

Spécialité « Agronomie »

Spécialisation « Agronomie et Environnement »

## Mémoire de fin d'études

Formation Ingénieur à AgroSup Dijon  
Formation Continue

Evolution du bilan hydrique à l'échelle de bassins-versants  
en contexte de changement climatique

Mise en place d'une méthodologie

Stage réalisé du 01/03 au 18/07/2014

**Olivier LEGRAS**

3<sup>ème</sup> année

**Thierry CASTEL**  
Maître de mémoire

**Marjorie UBERTOSI**  
Maître de stage

AgroSup Dijon  
Départ. Agronomie, Agroéquipement, Élevage et Environnement  
Combe Berthaux  
26, Boulevard du Docteur Petitjean - BP 87999  
21079 DIJON cedex

**Philippe AMIOTTE - SUCHET**  
Maître de stage

UMR 6282 - CNRS - BIOGÉOSCIENCES  
Université de Bourgogne  
UFR des Sciences de la Vie, de la Terre et de l'Environnement  
6 boulevard Gabriel  
21000 DIJON



Spécialité « Agronomie »

Spécialisation « Agronomie et Environnement »

## Mémoire de fin d'études

Formation Ingénieur à AgroSup Dijon

Formation Continue



Evolution du bilan hydrique à l'échelle de bassins-versants  
en contexte de changement climatique

Mise en place d'une méthodologie

Stage réalisé du 01/03 au 18/07/2014

**Olivier LEGRAS**

3<sup>ème</sup> année

**Thierry CASTEL**

Maître de mémoire

**Marjorie UBERTOSI**

Maître de stage

AgroSup Dijon  
Départ. Agronomie, Agroéquipement, Élevage et Environnement  
Combe Berthaux  
26, Boulevard du Docteur Petitjean - BP 87999  
21079 DIJON cedex

**Philippe AMIOTTE - SUCHET**

Maître de stage

UMR 6282 - CNRS - BIOGÉOSCIENCES  
Université de Bourgogne  
UFR des SVT et de l'Environnement  
6 boulevard Gabriel  
21000 DIJON



## **- REMERCIEMENTS -**

Ce mémoire clôture une formation d'ingénieur riche en savoirs et en expériences. L'ensemble de la formation et le stage de fin d'étude m'ont permis d'acquérir de nombreuses connaissances dans des domaines aussi variés que la pédologie, l'hydrologie, l'écologie, l'agronomie... Au regard de la complétude du cursus suivi à AgroSup Dijon, cette liste n'est bien évidemment pas exhaustive. Ainsi, je voulais remercier très chaleureusement l'ensemble des personnes qui ont participé à l'élaboration de ce mémoire.

Tout d'abord, je voudrais remercier mes deux maîtres de stage pour avoir bien voulu m'accepter comme stagiaire. Madame Marjorie UBERTOSI, enseignant-chercheur, pour la qualité de son encadrement et son aide dans l'expertise pédologique de ce mémoire. Egalement Monsieur Philippe AMIOTTE-SUCHET, enseignant-chercheur, pour sa disponibilité et l'ensemble de ses précieux conseils, notamment en hydrologie.

Je remercie Monsieur Thierry CASTEL d'avoir accepté d'être mon tuteur pédagogique.

Je remercie Monsieur Jean-Marc BRAYER, ingénieur de recherche pour sa disponibilité et son appui dans l'utilisation du logiciel ArcGis.

Je remercie Monsieur Aurélien ROSSI, docteur en hydrologie, pour les extractions des données climatiques et Monsieur Etienne BRULEBOIS, doctorant, pour sa coopération dans la délimitation des bassins-versants.

Je remercie l'ensemble des membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à prendre connaissance et à évaluer mon travail.

Je tiens également à remercier Madame Laure LAMY, responsable du cursus des ingénieurs fonctionnaires, pour sa disponibilité et sa gentillesse tout au long de la formation.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.



## **- LISTES DES ABREVIATIONS -**

|                 |                                                                            |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------|
| CO <sub>2</sub> | : Dioxyde de Carbone.                                                      |
| DREAL           | : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement. |
| ETM             | : EvapoTranspiration Maximale.                                             |
| ETP             | : EvapoTranspiration Potentielle.                                          |
| ETR             | : EvapoTranspiration Réelle.                                               |
| FAO             | : Food and Agriculture Organization of the united nations.                 |
| FPT             | : Fonction de PédoTransfert.                                               |
| GICC            | : Gestion et Impacts du Changement Climatique.                             |
| GIEC            | : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat.          |
| HRU             | : Hydraulic Response Unit.                                                 |
| HYCCARE         | : Hydrologie, Changement Climatique, Adaptation, Ressource en Eau.         |
| IGCS            | : Inventaire Gestion et Conservation des Sols                              |
| INRA            | : Institut National de la Recherche Agronomique.                           |
| LUT2            | : Land Use Traffic 2.                                                      |
| MNT             | : Modèle Numérique de Terrain.                                             |
| MO              | : Matière Organique.                                                       |
| ONU             | : Organisation des Nations Unies.                                          |
| RFU             | : Réserve Facilement Utilisable.                                           |
| RS              | : Réserve de Survie.                                                       |
| RU              | : Réserve Utile.                                                           |
| SAGE            | : Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux.                             |
| STIC            | : Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standards.               |
| SWAT            | : Soil and Water Assessment Tool.                                          |
| UCS             | : Unité Cartographique de Sol.                                             |
| USDA            | : United States Department of Agriculture.                                 |
| UTS             | : Unité Typologique de Sol.                                                |



