratio-SDR) est défini comme l'indice de sédiment distribué à un endroit dans le système de cours d'eau, c'est la fraction de la quantité totale des sédiments nets (sediment yield) de la surface du bassin. Cet indice varie selon la taille de la surface, la topographie, la densité de drainage et les autres facteurs.

L'estimation de l'érosion a été améliorée car le ruissellement est calculé en fonction de la condition de l'humidité antécédente et l'intensité de précipitation. Dans l'équation de MUSLE, l'indice de distribution des sédiments a été enlevé car le facteur de ruissellement représente l'énergie de détachement et de transport des sédiments.

Le Modified Universal Soil Loss Equation (Neitsch et al., 2011) est donné comme suit :

$$sed = 11,8 \cdot (Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot area_{hru})^{0,56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG$$

Tels que sed est la quantité totale de sédiments (tonnes/jour), Q_{surf} est le ruissellement de surface (mm/ha), q_{peak} est le taux du pic de ruissellement (m^3/s), $area_{hru}$ est la surface de HRU (ha), K_{USLE} est le facteur d'érodibilité du sol ($0,013 \text{ tonnes } m^2 \text{ hr}/m^3 \text{ tonnes cm}$), C_{USLE} est le facteur d'aménagement des terres, P_{USLE} est le facteur de pratique agricole, LS_{USLE} est le facteur topographique et $CFGR$ est le facteur de fraction rocheuse.

Universal Soil Loss Equation (USLE, William 1995), (Neitsch et al., 2011):

$$Sed = 1,292 \cdot EI_{USLE} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG$$

Tel que $EI_{USLE} = E_{storm} \times I_{30}$, indice d'érosion de la précipitation ($0,017 \text{ m tonnes cm}/m^2 \text{ h}$), E_{storm} est l'énergie totale de la précipitation ($0,0017 \text{ m tonnes}/m^2$) et I_{30} est l'intensité maximale de précipitation (mm/h).

III.5 Données d'entrée (Input Data) de SWAT

Les données d'entrée nécessaires pour le modèle sont : les données topographiques (MNT), pédologiques, l'occupation du sol et les données météorologiques.

- **Modèle Numérique de Terrain (MNT) :** Résolution 90 m x 90 m, coordonnées Lambert II étendu, fournie par NASA, le modèle SWAT délimite le bassin versant en donnant la direction de l'écoulement des réseaux hydrographiques du bassin et des sous-bassins (Figure6).

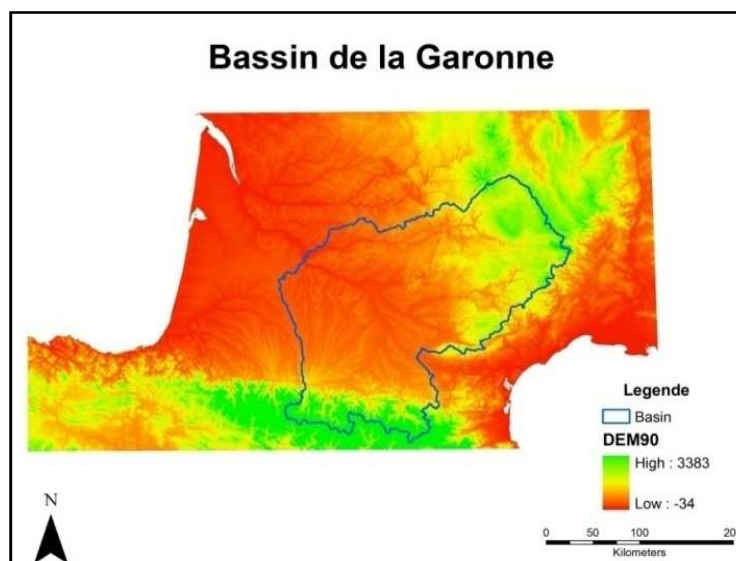


Figure 6: Bassin versant de la Garonne délimité par le modèle SWAT à Tonneins

- **Occupation du sol :** les données ont été récupérées en ligne à partir site de CORINE Land Cover (CLC) 2006 à l'échelle 1 : 1 000 000 en coordonnées Lambert II étendu. L'occupation du sol est un des facteurs les plus importants qui influence le taux de ruissellement, l'évapotranspiration et l'érosion de surface du bassin versant.
- Le bassin de la Garonne est essentiellement un bassin agricole, près de 60% du bassin est occupé par les terres agricoles. Et, 50% de ces terres est destiné à la production des céréales : 60% de maïs, 30% de blé et 10% des produits d'huiles (tournesols, colza et soja). Le reste des terres agricoles est utilisé pour la culture des vignes et des fruitiers (Tisseuil et al., 2008). L'agriculture est dominante sur la partie centrale et aval du bassin qui se trouvent sur les plaines alluviales favorable à la culture des plantes. Par contre, la partie amont du bassin est couverte par les forêts et les pâturages.

Dans notre bassin, nous avons retenu 16 classes de l'occupation du sol. 45% de terres est occupé par l'agriculture se trouvant dans la plaine alluviale, 18 % de terres est recouvert par les pâturages qui se trouvent en amont du bassin et dans le massif central, et 32% par les forêts (amont du bassin). Et, le reste correspond à la zone urbaine (Figures 7 et 8).

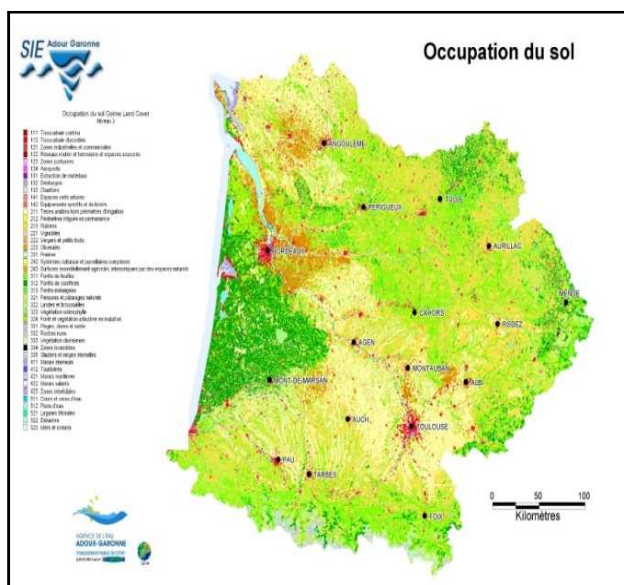


Figure 8: Occupation du sol du bassin Adour-Garonne fournie par CORINE Land Cover 2006

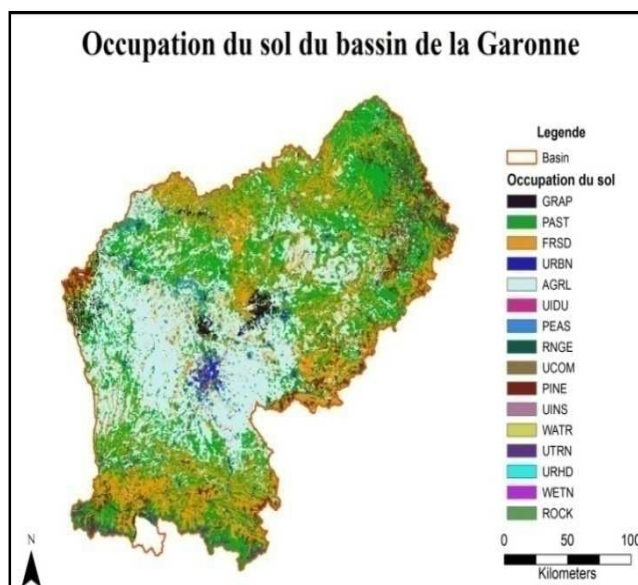


Figure 7: Occupation du sol du bassin de la Garonne

- **Données pédologiques :** Les données de FAO 85 à l'échelle 1 : 1 000 000 en coordonnées Lambert II étendue, ont été récupérées en ligne à partir du site de SGDBE (European Soil Portal-Soil Data and Information Systems) et PTRDB (Pedo Transfer Rules Data Base) en format Raster Grid.

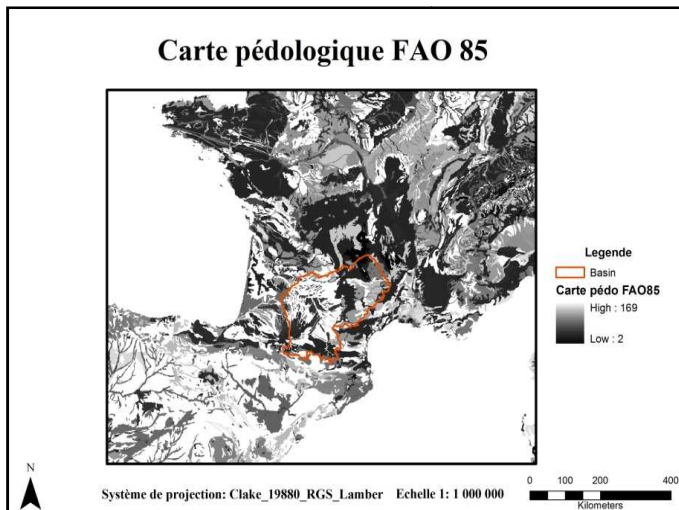


Figure 10: Carte pédologique fournie par SGDBE FAO 85 (Portail de l'Europe)

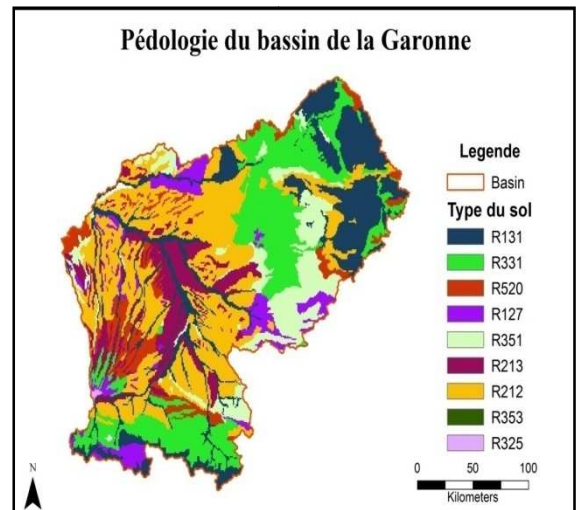


Figure 9: Carte pédologique du bassin de la Garonne

D'après la carte pédologique du FAO 85, le bassin de la Garonne présente 27 types de sol (Figure 10). Les données fournies par FAO 85 sont les textures des sols de notre bassin. Le modèle SWAT a besoin des caractéristiques du sol à travers des horizons du sol à savoir : la conductivité hydraulique, les paramètres physico-chimiques des sols, les matières organiques, etc. Afin de pouvoir créer les HRUs et simuler la réponse hydrologique du bassin.