## **- LISTES DES FIGURES ET DES TABLEAUX -**

|                                                                                                                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1 : Schématisation du projet HYCCARE Bourgogne (GICC, 2012) .....                                                                                                                                     | 4  |
| Figure 2 : Représentation spatiale du bilan hydrique (source: Bilan mi-parcours HYCCARE, 2014).....                                                                                                          | 8  |
| Figure 3 : Méthode de création des HRU dans SWAT (Ruelland et al ,2004) .....                                                                                                                                | 13 |
| Figure 4 : Schématisation des fonctions de transferts de SWAT (Chaponnière, 2005).....                                                                                                                       | 13 |
| Figure 5 : Accès à l'interface de la saisie des données hydrologiques. ....                                                                                                                                  | 14 |
| Figure 6 : Accès à l'interface de la saisie des données liées aux caractéristiques du sol.....                                                                                                               | 16 |
| Figure 7 : Accès à l'interface de la saisie des données climatiques. ....                                                                                                                                    | 16 |
| Figure 8 : Synthèse des données climatiques demandées en entrée du modèle ArcSWAT.....                                                                                                                       | 19 |
| Figure 9 : Localisation du bassin-versant de l'Arroux à Dracy Saint Loup.....                                                                                                                                | 20 |
| Figure 10 : Types d'occupation du sol du bassin-versant de l'Arroux à Dracy Saint Loup (en hectare et en pourcentage).....                                                                                   | 20 |
| Figure 11 : Débits moyens mensuels de l'Arroux (www.rdbrmc.com, en ligne) .....                                                                                                                              | 21 |
| Figure 12 : Hauteur annuelle des pluies en Bourgogne (Source : MétéoFrance).....                                                                                                                             | 21 |
| Figure 13 : Distribution des superficies des sous bassins-versants en fonction de leur nombre .....                                                                                                          | 25 |
| Figure 14 : Graphique de superficies cumulées des sous bassins versants en fonction de leur nombre.....                                                                                                      | 26 |
| Figure 15 : Nombre de sous bassins-versants créés par classe de superficies. ....                                                                                                                            | 26 |
| Figure 16 : Résultats des deux scénarios (par défaut à gauche et manuel à droite) sur la construction des données hydrologiques (nombre de sous bassins-versants en haut et nombre d'exutoires en bas). .... | 27 |
| Figure 17 : Réseau hydrographique, implantations des exutoires et délimitation géographique des 26 sous bassins-versants. ....                                                                               | 27 |
| Figure 18 : Répartition des types d'occupation du sol sur le bassin-versant de l'Arroux à Dracy Saint-Loup .....                                                                                             | 28 |
| Figure 19 : Exemple d'agrégation de polygones en limite départementale.....                                                                                                                                  | 30 |
| Figure 20 : Identification des problèmes de jonction entre les départements de la Côte d'Or et de la Saône-et-Loire .....                                                                                    | 30 |
| Figure 21 : Principe du Clip (Source : aide ArcMap ) .....                                                                                                                                                   | 31 |
| Figure 22 : Visualisation des problèmes de dimensionnement minimal des polygones suite au découpage de la zone d'étude. ....                                                                                 | 31 |
| Figure 23 : Histogrammes des surfaces des types de sol présents sur la zone d'étude.....                                                                                                                     | 32 |
| Figure 24 : Evolution de la surface des types de sol après attribution des UTS majoritaires..                                                                                                                | 32 |
| Figure 25 : Histogramme de l'évolution de l'estimation de la RU après attribution des UTS majoritaires.....                                                                                                  | 34 |



|                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 26 : Comparaison de l'étendue des diversités de textures par strate avant et après attribution des UTS majoritaires. ....      | 35 |
| Figure 27 : Histogramme et carte des distributions des classes de pente sur le bassin-versant de l'Arroux à Dracy Saint-Loup .....    | 41 |
|                                                                                                                                       |    |
| Tableau 1 : Bassins-versant sélectionnés dans le projet HYCCARE (Fock, 2013). ....                                                    | 6  |
| Tableau 2 : Les différents régimes hydrodynamiques des sols saturés et non saturés en eau (Calvet, 2013). ....                        | 9  |
| Tableau 3 : Récapitulatif des données pédologiques à entrer dans le modèle. ....                                                      | 15 |
| Tableau 4 : Description des champs contenus dans le fichier Weather Generator Data. ....                                              | 18 |
| Tableau 5 : Description des champs contenus dans les fichiers de renseignements des stations météorologiques. ....                    | 18 |
| Tableau 6 : Description du contenu des fichiers textes contenant les valeurs des variables météorologiques. ....                      | 18 |
| Tableau 7 : Données extraites de la base DoneSol v3. ....                                                                             | 22 |
| Tableau 8 : cartes utilisées avec le logiciel ArcGIS. ....                                                                            | 23 |
| Tableau 9 : Longueur du réseau hydrographique en fonction de la surface des sous bassins-versants. ....                               | 24 |
| Tableau 10 : Différences des données hydrologiques entre un choix par défaut et un choix manuel. ....                                 | 27 |
| Tableau 11 : Exemple de calculs réalisés pour étudier l'évolution de la RU après l'attribution des UTS majoritaires .....             | 34 |
| Tableau 12 : Exemple de classes créées en fonction des données du tableau 11. ....                                                    | 34 |
| Tableau 13 : Classes de RU générées pour l'étude de l'évolution de l'estimation de la RU après attribution des UTS majoritaires. .... | 34 |
| Tableau 14 : Données de la base DoneSol v3 utilisées pour créer les requêtes d'extraction des données. ....                           | 36 |
| Tableau 15 : Description des fichiers climatiques à entrer dans ArcSWAT. ....                                                         | 41 |



## **- SOMMAIRE -**

Remerciements

Listes des abréviations

Listes des figures et des tableaux

Sommaire

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introduction.....                                                                | 1  |
| 1. Contexte d'étude.....                                                         | 2  |
| 1.1. Le changement climatique : de ses débuts à nos jours.....                   | 2  |
| 1.2. Projet HYCCARE .....                                                        | 3  |
| 1.2.1. Présentation du projet .....                                              | 3  |
| 1.2.2. Positionnement de l'étude dans le projet HYCCARE .....                    | 4  |
| 1.3. Problématique.....                                                          | 7  |
| 2. Etat de l'art .....                                                           | 8  |
| 2.1. Le bilan hydrique. ....                                                     | 8  |
| 2.2. Les paramètres de l'équation du bilan hydrique .....                        | 9  |
| 2.2.1. Précipitation, infiltration, ruissellement, drainage.....                 | 9  |
| 2.2.2. Variation du stock d'eau : réserve utile et évapotranspiration.....       | 10 |
| 3. Modèle et Matériels .....                                                     | 12 |
| 3.1. Le modèle SWAT.....                                                         | 12 |
| 3.1.1. Présentation générale .....                                               | 12 |
| 3.1.2. Présentation des données hydrologiques du modèle.....                     | 13 |
| 3.1.3. Présentation des données liées au sol : création des HRU.....             | 15 |
| 3.1.4. Présentation des données climatiques .....                                | 16 |
| 3.2. Matériels.....                                                              | 20 |
| 3.2.1. Présentation du territoire : le bassin-versant de l'Arroux .....          | 20 |
| 3.2.2. Le programme IGCS et la base de données DoneSol v3 .....                  | 22 |
| 3.2.3. Le référentiel pédologique de Bourgogne.....                              | 22 |
| 3.2.4. Cartes géographiques informatiques.....                                   | 23 |
| 4. Méthodologie de création des données.....                                     | 23 |
| 4.1. Construction des données hydrologiques .....                                | 24 |
| 4.1.1. Définition de la taille du réseau hydrographique .....                    | 24 |
| 4.1.2. Définition du nombre de sous bassins-versants et de leurs exutoires ..... | 25 |
| 4.2. Sélection des données relatives au sol.....                                 | 27 |
| 4.2.1. Données concernant l'occupation du sol .....                              | 27 |



|        |                                            |    |
|--------|--------------------------------------------|----|
| 4.2.2. | Création des données pédologiques .....    | 28 |
| 4.2.3. | Création des classes de pente .....        | 40 |
| 4.3.   | Construction des données climatiques ..... | 41 |
| 5.     | Discussions .....                          | 43 |
| 5.1.   | Intérêts .....                             | 43 |
| 5.2.   | Limites.....                               | 44 |
| 6.     | Conclusion.....                            | 45 |
|        | Bibliographie .....                        | 46 |



## Introduction.

Incertain et sous-estimé hier, le changement climatique est aujourd'hui accepté de manière consensuelle dans la communauté scientifique. Les conséquences de ce changement vont influencer de façon durable le paysage socio-économique de notre société tout entière. Moyens de transports, habitats, éducation, loisirs, productions agricoles et industrielles, l'ensemble des secteurs économiques devra s'adapter pour maintenir une croissance viable économiquement et acceptable écologiquement.