Les caractéristiques du sol posent un grand problème dans notre étude et ralentisse quand même le travail. Pour réaliser cette étude, nous avons simplifié les types du sol de notre bassin en utilisant les caractéristiques des sols dominant dans le bassin versant de la SAVE (travaux de thèse réalisée par Oeurng (2010) et Boithias (2012), et en créant nous-mêmes les caractéristiques des sols qui n'existent pas dans le bassin de la SAVE basés sur la compréhension du bassin. Finalement, nous avons pris 9 types de sol (Figure 9) qui sont dominants dans notre bassin (cf. Annexe: Légende de la carte pédologique).

- **Données météorologiques :** Pour notre étude, les données nous ont été fournies par METEO-France. Il s'agit de données journalières depuis Janvier 1970 jusqu'à Décembre 2010. Le modèle retenu précise un certain nombre de données avec un pas de temps journalier, données qui proviennent de 39 stations météorologiques situées dans le bassin (cf. Figure11).



Figure 11: Répartition des stations pluviométriques au sein du bassin versant étudié (Météo-France)

▪ **Découpage du bassin versant en sous-bassins versants :**

La division du bassin versant en sous-bassins versants est un processus élémentaire du modèle SWAT. La surface et le nombre des sous-bassins versants peuvent influencer le processus hydrologique du bassin versant et successivement le résultat de la modélisation, (Jha et al., 2004). L'impact de la surface et le nombre des sous-bassins sont liés fortement à l'hétérogénéité du bassin (Arnold et al., 1998) qui compte le système des cours d'eau, la topographie des sous-bassins, les sols, l'occupation du sol et la climatologie des sous-bassins. Ces derniers donnent un impact sur la condition homogène de chaque sous bassin, plus la taille du sous bassin est grande plus sa condition est très variée.

Le découpage se fait en 3 étapes pour voir la variation des apports d'eau et de MES et pour déterminer le nombre des sous-bassins convenables à notre étude. Au premier temps, le découpage se fait automatiquement à l'aide du modèle. Ensuite, nous limitons la surface minimale des sous-bassins en mettant sa valeur 20 000 ha et enfin 10 000 ha pour voir l'influence des nombres de sous-bassins sur les flux de l'eau et de MES. Nous obtenons les nombres des sous-bassins 30, 130 et 262 respectivement l'étape 1, 2 et 3.

- **Stations de jaugeage :** Afin de réaliser la calibration des débits, nous avons choisis 20 stations de jaugeage des débits réparties dans le bassin, surtout sur les principaux affluents de la Garonne de l'amont vers l'aval.

III.6 Critère d'évaluation du modèle

L'évaluation de la performance du modèle dans la simulation des débits et des sédiments se fait en utilisant le critère de Nash et Sutcliffe (1970) (E_{NS}) et le coefficient de détermination de Pearson (R^2) :

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2}}$$

Tels que : S_i et O_i sont des valeurs simulées et observées ; $\bar{O}$ est la moyenne des valeurs observées ; $\bar{S}$ est la moyenne des valeurs simulées et N est le nombre total des valeurs calculées. Le niveau de performance est classifié selon Parajuli et al. (2009) dans le Tableau 2.

Tableau 2: Classification des valeurs de R^2 et E_{NS} (Parajuli et al., 2009)

Classification	R^2, E_{NS}
Excellente	>0,90
Très bonne	0,75-0,89
Bonne	0,50-0,74
Correcte	0,25-0,49
Mauvaise	0,00-0,24
Non satisfaisant	<0,00

III.7 Calibration et validation

Dans la plupart de travaux, la période d'enregistrement utilisée pour la calibration et la validation est de 2 à 10 ans, cette période est limitée par la disponibilité des données observées. Généralement, les résultats de modélisation pour les premières années ne sont pas prises en compte car ces premières années correspondent à la période d'initialisation du modèle SWAT. La calibration se fait d'une manière successive. Tout d'abord, c'est la calibration du module hydrologique, ensuite c'est la calibration des sédiments, après c'est la calibration des nutriments (NO_3^- , P) et enfin c'est la calibration des pesticides.

Dans le cas de notre étude, la période 1987-1990 sert de période d'initialisation du modèle (Période d'initialisation proposée par le modèle est de 2 à 5 ans), et nous prenons la période 1991-2000, 10 ans, comme la période de calibration et celle de 2001-2010 comme la période de validation du modèle (10 ans).

III.7.1 Calibration du module hydrologique

La capacité du modèle hydrologique à simuler les processus hydrologiques et de sédimentation dépend essentiellement de la calibration des paramètres du modèle (Xu et al., 2009). Les paramètres des modèles peuvent être estimés ou calés manuellement ou automatiquement à l'aide du logiciel d'optimisation des paramètres.

La calibration des débits se fait automatiquement à l'aide du programme d'optimisation des paramètres du modèle (SWAT-CUP4 et Base Flow Filter) en comparaison avec les débits observés mesurés au cours de 10 ans des 20 stations de jaugeage réparties dans le bassin. Et aussi, la calibration se fait en se basant sur la compréhension du comportement du bassin, les techniques de calibration dans le manuel du modèle et les études bibliographiques ; particulièrement les études récentes sur le bassin de la SAVE (Boithias, 2012 et Oeurng, 2010).

III.7.2 Calibration des sédiments

La calibration des sédiments se fait à l'aide du programme SWAT-CUP4. En effectuant l'optimisation des paramètres, nous voyons que les paramètres qui sont sensibles avec l'estimation des sédiments sont :

- les paramètres linéaires au cours du calcul de la quantité totale des sédiments (Channel sediment routing) avec SPCON
- les paramètres exponentiels au cours du calcul de la quantité totale des sédiments (Channel sediment routing) avec SPEXP.
- le facteur d'ajustement du pic de ruissellement PRF qui contrôle notamment le pic des sédiments.

IV. RÉSULTATS ET DISCUSSION

IV.1 Impact des nombres des sous-bassins sur la réponse hydrologique

Pour étudier l'impact de la taille et des nombres de sous-bassins au cours de la délimitation de notre bassin versant (La Garonne), nous avons testé trois cas différents avec des nombres de sous-bassins différents pour voir la variation des flux d'eau (Tableau 3) :

Tableau 3: Classification du découpage des sous-bassins versants étudiés

Surface seuil de drainage (ha)	Nombre des sous-bassins	Nombre des HRUs	Surface moyenne des SBVs(ha)	Surface moyenne des HRUs(ha)
110 677	30	574	166 100(Min 1 000, max 528 200)	8 682
20 000	130	1952	38 300 (min300, max 146 200)	2 552
10 000	262	3450	19000(min 50, max 102 500)	1445

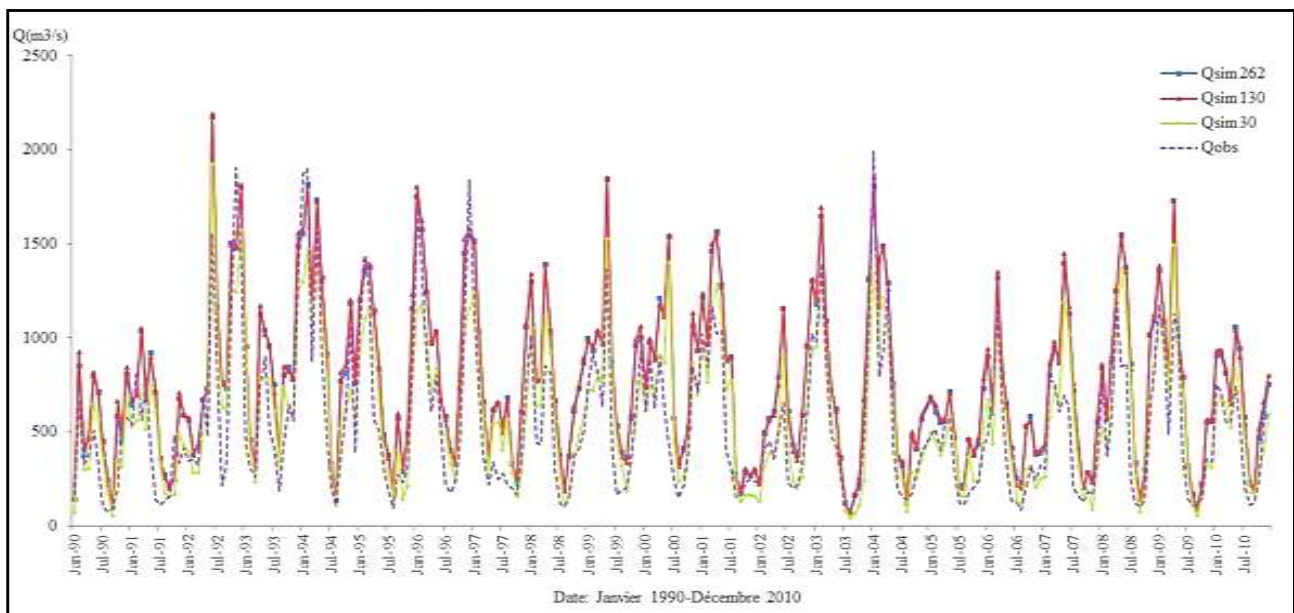


Figure 12: Graphique de la comparaison des débits mensuels simulés avec les débits observés pour les trois types de découpage en sous-bassins versants (30, 130 et 262 sous-bassins)

La figure 12 montre la simulation des débits mensuels au cours de 20 dernières années à l'exutoire du bassin versant. La courbe de débit du cas 1 (Cas 30 SBVs) est au-dessous des courbes de débit des cas 2 et 3, respectivement 130 et 262 SBVs. D'ailleurs, les courbes de débit des cas 2 et 3, elles sont presque confondues. Nous observons qu'à partir d'un découpage en 130 SBVs, il n'y a plus de variation importante des débits sur la simulation. L'étude de l'impact du nombre des sous-bassins peut nous aider à prendre la décision des nombres de sous-bassins corrects et représentatifs au cours de la délimitation du bassin versant qui peut nous aider à gagner du temps pour la simulation et préparation des données d'entrée du modèle.