Face à ce changement climatique, les politiques doivent donc mettre en place des stratégies d'adaptation. Par conséquent, les effets du changement climatique doivent être identifiés pour mieux être anticipés. Or, si les différents scénarios dans ce domaine à l'échelle planétaire sont assez étudiés, les connaissances à l'échelle locale sont peu nombreuses ou non accessibles pour les décideurs. Parmi l'ensemble des connaissances dont devraient disposer les gestionnaires des territoires, celles portant sur la ressource en eau à l'échelle d'un bassin-versant occupent une place prépondérante à double titre :

- ✓ Il est accepté que le changement climatique va modifier la fréquence et l'intensité des pluies et par conséquent une modification des stocks et des écoulements hydriques.
- ✓ L'eau est une ressource primordiale pour le fonctionnement de notre société, que ce soit au niveau sanitaire par l'approvisionnement en eau potable, au niveau économique par l'importance de cet élément dans les rendements culturels et les processus industriels ou encore au niveau social par l'impact très dommageable des inondations.

La connaissance de l'impact du changement climatique à l'échelle des bassins-versants demande de développer davantage les simulations à hautes résolutions afin de créer de l'information fiable et disponible pour les décideurs (Bate *et al.*, 2008). Dans cette perspective, le projet HYCCARE-Bourgogne propose de développer deux axes d'étude dont un portant sur l'évolution de la ressource en eau au cours du XXI<sup>e</sup> siècle à une échelle fine des bassins-versants bourguignons et l'autre visant à analyser les stratégies d'adaptation à mettre en œuvre en fonction des évolutions projetées par l'axe 1 (Toussaint, 2012)

Pleinement intégré dans le projet HYCCARE, l'objectif de ce mémoire est de créer une méthodologie pour faire fonctionner un modèle de simulation de l'évolution du bilan hydrique sur un bassin-versant pilote de Bourgogne. Le modèle, choisi par un précédent travail de mémoire, est le logiciel SWAT développé par le département américain de l'agriculture. La mise en route et le calibrage de ce modèle nécessitent la collecte et l'expertise de nombreuses données qui permettront de créer un bassin-versant virtuel. Toutefois celui-ci doit être assez proche de la réalité du terrain pour être scientifiquement acceptable. C'est l'ensemble de cette méthodologie, impliquant des choix réfléchis, justifiés et permettant la modélisation d'un bassin-versant virtuel, qui sera présenté dans ce mémoire.

Après avoir présenté le contexte et la problématique de notre étude, nous définirons les paramètres du bilan hydrique. Le modèle SWAT et le logiciel ArcSWAT seront ensuite détaillés. Ce logiciel doit être implémenté par de nombreuses données que nous devons créer en croisant une multitude d'informations. Nous préciserons les types de données à générer et l'origine des informations dont nous disposons pour concevoir les données en entrée de modèle. Enfin, pour générer ces données nous avons élaboré une méthode que nous présenterons avec ses intérêts et ses limites.



## 1. Contexte d'étude.

### 1.1. Le changement climatique : de ses débuts à nos jours...

La relation à l'Environnement a toujours suscité chez l'Homme un intérêt particulier. Qu'il s'agisse de comprendre les origines de la création de la Terre ou l'influence du climat sur son mode de vie, l'être humain se passionne pour ces questions qui conservent, encore aujourd'hui, une part d'inconnu (Glacken, 1967). Il faut attendre 1824 pour qu'un savant français, Joseph Fourier établisse une théorie sur le phénomène naturel de rétention partielle des radiations solaires par l'atmosphère plus communément appelé l'effet de serre. Mais ce n'est qu'en 1938 que les premières hypothèses d'un changement climatique imputable aux activités anthropiques ont été énoncées devant la *Royal Meteorological Society* par un climatologue amateur britannique, G.S. Callendar (Callendar, 1938). Mais les scientifiques de l'époque ne pensaient pas qu'une augmentation de la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> pouvait entraîner un réchauffement climatique planétaire. Dans la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle, la guerre froide va inciter les Etats-Unis à investir massivement dans plusieurs domaines scientifiques pour asseoir leur hégémonie. La recherche atmosphérique bénéficie de nombreuses dotations financières. Ainsi, en 1957, trois chercheurs nord-américains, Gilbert Plass, Roger Revelle et Hans Suess, redécouvrent les travaux de Callendar et confirment ses hypothèses en affirmant que l'Homme, par son activité, était en train de mener une expérience inédite à grande échelle sur l'atmosphère. Mais les mouvements écologiques commencent à peine à se structurer et l'impact médiatique des travaux de Plass, Revelle et Suess n'est pas au rendez-vous. Au cours des années 80, la médiatisation du « greenhouse effect » (effet de serre) et du trou dans la couche d'ozone montre que l'homme peut avoir un impact plus important qu'il ne l'imaginait sur l'atmosphère. L'ONU fonde en 1988 le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat pour tenter de répondre aux inquiétudes grandissantes des scientifiques et de l'opinion publique. Depuis, la question climatique n'a cessé d'être présente dans les négociations internationales (sommet de la terre à Rio en 1992, protocole de Kyoto en 1997) avec souvent une ratification tardive des différents traités par les principaux pollueurs : Etats-Unis, Russie, Chine. (Mouhot, 2012). Ces avancés, bien trop lentes, ont toutefois le mérite d'exister, et de faire prendre conscience aux décideurs politiques et aux opinions publiques des différents pays, l'urgence à prendre en compte significativement cet enjeu majeur pour la pérennité des générations futures.

Aujourd'hui, le constat est sans ambiguïté : 25 ans après sa création, le GIEC annonce des conclusions très pessimistes pour les futures décennies en termes de changement climatique : les zones tropicales humides et les hautes latitudes, pourtant soumises aujourd'hui à de forts épisodes pluvieux saisonniers, auront un accroissement de la disponibilité en eau. A contrario, les zones tempérées, déjà impactées par des périodes de sécheresse, verront cette aridité se renforcer. Ainsi, plusieurs millions de personnes seront confrontées à une accentuation de leurs problèmes liés à la ressource en eau : inondations plus fréquentes pour certaines, sécheresses renforcées pour d'autres (GIEC, 2007).

Ces scénarios sur l'augmentation des températures et l'évolution des phénomènes pluvieux ont principalement été étudié à l'échelle de la planète. Mais qu'en est-il au niveau local ? Ces données sont-elles transférables au niveau d'une région ? Cette opérationnalité des données est un enjeu majeur. En effet, face au changement climatique, les politiques publiques ont la nécessité de disposer de données fiables pour mettre en place des stratégies d'adaptations. Cela implique que les effets du changement climatique soient clairement identifiés à l'échelle des territoires.