Finalement, nous avons décidé de prendre le cas 2 (130 sous-bassins) pour notre projet de modélisation (Figure 13).

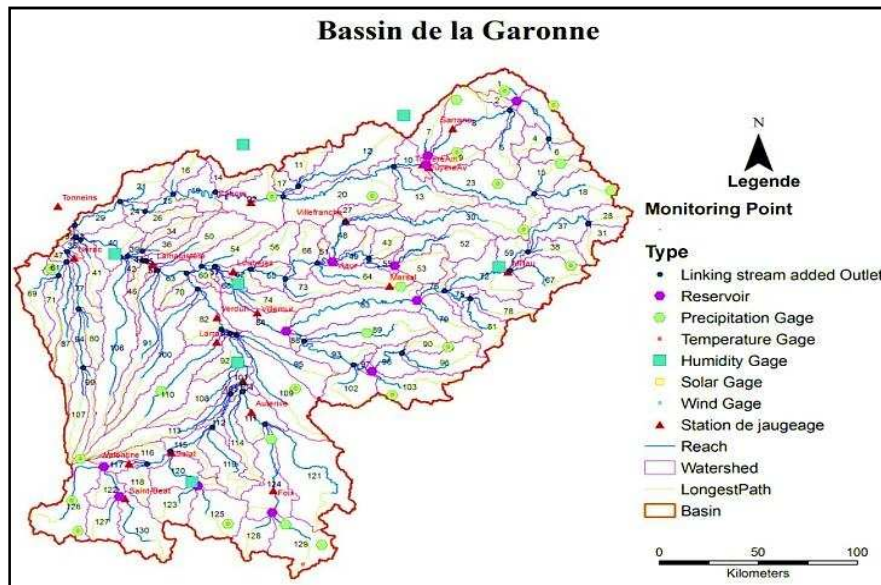


Figure 13: Bassin de la Garonne délimité par SWAT, les 20 stations de jaugeage de débit (DREAL), les 39 stations météorologiques (Météo-France)

IV.2 Résultats de la simulation du module hydrologique

IV.2.1 Simulation des débits journaliers

Nous avons identifié les paramètres qui sont sensibles en faisant plusieurs fois les simulations avec les différentes valeurs des paramètres du modèle générés par le programme d'optimisation (Tableau 4 et 5):

Tableau 4 : Paramètres utilisés pour la calibration des débits à la station de jaugeage de la Garonne à Tonneins.

File	Parameters	Definition	Min. value	Max. value	Calibrated value
basins.bsn	ESCO	Soil evaporation compensation factor	0	1	0.5
	EPCO	Plant water uptake compensation factor	0	1	1
	SURLAG	surface runoff lag time	0	10	0.9
*.GW	GW_DELAY	Ground water delay	0	500	28
	GW_REVAP	Ground water revap	0.02	0.2	0.05
	RCHRG_DP	Deep aquifer percolation factor	0	1	0.15
	ALPHA_BF	Base flow alpha factor	0	1	0.08
*.mgt	CN2	SCS curve number	35	98	AGRL 80 FRST 70 URBN 65

Tableau 5: Paramètres utilisés pour la calibration des sédiments

File	Parameters	Definition	Min. value	Max. value	Calibrated value
*.bsn	PRF	Peak rate adjustment factor for sediment routing	0	2	0.58
	SPCON	Linear parameters for calculating the channel sediment routing	0.0001	0.01	0.01
	SPEXP	Exponent parameter for calculating the channel sediment routing	1	1.5	1.5

La simulation est faite sur une période de 23 ans au pas de temps mensuel et journalier à partir 1987 au 2010 en prenant la période entre 1987-1990 comme la période d'initialisation du modèle. La calibration se fait entre 1991-2000 et la période 2001-2010 est prise comme la validation des résultats du modèle. Le calage se fait suivant les débits observés journaliers disponibles à la station de jaugeage de la Garonne à Tonneins.

Nous voyons que la précipitation moyenne des 39 stations au cours des 23 années de simulation est de l'ordre 950 mm et l'évapotranspiration est 495 à peu près 52% de la précipitation, dans ce cas l'évapotranspiration est un peu faible comparée à celle du bassin de la SAVE qui vaut 70% de sa précipitation (bassin avec l'agriculture intensive). Après 48% de précipitation qui contribue à l'écoulement dans les cours d'eau, parmi lesquelles 21% de précipitation fait partie du ruissellement de surface.

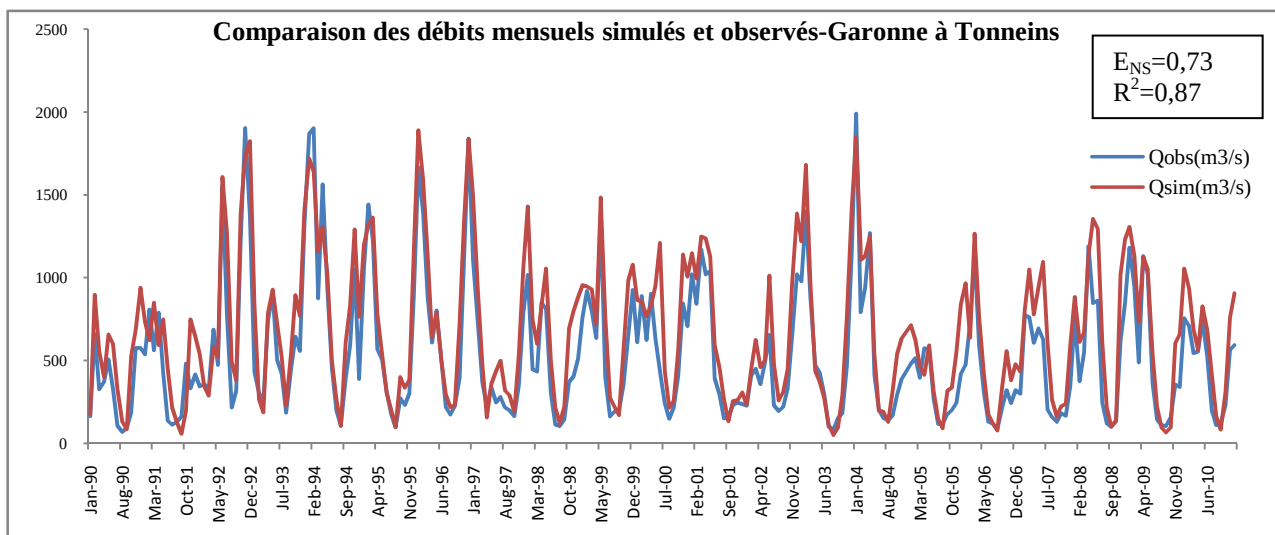


Figure 14: Comparaison des débits mensuels observés et simulés au cours de 20 ans (1990-2010) à la station de Tonneins.

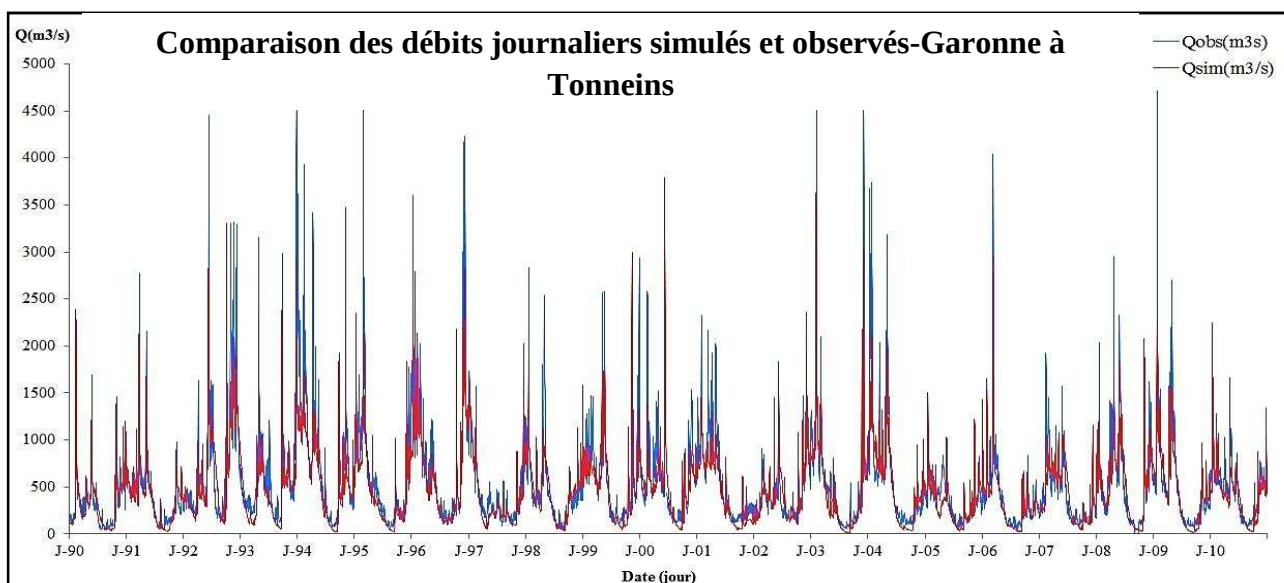


Figure 15: Comparaison des débits journaliers simulés et observés au cours de 20 ans (1990-2010)

Dans la figure 15 nous observons que les débits simulés sont correctement reproduits dans les tendances et sont sous-estimés, pendant les événements extrêmes (crues comme étiages). Les débits observés montent plus haut que des débits simulés au cours de la période de crues, tandis que pendant la période d'étiage les débits simulés descendent plus bas que les débits observés. Nous voyons aussi que les débits journaliers simulés sont surestimés par rapports aux débits observés pour quelques périodes par exemple au cours de l'année 2009 et 2010.

Très similaire dans le cas du bassin versant de la Save (1150 km²), nous observons que les résultats des débits journaliers simulés sont quand même sous-estimés, surtout pour les pics. Le modèle n'arrive pas à bien simuler au cours des événements extrêmes (crues/étiages) quand l'écoulement est plein bords ou l'écoulement est faible.

En tout cas, le modèle a restitué la réponse hydrologique du bassin versant dans les tendances. En 2003, nous savons qu'il y a eu une sécheresse dans le bassin au cours de l'année, les produits de débits journaliers simulés sont faibles et descendent suivant les débits observés. Ce qui est très intéressant, nous notons que le modèle a bien représenté le pic de l'année 2000 qui était l'année exceptionnelle avec les fortes précipitations. Sachant qu'il pleuvait beaucoup au mois de juin en 2000, celle-ci provoquait une fluctuation de débit très fort et la station de jaugeage de débit à Tonneins n'arrivait pas à quantifier et enregistrer le débit au cours de cette période car l'écoulement s'est fait à plein bord. Nous obtenons un débit de pics journalier simulé de l'ordre 4000 m³/s en comparaison avec le débit observé instantané à la station de jaugeage à Lamagistère sur la Garonne qui est de l'ordre 4500 m³/s au cours de cette période, le résultat est très satisfaisant. La statistique de performance du modèle est satisfaisante, nous obtenons la valeur de Nash E_{NS} égale à 0,63 et le coefficient de R^2 égal à 0,62.

Il faut noter que la calibration du régime hydrologique de la Garonne est très difficile car la Garonne est un grand bassin versant avec une forte variation spatio-temporelle en termes de fluctuation des débits et des influences de ces affluents principaux tels que le Lot, le Tarn, l'Ariège, l'Aveyron qui contribuent énormément au débit de la Garonne. La calibration doit se faire à l'échelle de sous bassin de l'amont vers l'aval de la Garonne. Mais, dans notre étude, en première approche nous avons effectué une calibration à l'échelle globale c'est-à-dire à l'exutoire (Garonne à Tonneins) du bassin versant.

En plus, les impacts des activités humaines tels que les barrages hydroélectriques surtout sur l'affluent du Lot, la Garonne en tête de bassin et l'Ariège qui sont connus car une forte exploitation de l'énergie hydroélectrique, la prise d'eau pour l'irrigation (forcément au cours de l'été), les réservoirs naturels à savoir les lagunes, les lacs, les étangs qui ne sont pas pris en compte au cours de la calibration. Ces derniers possèdent une forte influence sur nos résultats en provoquant des

incertitudes en termes de simulation des flux d'eau (ruissellement de surface et les écoulements souterrains) et de sédiments.

Après avoir effectué la calibration, nous avons abordé la nouvelle simulation pour une période de 2001-2010 afin de valider le modèle. La statistique de performance de la validation du modèle est aussi satisfaisante, nous obtenons la valeur de Nash égale à 0,56 et le coefficient de R^2 égal à 0,59.

En résumé, nous pouvons conclure que les résultats de débits simulés par le modèle SWAT au cours des 20 dernières années sont corrects et acceptables.

IV.2.2 Evolution des valeurs de E_{NS} et de R^2 des 20 stations de jaugeage

Tableau 6: Variation des valeurs de coefficient de Nash E_{NS} et de R^2 des 20 stations de jaugeage

Evolution des coefficients Nash Q et R2			
No	Station	Nash Q	R2
1	Garonne à Tonneins	0.73	0.86
2	Garonne à Lamagistère	0.74	0.87
3	Garonne à Verdun	0.78	0.8
4	Garonne à Portet	0.72	0.73
5	Ariège à Auterive	0.63	0.68
6	Ariège à Foix	0.38	0.54
7	Garonne à Valentine	0.40	0.43
8	Garonne à Saint-Béat	0.14	0.18
9	Viaur à Laguëpie	0.57	0.67
10	Tarn à Loubéjac	0.15	0.72
11	Tarn à Villemur	0.73	0.88
12	Lot à Truyère (Amont)	0.09	0.71
13	Lot à Truyère (Aval)	0.52	0.74
14	Baise à Nérac	0.21	0.82
15	Tarn à Millau	0.62	0.81
16	Salat à Roquefort	0.73	0.74
17	Save à Larra	0.56	0.61
18	Alzou à Villefranche	0.67	0.7
19	Truyère à Sarrans	-0.36	0.84
20	Lot à Cahors	0.62	0.83

Le tableau 6 illustre la variation des valeurs de coefficients E_{NS} et de R^2 des 20 stations de jaugeage situées aux exutoires des sous-bassins versants drainant les principaux affluents de la Garonne de l'amont vers l'aval. Les valeurs de E_{NS} se varient entre -0,36 (Truyère à Sarrans) à 0,78 (Garonne à Verdun) avec la valeur moyenne des Nash de $E_{NS} = 0,5$, tandis que celles de coefficients R^2 varient entre 0,18 (Garonne à Saint-Béas) et 0,87 (Garonne à Lamagistère).

La variation de précipitation de ces zones est très forte et les stations pluviométriques choisies n'arrivent pas à bien représenter la hauteur de précipitation au cours des événements pluvieux. Malgré tout nous avons choisi de nombreuses stations pluviométriques en amont de la Garonne et sur la partie du Massif central. En faisant la comparaison entre la valeur de Nash ($E_{NS}=0,56$) et R^2 ($R^2=0,61$) du bassin de la SAVE avec les valeurs étudiées par Oeurng (2010) ($E_{NS} = 0,53$ et $R^2 = 0,56$), nous avons obtenu les valeurs presque identiques de performance.

IV.2.3 Typologie des sous-bassins versants de la Garonne

Tableau 7: Variation des transports spécifiques des débits des 20 stations de jaugeage

No	Station libellée	Surface (km2)	Occupation du sol	Pédologie	Qs,moy (l/s/km2)	Qs,min (l/s/km2)	Qs,max (l/s/km2)
1	Tonneins	49834	GRAP,PAST,FRSD,URB D,AGRL,PINEUIDU,PEAS,UCOM,RNGE	R131,R331,R212,R213,R351,R520,R127,R353,R325	13.52	1.03	37.93
2	Garonne à Lamagistère	33240	PAST,FRSD,AGRL,BERM	R131,R331,R212,R213,R351,R520,R127	12.01	1.01	36.28
3	Garonne à Verdun	12079	PAST,FRSD,AGRL,BERM	R131,R331,R212,R213,R351,R520	14.80	1.91	45.01
4	Garonne à Portet	9976	PAST,FRSD,AGRL	R131,R331,R212,R213,R351,R520	16.00	1.99	45.35
5	Garonne à Valentine	2814	PAST,FRSD	R131,R331,R212	17.78	3.32	51.67
6	Garonne à Saint-Béat	674	PAST, FRST	R131,R331,R127	30.27	6.88	74.26
7	Ariège à Auterive	4153	PAST,FRSD,AGRL	R131,R331,R212,R213,R351,R520	12.14	0.53	46.28
8	Ariège à Foix	1821	PAST,FRSD	R131,R331,R212	20.13	0.89	67.82
9	Salat à Roquefort	1583	PAST, FRST	R131,R212,R331	22.05	1.50	59.99
10	Save à Larra	1158	PAST,AGRL	R213,R331,R520,R212	4.50	0.16	25.01
11	Tarn à Millau	2135	PAST,AGRL,FRSD,PINE	R131,R331,R351,R212	22.30	0.57	115.74
12	Tarn à Villemur	9823	PAST,AGRL,FRSD	R131,R331,R212,R213,R351,R127	14.27	0.57	42.73
13	Aveyron à Loubéjac	5270	PAST,AGRL,FRSD	R212,R131,R331,R351,R213	11.78	0.38	34.21
14	Lot à Truyère (Amont)	2552	PAST,FRSD,PINE	R131,R331,R212	17.55	0.88	59.09
15	Lot à Truyère (Aval)	5853	PAST,FRSD,PINE	R131,R331,R212	23.06	0.99	69.33
16	Truyère à Sarrans	3301	PAST,FRSD	R131,R331	19.22	0.82	64.37
17	Lot à Cahors	9590	PAST,FRSD,AGRL,PINE	R131,R331,R212,R520	19.28	0.85	50.20
18	Viaur à Laguëpie	1554	PAST,AGRL,FRSD	R331,R351	9.12	0.25	31.57
19	Baise à Nérac	1340	PAST,AGRL	R212,R213	11.80	0.55	40.67
20	Alzou à Villefranche	1577	PAST,AGRL,FRSD	R212,R131,R331,R351	1.62	0.04	4.92

Le tableau 7 nous montre la typologie des sous-bassins qui ont des exutoires proches de nos stations de jaugeages. A partir des débits spécifiques en gras, nous pouvons comprendre les parties, ainsi que les sous-bassins qui contribuent énormément aux eaux de la Garonne, surtout en crues. Nous observons que, les sous-bassins en amont dans la partie des Pyrénées (Saint-Béat, Foix, Salat à Roquefort) et du Massif Central (Truyère, Millau, Lot à Cahors) sont les plus importants contributeurs des débits de l'eau car ces sous-bassins sont des bassins d'altitude avec les fortes pentes et des précipitations très abondantes (cf. Figure 16).