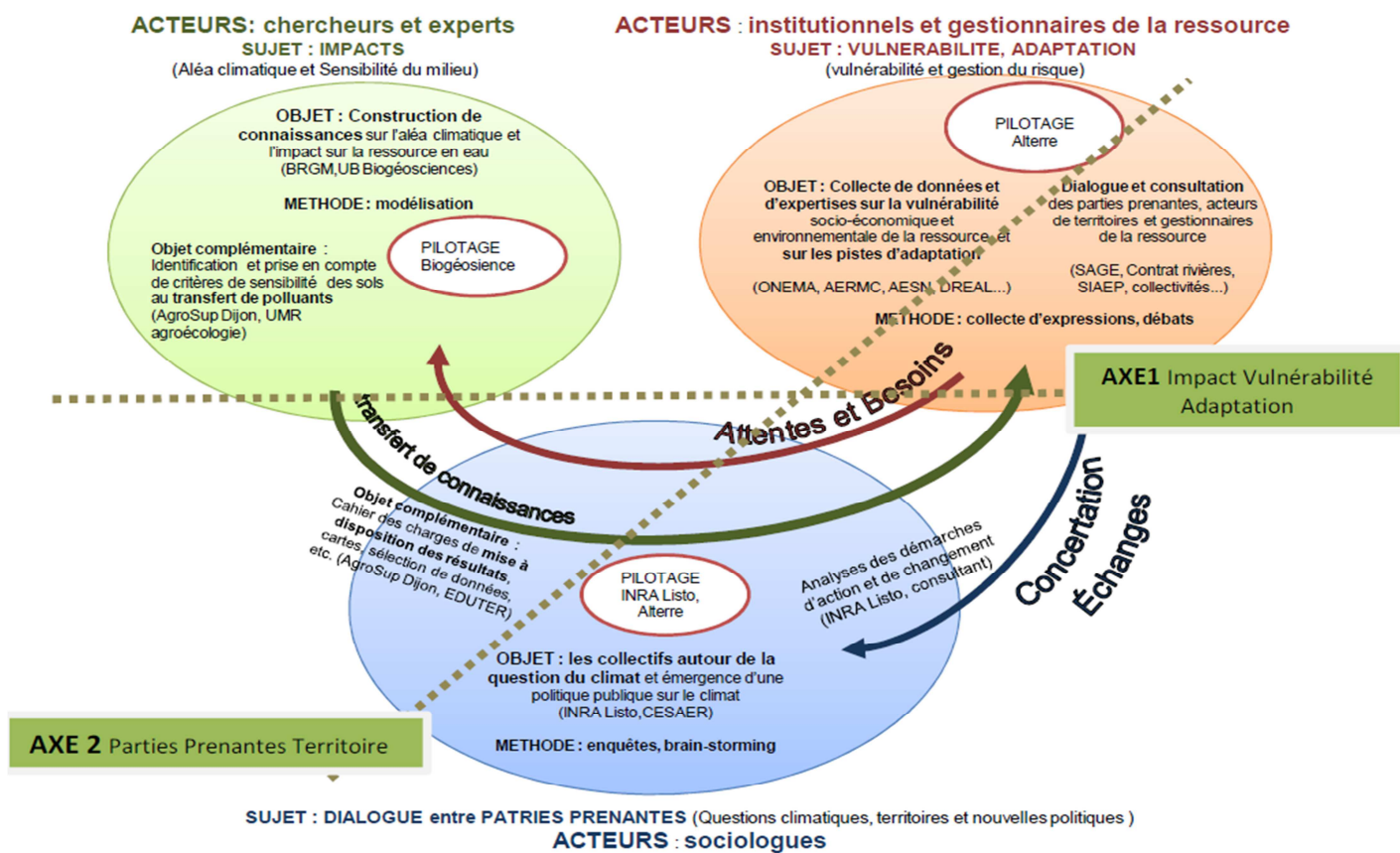


Figure 1 : Schématisation du projet HYCCARE Bourgogne (GICC, 2012).

Alterre Bourgogne, association environnementale à but non lucratif, a conduit entre 2009 et 2012 le projet Adaptation au changement climatique en Bourgogne : Contribution à l'élaboration des stratégies d'adaptation régionales et territoriales. En 2012 Alterre répond à un appel d'offre du GICC afin de se positionner sur un projet en continuité avec le travail précédemment conduit. La réponse du GICC est favorable et le projet HYCCARE est lancé. Ainsi, suite au constat sur le manque de données locales accessibles par les décideurs, ce projet a pour objectif de mieux caractériser localement les impacts du changement climatique, avec des données limitées à l'échelle de la Bourgogne. In fine, ce projet permettra de créer des synergies entre chercheurs et acteurs du territoire pour mettre en œuvre des politiques publiques.

## **1.2. Projet HYCCARE.**

### ***1.2.1. Présentation du projet.***

Le projet HYCCARE « Hydrologie, Changement Climatique, Adaptation, Ressource en Eau » s'inscrit dans un contexte de prise de conscience accru du changement climatique et des effets qu'il aura sur l'activité économique. Ce projet permettra donc d'améliorer les connaissances relatives à l'impact du changement climatique, en région Bourgogne. La ressource en eau est un élément particulièrement sensible en raison de son importance pour le secteur sanitaire (adduction d'eau potable) et pour le secteur économique (irrigation, industrie).

Le projet HYCCARE, dans son descriptif, identifie plusieurs hypothèses sur les conséquences du changement climatique au regard de la ressource hydrique :

- ✓ L'augmentation moyenne des températures pourraient entraîner des périodes de recharge de la ressource en eau plus courtes que celles de vidange. Avec un tel solde négatif, des problèmes de sécheresse pourraient être de plus en plus fréquents.
- ✓ La période de vidange, en plus d'être rallongée, pourrait également être plus intense en raison de la hausse des températures. Une évolution de plus de 1°C a été observée de 1961 à 2010 en Bourgogne, tandis que les précipitations de saison chaude sont restées stationnaires.
- ✓ Des incertitudes sont posées sur l'intensité de la recharge en eau. Ce phénomène dépend principalement de l'évolution des précipitations de saison froide. Malgré une légère augmentation des précipitations de saison froide en Bourgogne, notamment en automne (observations entre 1961 et 2010) celles-ci ne seraient pas suffisantes pour compenser la diminution de la saison de recharge.
- ✓ Enfin, des variabilités interannuelles climatiques sont aussi présentes. Ainsi, une incertitude plus forte sur les niveaux des précipitations et des températures impacterait donc les périodes de recharges – vidanges et aurait des conséquences sur la vulnérabilité des territoires face au changement climatique.

Le projet HYCCARE, dont l'objectif général est de mettre à la disposition des décideurs locaux des connaissances et des outils permettant de mieux appréhender le risque lié aux changements climatiques, s'articule autour de deux axes (figure 1 ci-contre) :

Le premier axe étudie l'impact du changement climatique sur la ressource en eau dans treize bassins-versants et les vulnérabilités induites par ce phénomène. Après un calage des données sur la période 1980 – 2010, des simulations climatiques régionales seront créées sur le 21<sup>e</sup> siècle. Deux trajectoires proposées par le GIEC seront envisagées : une aux effets du



changement climatique restreints, une autre aux effets plus marqués. Les résultats de ces simulations seront ensuite utilisés pour modéliser l'impact de l'évolution du climat sur les régimes des cours d'eau et les sols. L'échelle spatiotemporelle fine de ces simulations rendra plus lisible l'évaluation du risque pour les acteurs.