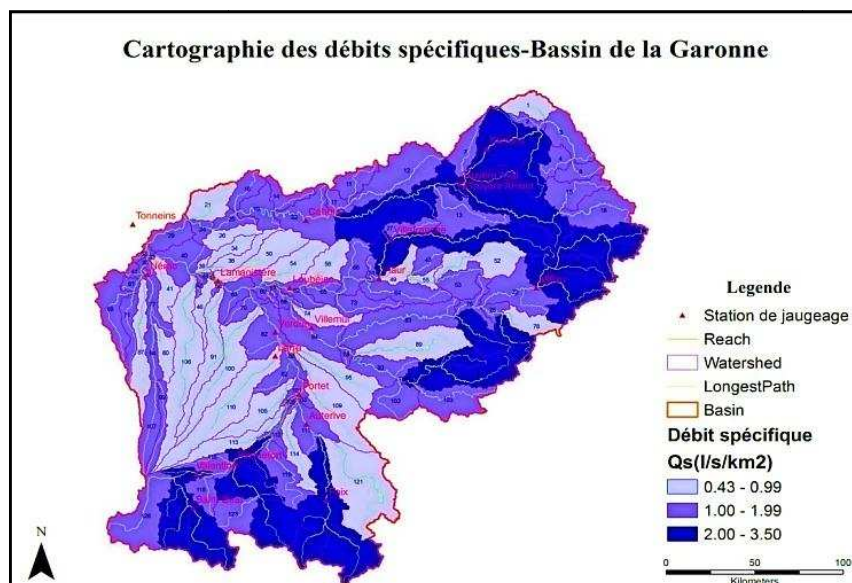


Figure 16: Cartographie des transferts spécifiques des débits dans le bassin de la Garonne

IV.3 Résultat de la simulation de MES et de sédiments

IV.3.1 Simulation de MES

La calibration des concentrations en MES et des sédiments se fait après la calibration et la validation des débits journaliers à l'exutoire du bassin (Garonne à Tonneins), nous obtenons les résultats comme montré dans la Figure 17. Les données de MES ont été prises à la station de contrôle de qualité de l'eau à Verdun-sur-Garonne et celle à Agen car les données de MES ne sont pas disponibles pour la station de contrôle de la Garonne à Tonneins.

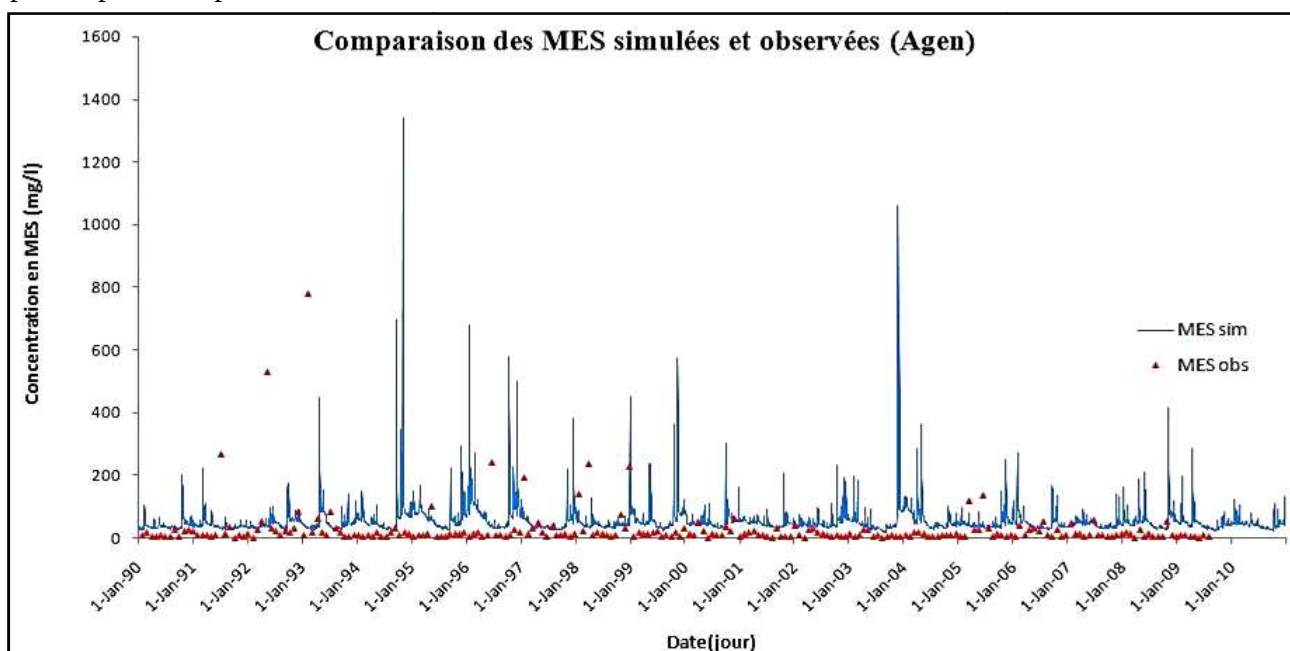


Figure 17: Concentrations en MES simulées de janvier 1990 à décembre 2010 et observées mesurées à Agen

Les données de MES disponibles à Verdun et à Agen ont été mesurées par l'AEAG avec les prélèvements d'environ 300 d'échantillons au cours des 20 dernières années.

Les MES simulées sont surestimées par rapport aux MES observées. La concentration maximale au cours de la période des crues dépasse les 1340 mg/l et au cours de la période d'étiage, la concentration est de l'ordre 20 mg/l, tandis que la concentration moyenne est 55 mg/l. La concentration en MES observée à Agen varie entre 1 mg/l et 778 mg/l, la concentration moyenne est de 27 mg/l, et celle à Verdun varie entre 1 mg/l et 475 mg/l avec 25 mg/l pour la valeur de la concentration moyenne. Au cours de périodes de crue, les MES simulées sont deux fois plus grandes que les MES observées, même résultat pour les valeurs de MES moyennes. L'écart n'est pas très significatif. Par contre, au cours des périodes de décrues, l'écart est important, c'est-à-dire le modèle simule plus de MES. Quand même, nous voyons qu'il y a trop des pics de MES.

D'après le travail de Eric Maneux (1998), la concentration maximale et minimale de MES de la Garonne mesurée à Toulouse est respectivement 1 mg/l et 682 mg/l et la concentration moyenne est de 33 mg/l. Dans la partie amont de la Garonne, Garonne à Auterive, la concentration de MES varie entre 2 mg/l et 550 mg/l, tandis que la partie aval de la Garonne, Garonne à Saint Girons, varie entre 2 mg/l et 1100 mg/l.

En fait, nous n'arrivons pas à bien caler les concentrations en MES et les sédiments. Les MES simulées sont excédantes en comparaison avec les MES observées. Le mauvais calage due aux quelques facteurs ci-dessous :

- Afin de pouvoir modéliser les MES et les sédiments il faut beaucoup de données d'entrée pour le modèle SWAT et il faut vérifier que les données sont bonnes. Dans le cas de notre étude, nous n'avons pas les données assez précises pour l'occupation du sol et la pédologie du bassin. Les données pédologiques et de l'occupation du sol ont été simplifiées car nous n'avons pas les caractéristiques détaillées. Les données pédologiques sont très importantes dans le module de sédiment de SWAT. En plus, comme le bassin est grand, les données sur l'occupation du sol et types du sol sont très variées et difficiles à fournir, surtout sur les pratiques agricoles ce qui demande de données.
- La calibration des débit de l'eau et des sédiments du grand bassin versant tel que la Garonne doit se faire à l'échelle de chaque sous-bassin de l'amont vers l'aval au pas de temps journalier. La période de stage est 6 mois et n'est pas suffisant pour effectuer la calibration en profondeur.
- D'ailleurs, la concentration en MES est difficile à échantillonner surtout au cours des événements de crues. Il faut des prélèvements journaliers des MES afin de pouvoir bien caler les paramètres de sédiment du modèle.

Donc, nous avons considéré que la simulation de MES est proche de la réalité et est dans l'ordre de grandeur correcte, malgré les hétérogénéités entre des sous-bassins et les informations concernant les barrages hydroélectriques et les réservoirs naturels qui n'étaient pas prises en compte dans le projet.

IV.3.2 Variation de la charge en suspension en fonction des débits

L'importance de l'accélération des débits journaliers sur les flux de MES est significative car nous voyons que les flux de MES montent et descendent suivant les courbes de débit. Quand même les pics de sédiments sont en fonction des pics de débits (les fluctuations des débits journaliers). La relation entre les concentrations de MES et les débits journaliers est plutôt une fonction exponentielle car les concentrations de MES montent très vite lors des pics de crues.

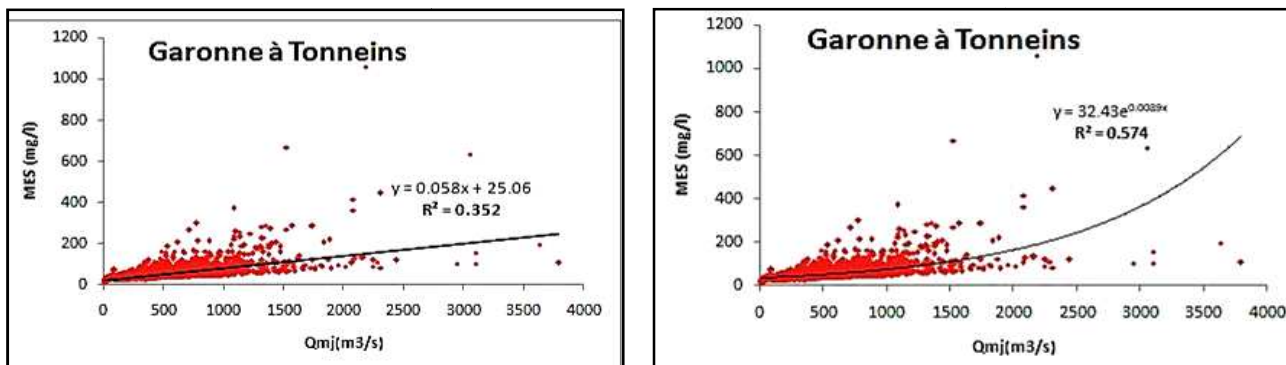


Figure 18: Corrélation entre la concentration en MES et le débit moyen journalier (Qmj)

IV.3.3 Flux annuel de MES

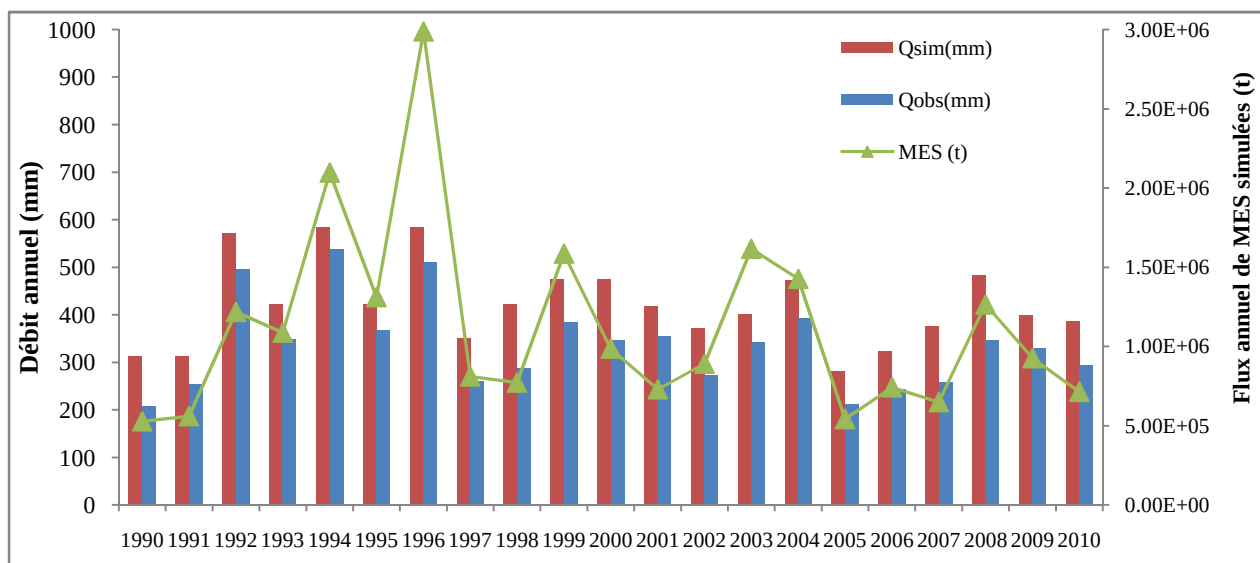


Figure 19: Débits et exportation annuelle de MES simulés à l'exutoire du bassin de la Garonne (Tonneins) et débits annuels simulés et observés.

Le flux moyen annuel de MES est 1,12 Mt et le flux maximal est de l'ordre 3 Mt. On voit que le flux annuel de MES simulé par le modèle (cf. Figure 19) est 3 fois plus que le flux de MES estimé par Maneux (1998). Le graphique ci-dessus nous montre la variation de l'exportation de MES en fonction de débit. L'exportation maximale des flux de MES (3Mt) se produit en 1996 l'année hydrologique la plus humide, et celle minimale (0,5Mt) est en 2005, l'année la plus sèche.

Le flux de MES simulés ne prennent pas en compte le stockage des sédiments dans les barrages hydroélectriques et dans les réservoirs naturels.

IV.3.4 Flux annuels des sédiments

Les flux annuels de sédiments simulés sont présentés dans la figure 20a. Les flux annuels de sédiments varient entre 2,5 Mt à 10 Mt, en moyenne 110 tonnes/an/km² pour le flux spécifique de sédiments. Le flux de sédiment maximal a eu lieu en 1996 et minimal en 2001 et en 2005. Les flux de sédiments sont faibles au cours de 2001 et 2005 car correspondent à des années sèches. Les flux de sédiments simulés sont plus importants que les flux des sédiments estimés par Maneux (1998) et Lapaquellerie et al. (1995). Cependant, une calibration approfondie avec des données plus importantes au niveau des sous-bassins devraient améliorer nettement les résultats.

Oeurng et al.(2011b) a montré que les flux des sédiments simulés sont fortement corrélés avec les flux d'eau. Dans beaucoup de cas d'étude, les flux d'eau ont été utilisés pour estimer les flux de sédiments à long terme. Dans notre cas, nous pouvons voir une relation entre les flux de sédiments simulés et les débits moyens, la corrélation est bonne avec le coefficient $R^2 = 0,67$, (Figure 20b).

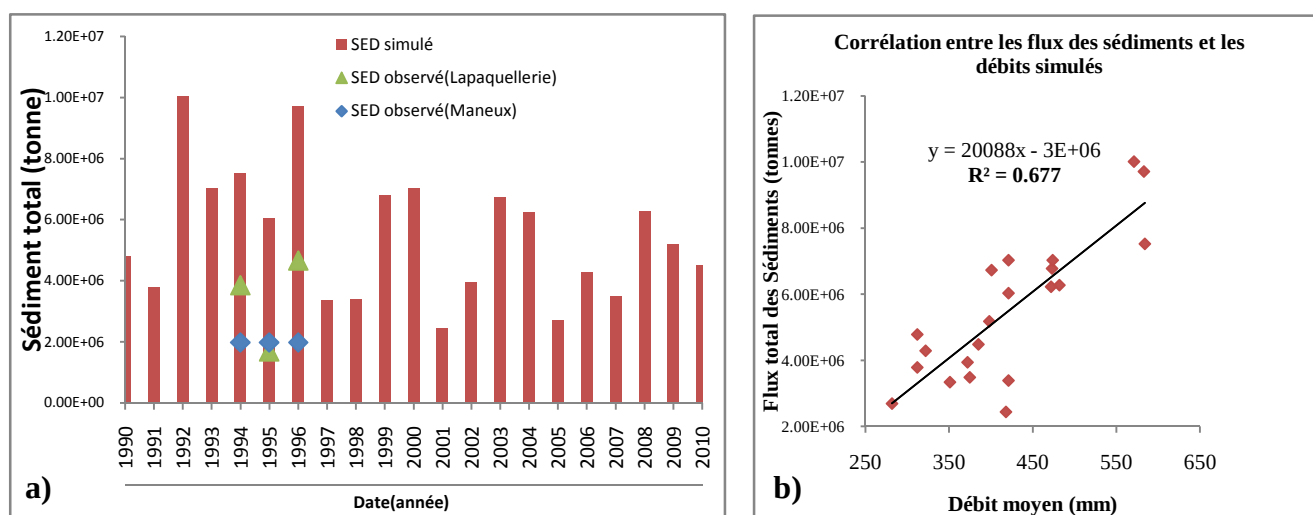


Figure 20: Flux des sédiments simulés et flux des sédiments observés(a) et. Corrélation entre les sédiments et les débits (b).

IV.4 Identification des zones d'érosion critiques

Nous cherchons à estimer l'intensité des processus d'érosion dans le bassin versant et le taux de transport spécifique, qui est le flux moyen annuel de MES exportés par le bassin versant rapporté à sa surface, et qui est plus significatif que le flux annuel. La valeur du flux rapportée à la surface du bassin versant peut être assimilée à un taux d'érosion spécifique qui exprime la quantité de matière érodée par an et par unité de surface.

Dans le bassin de la Garonne, le taux d'érosion des sédiments varie entre 20 t/km²/an et 1 000 t/km²/an et le taux d'érosion moyen est de 110 t/km²/an (Figure 21a). Coynel (2005) a estimé le taux d'érosion spécifique de la Garonne et elle a montré que le taux d'érosion spécifique de la Garonne est entre 11-74 t/km²/an. D'après Probst (1983), le taux d'érosion spécifique moyen de la Garonne est 35 t/km²/an et 30 t/km²/an dans le travail de Maneux (1998). Nous surestimons donc ce

taux d'érosion car la calibration n'est pas encore finalisée. Cependant le modèle peut nous donner des informations spatiales sur les niveaux relatifs d'érosion.

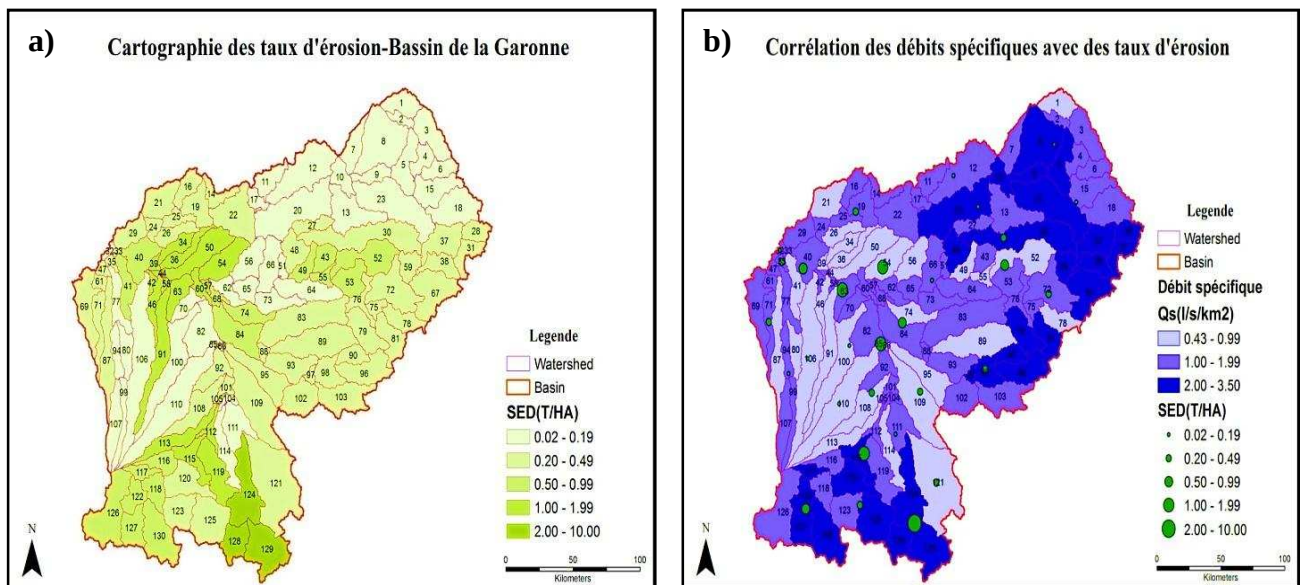


Figure 21: Taux d'érosion spécifiques des sédiments des 130 sous-bassins (a). et Corrélation entre les débits et les taux d'érosion (b).

D'après la carte des taux d'érosion spécifiques des sédiments (Figure 21a), nous pouvons identifier les zones d'érosion critique. Nous observons que les sous-bassins en amont de la Garonne (en Ariège) contribuent énormément dans la charge de sédiments comme les sous-bassins 124, 128, 129, le taux d'érosion spécifique arrivent jusqu'à $1\,000\text{ t/km}^2/\text{an}$. Et, nous voyons quand même dans la partie aval de la Garonne (la partie de la confluence entre la Garonne le Tarn (Malausse), et le Lot) les forts taux d'érosion de sédiments.