Ce premier axe permettra principalement :

- ✓ d'améliorer les connaissances autour de l'aléa climatique (évolution du climat et scénarios climatiques),
- ✓ d'affiner les connaissances sur l'impact du changement climatique au niveau de l'évolution de la ressource en eau à l'échelle de bassins-versants,
- ✓ d'accroître les connaissances de ce même impact sur le bilan hydrique des sols.

Le second axe est surtout orienté vers l'analyse de la construction de l'action collective face au changement climatique. Cet axe vise à étudier comment les acteurs d'un même territoire s'organisent et organisent leur réponse en matière d'adaptation. Cette analyse plus sociologique, portera plus sur les jeux d'acteurs et l'engagement de négociations face à la gestion de la ressource en eau dans une perspective d'aléa climatique. Cela permettra pour le décideur public de mieux préparer son action et d'identifier les points de crispation autour de la mise en œuvre des politiques liées à l'eau.

Cet axe à deux objectifs majeurs :

- ✓ Analyser les actions collectives autour du changement climatiques et des pistes d'adaptation
- ✓ Elaborer une charte de mise à disposition des données et des connaissances.

### ***1.2.2. Positionnement de l'étude dans le projet HYCCARE.***

Le travail réalisé au cours de ce stage de fin d'étude d'ingénieur se situe dans l'axe 1 du projet HYCCARE et plus particulièrement sur le 3<sup>e</sup> objectif :

« Connaissance sur l'impact du changement climatique : évolution du bilan hydrique, focus sur le taux de remplissage de la réserve utile des sols. »

Les conséquences du changement climatique sur le régime hydrique entraînent une modification du ruissellement et des disponibilités en eau du sol (Arnell, 2003). Les paramètres gérant le ruissellement, le prélèvement par la végétation, le taux de remplissage de la réserve utile des sols ont alors un intérêt majeur pour l'anticipation des risques liés au changement climatique tant sur le plan sanitaire que sur le plan économique. Le bilan hydrique, dont les paramètres sont connus, peut ainsi être mis en équation. Les résultats attendus permettront d'identifier quel terme du bilan hydrique sera impacté par les changements climatiques et dans quelle mesure. Les résultats permettront également de réaliser une cartographie haute résolution de la vulnérabilité des territoires vis à vis de la réserve utile des sols. Ces résultats serviront de base à des études prospectives sur l'adaptation des activités agricoles, sylvicoles et viticoles.

C'est dans ce contexte de recherche sur la dynamique de remplissage de la réserve utile des sols et de son intérêt majeur pour l'activité humaine, que ce travail se situe. Cette étude aura comme objectif central le paramétrage du logiciel ArcSWAT, union du modèle SWAT et du logiciel de Système d'Information Géographique ArcGis.

En amont et en parallèle de mon stage, plusieurs travaux ont été réalisés. Ces études portent sur 3 aspects de mon sujet de mémoire :



✓ Préparation des données météorologiques demandées en entrée du logiciel ArcSWAT.

Une équipe de climatologues a défini sur l'ensemble de la région Bourgogne un maillage de 3km sur 3km. A chaque maille (unité de base) correspond des données climatologiques en termes de précipitations, températures, durée d'ensoleillement... Ces données, couvrant une période allant de 1980 à 2100 ont été générées en 4 temps :

Etape 1 :

Les chercheurs ont récolté l'ensemble des données climatologiques entre 1980 et 2010 sur 160 stations bourguignonnes. Ces données sont discrètes car elles ne concernent que les stations météorologiques sur lesquelles elles ont été relevées.

Etape 2 :

Les scientifiques ont fait fonctionner un modèle climatique régional (Régional Climate Model). Les données en entrée sont celles des ré-analyses du centre Européen ERA-Intérim (Dee *et al.*, 2011). Les données en sortie seront comparées aux données de l'étape 1 pour vérifier si le modèle Climatique Régional génère des données fiables et proche de la réalité. Pour permettre cette comparaison les données de l'étape 1 seront mises à la résolution de 3 km par 3 km (upscaling). Quant à celles du centre ERA-Intérim, elles seront au contraire descendues à l'échelle 3 x 3 km (downscaling). Ces calculs permettront de comparer des valeurs à des échelles identiques.

Etape 3 :

Ensuite une fois le modèle régional validé, la simulation est lancée jusqu'en 2100 à partir des données CMIP 5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5).

✓ Sélection des bassins-versants.

Les chercheurs du projet et plus particulièrement Philippe Amiotte-Suchet ont sélectionné 13 bassins versants à étudier dans le cadre du projet HYCCARE. Ce choix a été orienté par plusieurs critères.

Tout d'abord, les bassins-versants retenus ont été sélectionnés à partir des stations hydrométriques de la Banque HYDRO. En effet, il est nécessaire de disposer de données fiables, dont les instruments de mesures sont régulièrement recalibrés pour éviter des erreurs de relevé. De plus, il est important de disposer de chroniques de débits sur une longue période afin d'ajuster au mieux les paramètres du modèle. La banque HYDRO, avec ses 172 stations en Bourgogne fournit toutes ces garanties de fréquence des calibrages et de longues chroniques. Ces 172 stations ont été triées afin de garantir une grande fiabilité des relevés, permettant une modélisation de qualité. Trois principaux critères ont permis de ne retenir que 61 stations, à savoir :

- Une taille du bassin-versant comprise entre 10 et 5000 km<sup>2</sup>
- La fiabilité des données des stations (selon l'expertise de l'hydrogéologue de la DREAL).
- L'impact des activités anthropiques sur le régime hydraulique (barrages...).

Trois agences de l'eau financent le projet HYCCARE : Rhône-Méditerranée-Corse, Seine-Normandie et Loire-Bretagne. Ainsi quatre ou cinq bassins-versants sont localisés dans chacun des trois grands bassins de ces agences. De plus, ces 13 bassins versants devront



recouvrir de manière représentative les grandes entités hydrogéologiques présentes en Bourgogne (par ordre d'importance) :

- les calcaires du jurassique inférieur et supérieur de la série Dijonnaise ;
- les sables et la craie du Crétacé ;
- socle granitique et métamorphique du Morvan ;
- les sédiments du tertiaire et du quaternaire ;
- les grès triasiques.