Dans le cas de notre étude, nous n'avons pas mis en évidence les données des aménagements des terres, des réservoirs naturels (lacs, étangs, lagunes, etc.), des barrages hydroélectriques, surtout des débits entrants et sortants de ces barrages. C'est normal que le résultat de la simulation de sédiments ne soit pas correct pour le moment, elle produit beaucoup de sédiments érodés car les données citées ci-dessus jouent des rôles très importants dans les stockages des sédiments.

D'après Maneux (1998), les forts transports spécifiques dans les bassins versants sont favorisés par :

- la topographie et par la climatologie de la zone (l'intensité de pluie et de ruissellement)
- la nature du sol et l'occupation du sol

Donc, dans notre cas l'importance du taux d'érosion des sous-bassins en amont de la Garonne peut être causée par la topographie (forte pente). Tandis que dans la partie aval de la Garonne, le taux d'érosion peut être conditionné par la nature du sol, l'occupation du sol et les flux d'eau. La figure 22b décrit quand même la corrélation significative des flux d'eau sur les flux de sédiments.

V. CONCLUSION et PERSPECTIVES

A l'échelle des grands bassins versants tel que la Garonne, la calibration du modèle est un travail dur qui prend beaucoup de temps ainsi que de la patience pour avoir des bons résultats dans la simulation des débits journaliers et des sédiments. La simulation des débits journaliers est meilleure que la simulation de MES. En même temps, le modèle surestime les débits journaliers et les MES surtout au cours des périodes de crues. Malgré la surestimation des débits journaliers, les résultats de la simulation notamment des débits sont acceptables.

A l'échelle des sous-bassins les résultats des débits mensuels simulés sont corrects en comparaison avec les 20 stations de jaugeage réparties dans le bassin. En regardant les valeurs de Nash (E_{NS}) et de coefficient R^2 , nous voyons que la plupart des valeurs de ces coefficients sont bonnes. Les valeurs de Nash varient entre -0,36 et 0,78, seul le sous bassin Sarrans sur la Truyère amont qui porte la valeur négative. Et, les valeurs de R^2 varient entre 0,18 et 0,87. Les mauvaises valeurs de Nash et R^2 se trouvent aux sous-bassins qui ont les exutoires loin des stations de jaugeage, d'où les erreurs au cours de la comparaison des débits. En tout cas, nous avons obtenu de bons résultats sur la simulation des débits mensuels et journaliers, les résultats sont corrects en comparaison avec les résultats observés compte tenu de la simplification des données et du nombre de sous-bassins versants.

A partir de la moyenne des débits simulés des sous-bassins, nous avons pu identifier les principaux contributeurs en termes de débits spécifiques. Nous voyons que ce sont les sous-bassins en amont de la Garonne et du Massif Central, c'est-à-dire la partie amont du bassin de Lot, Tarn et Aveyron, qui sont les principaux contributeurs des débits à la Garonne.

Au contraire, nous n'arrivons pas à bien caler le modèle pour la simulation de sédiments. Les résultats de MES et des flux de sédiments simulés dépassent les valeurs observées. La charge en suspension simulée est 2 fois plus grande que les MES mesurées à la station de contrôle de la qualité de l'eau à Agen et à Verdun-sur-Garonne au cours de la période de crues. Pendant la période de décrues (étiage) l'écart entre la MES simulée et observée est de l'ordre 20 mg/l. Parallèlement, pour les flux de MES et de sédiments, ils sont plus importants que les flux de MES et des sédiments estimés par les anciens travaux (Travaux de Probst (1983) et de Maneux (1998)). Par contre, nous avons obtenu des résultats proches dans les tendances malgré les hétérogénéités des sous-bassins versants et les informations de réservoirs naturels et des barrages hydroélectriques n'ayant pas été pris en compte au cours de la simulation.

Nous avons mis en évidence une relation entre les flux de MES et les débits journaliers, ainsi que les flux de sédiments et les débits journaliers. Les corrélations de ces derniers sont très

significatives. A partir des bonnes corrélations empiriques des débits et des flux de MES et de sédiments, nous arrivons à estimer à long-terme les flux de MES et de sédiments en utilisant ces relations empiriques. Ces dernières nous aident à réduire les travaux dans le futur, surtout les coûts des travaux sur les terrains.

L'identification des zones d'érosion critique se fait à partir des taux d'érosion spécifiques fournies par la simulation des flux de sédiments. Il faut des méthodes d'aménagements des terres appropriées afin de pouvoir lutter contre l'érosion intense de ces zones.

La modélisation des transferts d'eau et de MES est très importante car il nous aide à comprendre le comportement du bassin versant en terme de réponse hydrologique et l'érosion mécanique des sols en relation avec les activités anthropiques et des scénarios de changement climatique. Une fois calibré et validé, le modèle peut prédire sur du long terme la réponse hydrologique et les transports des sédiments. Donc, la modélisation est une approche très utilisable pour les travaux de recherches.

Afin d'améliorer ce travail, il faut :

- Avoir les données précises sur la pédologie, particulièrement les caractéristiques détaillées du sol du bassin de la Garonne
- Avoir les données précises sur l'occupation du sol, les pratiques agricoles pour les sous-bassins agricoles, la période de rotation des cultures.
- Prendre encore plus de stations météorologiques pour que les données climatologiques soient représentatives, surtout les données pluviométriques dans les sous-bassins en altitude.
- Entrer tous les réservoirs naturels (lacs, étangs, lagunes) et les barrages hydroélectriques

Pour les barrages hydroélectriques, il faut avoir les données précises sur la capacité de stockage de l'eau du réservoir et les flux entrants-sortants du barrage, surtout sur les affluents qui sont exploités pour l'hydroélectricité (par exemples : le Lot, la Truyère et la Garonne en Ariège).

- Effectuer les prélèvements quotidiens des concentrations en MES.
- Faire la calibration à l'échelle des sous-bassins de l'amont vers l'aval, au pas de temps journalier.
- Avoir une durée convenable pour le travail (travail de thèse).



BIBLIOGRAPHIE

- Arnold, J.G., Srinivasan, P., Muttiah, R.S., Williams, J.R., 1998. Large area hydrologic modeling and assessment. Part I. Model development. *Journal of American Water Resources Association* 34, 73–89.
- Beasley, D.B., Huggins, L.F., Monke, E.J., 1980. ANSWERS: a model for watershed planning. *Trans. ASAE* 23 (4), 938–944.
- Boithias, L., 2012. Modélisation des transferts des pesticides à l'échelle des bassins versants en période de crue. Thèse, Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT).
- Coynel, A., 2005. Erosion mécanique des sols et transferts géochimiques dans le bassin Adour Garonne. Thèse, Université Bordeaux 1.
- Jalel, A., Christophe, C., Zohra, L.C., Sihem, B., 2009. Etude de sensibilité du modèle SWAT à la distribution spatiale de la pluie en contexte Méditerranéen sub-humide (Sous-bassin versant de Joumine. bassin du lac Ichkeul. Tunisie). Congrès International Geotunis décembre 2009.
- Jha, M., W. Gassman, P., Secchi, S., Gu R., Arnold, Jeff., 2004. Effect of watershed subdivision on SWAT flow, sediment, and nutrient predictions. *Journal of American water resources association* (JAWRA).
- Knisel, W.G., 1980. CREAMS, a field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems. USDA Conservation Research Report No. 26. Washington, D.C: USDA.
- Lapaquellerie, Y., Maillet, N., Jouanneau, J.M., Coakley, J.P., Latouche, C., 1995. Flux de matières en suspension et de Cadmium dans le Lot. *Hydrogéologie appliquée* 8, 1-2.
- Lefrançois, J., Grimaldi, C., Gascuel-Odoux, C., Gilliet, N., 2007. Suspended sediment and discharge relationship to identify bank degradation as a main sediment source on small agricultural catchments. *Hydrological Processes* 21, 2923–2933.
- Ludwig, W., Probst, J.L., 1996. A global modeling for climatic morphological and lithological control of river sediment discharge to the oceans. *Erosion and sediment* 236, 21-28.
- Ludwig W., Probst, J.L., 1998. River sediment discharge to the oceans: Present-day controls and global budgets. *American Journal of Science* 298, 265–295.
- Maneux, E., 1998. Erosion mécanique des sols et transports fluviaux de matières en suspension : Application des systèmes d'information géographique dans les bassins versants de l'Adour, de la Dordogne et de la Garonne. Thèse, Université Bordeaux 1.
- Megnounif, A., Terfous, A., Ghenaïm, A., Poult, J.B., 2004. Rôle des crues dans la production de sédiments transportés en suspension dans un cours d'eau des bassins versants méditerranéens. VIII^{ème} Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, INSA de Strasbourg.
- Meybeck, M., 1988. How to establish and use world budgets of riverine materials. In: Lerman, A. and Meybeck, M. (Eds) *Physical and Chemical Weathering in Geochemical Cycles*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 247-72.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I-a discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10, 282–290.
- Nearing, M.A., Foster, G.R., Lane, L.J., Finkner, S.C., 1989. A process-based soil erosion model for USDA–water erosion prediction project technology. *Transactions of the ASAE* 32(5), 1587– 1593.

- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Srinivasan, R., Williams, J.R., 2005. Soil and Water Assessment Tool, Input/Output File Documentation. USDA Agricultural Research Service and Texas A&M Blackland Research Center, Temple
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., 2011. Soil and Water Assessment Tool, Theoretical Documentation: Version 2009. USDA Agricultural Research Service and Texas A&M Blackland Research Center, Temple
- Oeurng, C., 2010. Transport des matières en suspension et du carbone organique à l'échelle du bassin versant agricole : analyse de la dynamique et modélisation agro-hydrologique (SWAT). Thèse, Université Toulouse 3 Paul Sabatier.
- Oeurng, C., Sauvage, S., Coynel, A., Maneux, E., Etcheber, H., Sánchez-Pérez, J.M., 2011a. Fluvial transport of suspended sediment and organic carbon during flood events in a large agricultural catchment in south-west France. *Hydrological processes*, in press. doi :10.1002/hyp. 7999.
- Oeurng, C., Sauvage, S., Sánchez-Pérez, J.M., 2011b. Assessment of hydrology, sediment and particulate organic carbon yield in a large agricultural catchment using the SWAT model. *Journal of Hydrology* 401, 145–153
- Parajuli, P.B., Nelson, N.O., Fress, L.D., Mankin, K., 2009. Comparison of AnnAGNPS and SWAT model simulation results in USDA-CEAP agricultural watersheds in south-central Kansas. *Hydrological process* 23, 748-763.
- Probst, J.L., 1983. Hydrologie du bassin de la Garonne, Modèle de mélange-bilan de l'érosion exportation des phosphates et des nitrates. Thèse, Université Paul Sabatier Toulouse.
- Sauvage, S., Teissier, S., Vervier, P., Améziiane, T., Garabetian, F., Delmas, F., Caussade, B., 2003. A numerical tool to integrate bio-physical diversity of a large regulated river: Hydro-biogeochemical bases; the case of the Garonne River (France). *River Res. Applic.* 19, 181-198.
- Sharma, K.D., Singh, S., 1995. Satellite remote sensing for soil erosion modeling using the ANSWERS model. *Hydrological Sciences* 40, 259-272.
- Tisseuil, Clément., J. Wade, A., Tudesque, L., Lek, S., 2008. Modeling the stream water nitrate dynamique in a 60 000 km² European catchment, the Garonne, Southwest France. *Journal of Environment* 37, 2155 – 2169.
- Viney, N.R., Sivapalan, M., 1999. A conceptual model of sediment transport: application to the Avon River Basin in Western Australia. *Hydrological Processes* 13, 727–743.
- Walling, D.E., 1983. The sedimentary problem. *Journal of Hydrology* 65, 209-237
- Walling, D.E., He, Q., 1999. Improved models for estimating soil erosion rated from ¹³⁷Cs measurements. *Journal of Environmental Quality* 28, 611–622.
- Walling, D.E., Fang, D., 2003. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and planetary change* 39, 111-126.
- Xu, Z.X., Pang, J.P., Liu, C.M., Li, J.Y., 2009. Assessment of runoff and sediment yield in the Miyun Reservoir catchment by using SWAT model. *Hydrological processes* 23, 3619-3630.

ANNEXES

Tableau de la légende de la carte pédologique du bassin versant avec la codification des thèmes au 1/80000 (CACG)

CODE_SOL	TOPOGRAPHIE	NATURE	DESCRIPTION	CARACTERISTIQUES
R127	Pente faible ou moyenne (< 15%)	Alluvions récentes	Alluvions de la Garonne Calcaires	Limono-sableuses en surface, sablo-limoneuses en profondeur
R131	Pente faible ou moyenne (< 15%)	Alluvions récentes	Alluvions des rivières	Calcaires
R212	Pente faible ou moyenne (< 15%)	Calcaires	Sur formations miocènes	Terreforts profonds (marnes à plus de 40 cm de profondeur)
R213	Pente faible ou moyenne (< 15%)	Calcaires	Sur formations miocènes	Terreforts superficiels (marnes à moins de 40 cm de profondeur)
R325	Pente faible ou moyenne (< 15%)	Non calcaires	Sur dépôts divers	Cailloutis de lomagne
R331	Pente faible ou moyenne (< 15%)	Non calcaires	Boulbènes du système ancien des rivières	Profondes
R351	Pente faible ou moyenne (< 15%)	Non calcaires	Boulbènes du système ancien des rivières	Limono-argileuses
R353	Pente faible ou moyenne (< 15%)	Non calcaires	Sur dépôts divers	Limono-argileux et colluvion d'origine non calcaire
R520	Pente forte (< 15%)	Calcaires	Sur marne ou marno-calcaire	Squelettique

Relation des codes de l'occupation du sol

Code SWAT	Occupation du sol (CLC)
GRAP	Vignobles
PAST	Système culturaux et parcellaire complexe
	Système culturaux et parcellaire complexe
	Forêts et végétation arbustive en mutation Forêts et milieux semi-naturel-Espaces ouverts, sans ou avec peu de végétation
	Pelouses et pâturages naturels
	Végétation clairsemée
PEAS	Vergers et petits fruits
AGRL	Terres arables hors périmètres d'irrigation
	Surface essentielle agricole, interrompues par des espaces naturels importants
RNGE	Landes et broussailles
PINE	Forêts de conifères
FRSD	Forêts des feuillus
	Forêts mélangés, forêts et milieux semi-naturels-Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée
UIDU	Extraction de matériaux
URBN	Tissu urbain discontinu
UCOM	Zones industrielles et commerciales
UINS	Equipements sportifs et de loisirs Territoire non agricoles-Terres arables
UTRN	Glaciers et neiges éternelles Zones humides-Zones humides intérieures
	Réseaux routier et ferroviare et espaces associés
	Réseaux routier et ferroviare et espaces associés
	Aéroport Territoires artificialisés-Mines, décharges et chantiers
URHD	Tissu urbain continu
WETN	Tourbière
WATR	Plan d'eau
	Cours et voies d'eau
ROCK	Roches nues

RESUME

Le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 2009 a été utilisé pour simuler les débits de l'eau et les transports des sédiments au pas de temps journalier dans le bassin versant de la Garonne à Tonneins (50 000 km²). Le modèle a été appliqué pour évaluer l'hydrologie et les sédiments dans le bassin versant associé aux activités anthropiques en utilisant les données observées des débits journaliers de 20 stations de jaugeage et des matières en suspension (MES) journalières des stations de contrôle existants sur la Garonne. Le modèle intègre aussi les données climatologiques de 39 stations météorologiques réparties dans le bassin versant pour une durée de 20 ans (Janvier 1990-Décembre 2010). Les données des débits journaliers et de MES observées (10 ans, 1991-2000) ont été utilisées pour la calibration et la période de 10 ans (2001 à 2010) a été utilisée pour la validation du modèle.

Les valeurs des débits journaliers simulés correspondent bien aux valeurs des débits observés, les résultats sont satisfaisants et acceptables pour les débits mensuels des sous-bassins versant de Garonne ayant les exutoires proches des stations de jaugeages choisies. La précipitation moyenne annuelle estimée par le modèle pour la durée de 20 ans est de l'ordre 950 mm. 52% de la précipitation retourne par évapotranspiration et le reste participe à l'écoulement souterrain et au ruissellement superficiel vers les cours d'eau. La moyenne des flux d'eau simulés pour toute la période de l'étude est de 390 mm en comparaison avec 335 mm des débits observés (Garonne à Tonneins). A travers les transports spécifiques simulés des débits moyens journaliers, ce sont les bassins en amont de la Garonne et en amont des affluents, dans la partie du Massif Central, qui sont les principaux contributeurs des débits à la Garonne au cours des événements pluvieux.

La simulation de MES et de sédiment n'est pas bonne malgré plusieurs calibrations faites, la concentration en MES et les flux des sédiments sont plus importants que les valeurs observées. La valeur moyenne de MES simulée est de 55 mg/l contre 25 mg/l pour la valeur mesurée à la station de contrôle à Agen. L'écart est important au cours de la période d'étiage (20 fois l'écart entre les MES simulées et observées), tandis qu'au cours de la période de crues les valeurs de MES simulées sont 2 fois plus grandes que les valeurs de MES observées. Parallèlement, les sédiments simulés sont plus importants que les sédiments étudiés par les anciens travaux. Le taux d'érosion moyen des sédiments simulés est de 110 t/an/km² (taux d'érosion normal 20 à 35 t/an/km² pour la Garonne). Par contre, les résultats de simulation de MES sont corrects dans les tendances. La bonne corrélation entre les débits moyens journaliers et les transports spécifiques a été établie. L'érosion spécifique varie entre 20 t/an/km² et 1000 t/an/km² et les zones contribuant à l'érosion critique des sols sont les sous-bassins se trouvant en altitude (forte pente).

ABSTRACT

The Soil and Water Assessment Tool (SWAT, 2009) was used to simulate the discharge and sediment transport at daily time step within the Garonne River Catchment (50 000 km², outlet in Tonneins). The model SWAT was applied to evaluate the catchment hydrology and sediment associated with human activities using the daily observed discharge data of 20 stations and suspended sediment (MES) of existing control station along Garonne River and climate data of the 39 meteorological stations spread in the catchment for the 20 years (January 1990- December 2010). The daily observed discharge and MES data (10 year, 1991-2000) were used for the calibration and the period 10 year (2001-2010) was used for the validation of model.

Simulated daily discharge values matched well the observed values; the results are satisfactory and also acceptable for monthly flow of Garonne sub-catchments with the outlets located close to the chosen observed discharge stations. The mean annual precipitation estimated by the model for 20 years is 950 mm. 52% of precipitation lost in term of evapotranspiration and the rest contribute to rivers through ground water flows and surface runoffs. Simulated mean water yield for the whole simulation period amounted to 390 mm, comparable to the observed value (Garonne at Tonneins) 335 mm. According to the simulated specific daily flow, the main contributors of water flow during rainfall events are the sub-catchments located in the upstream of Garonne and in the upstream of some Garonne's affluent, particularly in Massif Central.

The sediment transport simulation is not good though many calibration processes had been done. The concentration of MES and the sediment flux are important the observed values of sediment transports. Simulated mean of MES is 55 mg/l compared to the observed value 25 mg/l (measured in Agen). During the drought period the simulated values of MES are steadily bigger than the observed value (20 times more than the measured concentration). However, during flood events the simulated value of MES is slightly different from the measured value (2 times more than the measured concentration). Similarly, the simulated sediment transport is much more the measured sediment studied by the ancient researches. The mean simulated annual sediment yield is 110t/year/km² compared to the normal sediment yield of Garonne catchment ranged from 20 to 35 t/year/km². However, the simulation of sediment transport is close to the reality and is in the correct scale of sediment flux. The good correlation between the mean daily discharge and sediment transport specific was established. The rate of soil erosion ranged from 20 t/year/km² to 1000 t/year/km² and the zone contributed to critical soil erosion located in the upstream of catchment, sub-catchment with high slope.

Les mots- clés : SWAT, simulation, calibration et validation, activités anthropiques, matière en suspension, sédiments, transports spécifiques.