Enfin, au-delà des caractéristiques hydrogéologiques, de la fiabilité des données et des exigences des agences de l'eau impliquées, les bassins ont subi un dernier niveau de sélection en fonction des enjeux socio-économiques identifiés par les différents acteurs des territoires impliqués par cette étude. L'ensemble des bassins versants est présenté dans le tableau 1.

| Bassins versants                    | Enjeux                                                                                                             | Contexte hydrogéologiques                                                             |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| L'Ource à Leuglay                   | Référence karstique non influencée                                                                                 | Calcaire jurassique, karstifié                                                        |
| L'Armançon à Briennon sur Armançon  | Approvisionnement en eau potable (AEP)                                                                             | Craie crétacé, calcaires jurassiques                                                  |
| L'Yonne à Corancy                   | AEP (Lac de Pannecière)                                                                                            | Socle métamorphique et plutonique                                                     |
| Le Serein à Chablis                 | Enjeu quantitatif (EQ)                                                                                             | Calcaire jurassique, karstifié                                                        |
| La Tille à Crecey (amont)           | solidarité amont/aval + (EQ)                                                                                       | Calcaires jurassiques                                                                 |
| La Tille à Champdôtre (aval)        | solidarité amont/aval + (EQ)                                                                                       | Sédiments récents                                                                     |
| La Tille à Arceau                   | solidarité amont/aval + (EQ)                                                                                       | Calcaires jurassiques/sédiments récents                                               |
| La Seille à Saint-Usuge             | Petite hydroélectricité                                                                                            | Sédiments récents                                                                     |
| <b>L'Arroux à Dracy-saint-loup</b>  | <b>Problème amont/aval</b>                                                                                         | <b>Socle métamorphique, grès triasiques et calcaires jurassiques</b>                  |
| L'Arroux à Rigny sur Arroux         | Problème amont/aval                                                                                                | Socle métamorphique, grès triasiques et calcaires jurassiques                         |
| Le Nohain à Saint-Martin sur Nohain | Irrigation                                                                                                         | Calcaires jurassiques                                                                 |
| La Nièvre d'Arzembouy à Poiseux     | Petit bassin                                                                                                       | Calcaires jurassiques                                                                 |
| La Bourbince à Vitry-en-Charollais  | Pressions d'usage relatives à l'AEP, aux industries et au canal de Bourgogne. Présence d'un SAGE Arroux/Bourbince. | formations gréseuses du permien et trias. Socle granitique et métamorphique du Morvan |

*Tableau 1 : Bassins-versant sélectionnés dans le projet HYCCARE (Fock, 2013).*

Les simulations du projet HYCCARE portent sur 13 bassins versants bourguignons. Mon étude porte sur la modélisation de l'évolution du remplissage de la réserve utile uniquement sur le bassin versant de l'Arroux à Dracy Saint Loup (en rouge dans le tableau 1).

#### ✓ Choix du modèle de simulation.

Le choix du modèle a donné lieu à un travail de mémoire de Master I en 2013 (Vallon, 2013). Deux modèles étaient alors en concurrence.

- Le modèle STICS (Simulateur mulTidisciplinaire pour les Cultures Standard).
- Le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool).



La principale caractéristique du modèle STICS, développé par l'INRA, est qu'il fonctionne à l'échelle de la parcelle. STICS a besoin de nombreux paramètres d'entrée concernant les plantes en présence sur le sol. De ce fait, il est avant tout un modèle agronomique qui ne prend en compte que partiellement l'hydraulique. Il ne modélise que le drainage vertical. Le drainage horizontal est certes utilisé pour quantifier la lame d'eau évacuée sur la parcelle voisine, mais cette valeur ne peut être réutilisée pour des calculs sur d'autres parcelles adjacentes. Cette prise en compte restreinte de l'hydrologie à grande échelle entraîne une mise en œuvre difficile de ce modèle pour notre problématique sur l'évolution de la réserve utile sur un bassin versant en fonction, entre autres, des conditions climatiques. Toutefois, STICS a l'avantage d'être un modèle français qui possède une importante communauté de travail. On aurait pu décider de coupler STICS à un modèle hydraulique toutefois la démarche de modélisation aurait été d'autant plus complexe.

SWAT est un modèle développé par le Département Américain de l'Agriculture. Beaucoup de supports sont en anglais, ce qui rend ce modèle moins accessible (problème de vocabulaire spécifique entre autre). En revanche SWAT fonctionne à l'échelle du bassin versant dans son ensemble et est avant tout un outil de prédiction hydrodynamique. De plus, SWAT possède une interface couplée à ArcGis sous le nom d'ArcSWAT. Cette possibilité de spatialiser les entrées est un atout supplémentaire dans la facilité de compréhension et de fonctionnement du modèle. Ce logiciel prend en compte le drainage horizontal et vertical. Il possède des paramètres simplifiés pour caractériser les cultures occupant le sol sans pour autant en diminuer la pertinence scientifique. Enfin, en cas d'absence de données, ArcSWAT a de nombreux paramètres par défaut renseignés dans sa base.

En résumé, STICS est un modèle agronomique qui va simuler le bilan hydrique, alors qu'ArcSWAT est un modèle de transfert hydrique dans lequel on va entrer des paramètres agronomiques.

Dans le cadre du projet HYCCARE, ArcSWAT est plus adapté pour l'étude du bilan hydrique au niveau du bassin versant. De plus, au niveau scientifique, les données générées par cette étude ainsi que les outils utilisés pourront être transférés à l'ensemble du projet HYCCARE. Ces connaissances sur ArcSWAT seront également réinvesties dans une thèse qui s'appuie sur le projet HYCCARE.

### **1.3. Problématique.**

Une des caractéristiques les plus pertinentes pour évaluer la disponibilité en eau des sols est la Réserve Utile. Le niveau de remplissage de cette réserve impacte directement les potentialités agronomiques des sols et influe donc sur les rendements économiques des entreprises agricoles. En Bourgogne, les emplois en agriculture représentent 5% environ des emplois régionaux (données Agreste, 2013). De plus, 90% des terres bourguignonnes ont une vocation de productions agricoles (prairies, cultures, forêts...). Dans ce contexte, anticiper la dynamique d'évolution de la ressource en eau à l'échelle des parcelles en fonction du changement climatique est donc un enjeu important pour adapter l'activité agricole et donc économique de la région Bourgogne.

Cependant, afin de mener à bien cette étude, et compte tenu des enjeux importants qui y sont liés, nous avons vu qu'il était nécessaire dans un premier temps d'identifier des bassins versants représentatifs de la Bourgogne aux niveaux hydrologique, agricole et géologique. De plus, nous devons disposer pour ces bassins-versants de données suffisantes pour faire fonctionner le modèle de simulation ArcSWAT.



**Au regard de l'ensemble de ces éléments de contexte, mon travail s'est articulé autour de la question suivante : comment créer un bassin-versant virtuel dont le comportement hydraulique sera aussi proche que possible de celui du bassin-versant réel afin de modéliser le remplissage de la Réserve Utile des sols via ArcSWAT dans une situation de changement climatique ?**

## 2. Etat de l'art.

L'étude du bilan hydrique est un des enjeux principaux du projet HYCCARE. Il s'agit d'une notion regroupant de nombreux paramètres dont la compréhension est nécessaire pour justifier le choix de l'étude du remplissage de la Réserve Utile. Aussi, nous allons définir ce qu'est le bilan hydrique, son mode de calcul et les différents paramètres qui le composent.

### 2.1. Le bilan hydrique.

Le bilan hydrique est la différence entre les apports et les pertes d'eau dans le sol. Plus précisément, il permet de déterminer les échanges entre l'atmosphère et le système sol-végétation. Ce bilan est très important au niveau agronomique, car il évalue les variations des réserves d'eau disponibles dans le sol pour les plantes. En effet, le sol, en fonction de sa texture et de sa structure, possède la capacité de stocker l'eau et de la restituer aux végétaux. L'ensemble de ces échanges, entre l'atmosphère, le sol et la plante, se produit sous la forme de flux.

A la surface du sol, les apports d'eau sont réalisés par les précipitations. Une partie de cet apport va pénétrer dans le sol par infiltration, une autre va ruisseler en fonction de la pente. L'eau va également retourner dans l'atmosphère sous forme gazeuse par évaporation si le processus se réalise depuis le sol ou par transpiration si c'est depuis les plantes. C'est le phénomène d'évapotranspiration. Enfin, la limite inférieure du sol, en fonction de son degré de saturation, pourra être soumise à des pertes par drainage vers la nappe phréatique ou, à contrario, à des apports par des remontées capillaires de nappes. Le bilan hydrique constitue donc une synthèse de l'ensemble des échanges décrits précédemment. Il se formalise par une équation, valable pour un profil de sol  $\lambda$  ayant un couvert végétal N :

$$P - ETR = R + \Delta S + Dr - Rc \quad (\text{Equation 1})$$

Où P sont les précipitations, ETR est l'évapotranspiration réelle, R est le Ruissellement,  $\Delta S$  la variation de stock de la réserve utile, Dr le drainage, et Rc les remontées capillaires. L'ensemble des paramètres sont exprimées en mm reçus entre deux dates.

La figure 2 illustre l'équation 1 par une représentation spatiale du bilan hydrique.

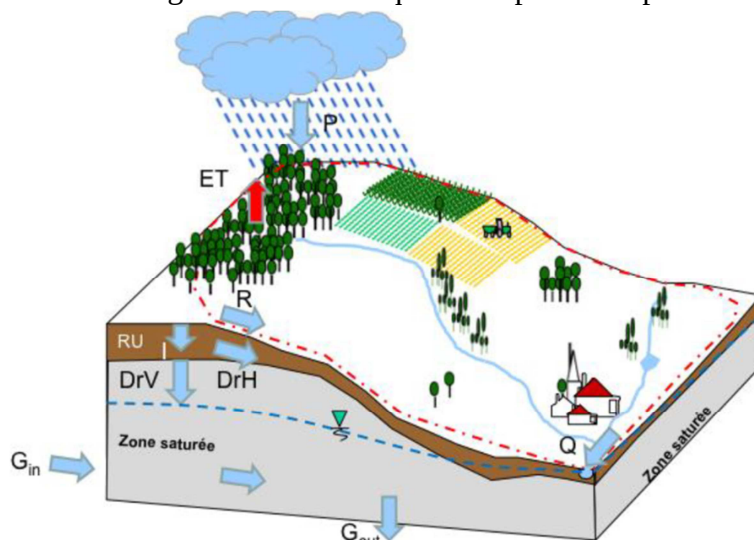


*Figure 2 : Représentation spatiale du bilan hydrique (source: Bilan mi-parcours HYCCARE, 2014)*



Ainsi, le bilan hydrique est composé de plusieurs paramètres que nous allons maintenant détailler. Parmi eux, le taux de remplissage de la Réserve Utile (variation du stock d'eau), sera analysée plus finement et nous montrerons pourquoi il est intéressant dans notre étude de s'intéresser à ce taux comme un des indicateurs du potentiel agronomique des sols.

## 2.2. Les paramètres de l'équation du bilan hydrique.

### 2.2.1. Précipitation, infiltration, ruissellement, drainage.

L'eau apportée au sol en surface peut avoir une origine naturelle (pluie) ou une origine artificielle (irrigation). Dans les deux cas, une partie de cet apport ruisselle à la surface du sol alors qu'une autre partie s'infiltre dans le sol. L'infiltration est très influencée par les caractéristiques physiques du sol (texture, structure) mais aussi par les caractéristiques hydrodynamiques. En effet, le transport de l'eau varie selon que le sol est saturé ou non en eau. Un sol saturé aura la totalité de ses pores remplie d'eau. A contrario, un sol non saturé se caractérisera par des pores partiellement remplies. Ainsi, à chacune de ces modalités correspond un régime hydrodynamique particulier (tableau 2) (Calvet, 2013).

D'autres facteurs peuvent avoir leur influence comme les conditions initiales et le débit d'alimentation (état des sols et quantité d'eau arrivée à la surface du sol). Toutefois la capacité d'absorption en eau du sol est limitée. La capacité d'infiltration est le flux maximal qu'un sol est capable d'absorber. Une fois cette limite atteinte, lorsque le régime d'alimentation est supérieur à la capacité d'infiltration, l'eau ruisselle ou stagne sous forme de flaque au-dessus de la surface (Musy, 1991). Ce phénomène peut se produire si les précipitations sont trop abondantes ou si des remontées de nappes se produisent (la surface libre de la nappe atteint la surface du sol) (Weill, 2004). Ainsi, lorsqu'un sol est saturé, deux phénomènes peuvent se produire :

- ✓ Le ruissellement de l'eau à la surface, qui est fonction de l'importance de la pente et des caractéristiques physiques du sol.
- ✓ Le drainage qui est un écoulement horizontal ou vertical qui se réalise grâce à la gravité entre les pores les plus grosses du sol.

| Régimes hydrodynamiques        | Définitions                                                                                              | Intérêts / conséquences                                                                               |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Sols saturés en eau</b>     |                                                                                                          |                                                                                                       |
| Drainage                       | Ecoulement généralement vertical de l'eau                                                                | - Assainissement des sols<br>- Pollution eaux souterraines                                            |
| Ruissellement de surface       | Ecoulement de l'eau à la surface du sol quand elle ne peut pas y pénétrer ou qu'elle y pénètre très peu. | - Perte d'eau<br>- Pollution eaux de surface                                                          |
| <b>Sols non saturés en eau</b> |                                                                                                          |                                                                                                       |
| Infiltration                   | Pénétration de l'eau dans le sol apportée par des précipitations ou l'irrigation                         | - Reconstitutions des réserves en eau du sol<br>- Transferts des polluants vers les eaux souterraines |
| Redistribution                 | Répartition de l'eau dans le sol sans apport et sans évaporation                                         | - Uniformisation des eaux du sol<br>- Transferts des polluants                                        |
| Dessèchement                   | Transport de l'eau en phase liquide et gazeuse sous l'effet de l'évapotranspiration                      | - Pertes d'eau<br>- Mouvement ascendant des sels minéraux (chlorures, sulfates)                       |

Tableau 2 : Les différents régimes hydrodynamiques des sols saturés et non saturés en eau (Calvet, 2013).



## 2.2.2. Variation du stock d'eau : réserve utile et évapotranspiration.

### 2.2.2.1. La réserve utile.

La réserve utile désigne la quantité d'eau disponible pour un couvert végétal. Elle participe donc directement à quantifier le stock d'eau disponible pour les plantes. C'est un des paramètres qui permet d'estimer le potentiel agronomique d'un sol.

Lorsque la RU est vide, les forces de succion des racines sont inférieures aux forces de rétention d'eau à l'intérieur des pores du sol, la plante ne peut plus puiser d'eau : c'est le point de flétrissement permanent. Inversement, lorsque le taux de remplissage de la RU est à 100%, l'eau est présente en grande quantité dans le sol : on atteint la capacité au champ. Enfin lorsque le sol est saturé en eau, que la totalité des pores du sol sont remplies d'eau et qu'il n'y a plus d'air, le taux de remplissage de la RU peut dépasser 100% pour atteindre 110 -120% en fonction des types de sol. Plus aucune molécule d'eau ne peut pénétrer dans le sol. L'eau stagne en surface ou ruisselle. La réserve utile est donc une grandeur en millimètre qui varie constamment en fonction de la teneur en eau du sol, pouvant même dépasser sa valeur maximale en cas de sol saturé en eau. Cette grandeur peut être calculée par l'équation suivante (Beauchamp, 2006) :

$$RU = \frac{(H_{cc} - H_{pfp})}{100} * h * Da \quad (\text{Equation 2})$$

Où RU est la Réserve Utile en mm, H<sub>cc</sub> est l'humidité à la capacité au champ en pourcentage de poids, H<sub>pfp</sub> est l'humidité au point de flétrissement en pourcentage de poids, h est l'épaisseur de l'horizon en mm et Da la densité apparente en g.cm<sup>-3</sup>.

On distingue généralement deux compartiments dans la réserve utile : la Réserve Facilement Utilisable (RFU) et la Réserve de Survie (RS), qui est utilisée par la plante lorsque cette dernière est en manque d'eau. Au-delà de la RS, le point de flétrissement permanent est atteint. La RFU est comprise, en fonction du type de sol, entre 30 et 60% de la RU (Duchaufour, 2000).

Le remplissage de la RU varie au fil des saisons en zone tempérée. Elle diminue progressivement pendant la période végétative à cause des plantes qui y puisent l'eau nécessaire à leur croissance. Elle se reconstruit en période hivernale du fait de l'arrêt de l'activité végétale. Lorsque la capacité maximale de la RU est atteinte, le surplus d'eau est drainé. Le remplissage de la RU est donc très dépendant des précipitations, de l'évaporation et de la transpiration. L'étude du taux de remplissage de la réserve utile permet donc de prendre en considération le climat par l'intermédiaire de l'évaporation mais aussi l'activité végétale. Une hausse des températures, une modification de la durée et de la quantité des précipitations pourraient dérégler le processus de vidange / recharge de la RU et par conséquent faire varier le potentiel agronomique des sols et impacter directement le type de culture mis en place. L'évolution de la réserve utile nous permet donc d'en étudier à la fois les causes (le changement climatique) et les conséquences (changement d'occupation du sol). Or, les conséquences d'une modification de l'implantation des espèces végétales présentes auront un impact économique fort. Particulièrement en Bourgogne qui est une région ayant une grande part de surface agricole en grandes cultures. La production forestière, notamment dans le Morvan, est également une filière importante pour l'économie régionale. Elle représente 6.5% de la production nationale (bois d'œuvre, d'industrie et d'énergie – source Agreste, 2013) et 7% de la main d'œuvre nationale de ce secteur d'activité. Ainsi, modifier l'implantation des grandes cultures céréalières ou celles des forêts et des essences d'arbre à cause du changement climatiques pourraient avoir de grandes conséquences socio-économiques sur la Bourgogne. En effet, Sergent *et al.* précise en 2012 que les peuplements de Douglas sont



modification du bilan hydrique. Pour l'ensemble de ces raisons, modéliser le bilan hydrique, et plus spécifiquement la réserve utile, est très intéressant pour anticiper les adaptations que nous devrons réaliser en fonction de l'intensité du changement climatique.

### 2.2.2.2. *L'évapotranspiration.*

L'évapotranspiration est la combinaison de l'évaporation et de la transpiration. L'évaporation est le passage de l'eau en phase gazeuse à la surface du sol. Cette transformation est principalement générée par l'énergie solaire reçue par une faible épaisseur de la surface du sol. La transpiration est liée à l'activité chlorophyllienne de la plante. La plante va capter l'eau du sol grâce à la succion de son système racinaire. Les molécules d'eau vont monter jusqu'aux feuilles permettant ainsi la circulation de la sève brute qui sera ensuite transformée en sève élaborée puis redistribuée aux différentes cellules du végétal. Dans les feuilles, les molécules d'eau seront les apporteurs d'électrons, éléments nécessaires au fonctionnement de la photosynthèse à l'intérieur des chloroplastes. Elles seront ensuite évacuées sous forme gazeuse par les stomates des feuilles. L'eau est donc un élément essentiel pour le fonctionnement de la plante. La quantité d'eau transpirée est fonction de la météorologie, de la disponibilité en eau et de la physiologie de la plante.

L'évapotranspiration (évaporation + transpiration) fait donc diminuer le stock d'eau du sol. Elle constitue des pertes pour le bilan hydrique. La quantité d'eau ainsi émise par évapotranspiration dépend de plusieurs facteurs :

- ✓ La culture considérée.
- ✓ Son stade phénologique.
- ✓ Les conditions météorologiques.
- ✓ La quantité d'eau disponible dans le sol.

On distingue trois types d'évapotranspiration :

**L'EvapoTranspiration Potentielle (ETP)** est une valeur de référence. Il s'agit de la quantité d'eau évaporée par un gazon en pleine croissance, fauché régulièrement ayant un apport en eau et en éléments nutritionnels permettant de couvrir les besoins de la plante. L'ETP ne dépend donc que des conditions climatiques (rayonnement solaire, vitesse du vent, humidité de l'atmosphère) car tous les autres facteurs sont fixés (type de couvert végétal, stade phénologique, apport d'eau).

**L'EvapoTranspiration Maximale (ETM)** est la quantité d'eau émise par un type de culture spécifié, un climat donné et dans des conditions d'alimentation hydrique optimale. Sa valeur dépend donc du stade de développement du couvert végétal et des conditions météorologiques. Elle correspond aux besoins en eau de la culture et est calculée en corrigeant l'ETP par un coefficient cultural nommé  $k_c$ . Ce coefficient compris entre 0 et 1 est propre à chaque culture et varie en fonction du stade phénologique de la plante. Ainsi l'ETM se calcule selon la formule (Musy, 1991) :

$$ETM = k_c * ETP$$

(Equation 3)

**L'EvapoTranspiration Réelle (ETR)** désigne la quantité d'eau réellement émise par un couvert végétal. Elle est donc fortement corrélée par les conditions climatiques, le type de culture et son stade de développement. En conditions normales, les flux entrants et sortants de la plante s'équilibrent. Mais lorsque la disponibilité en eau du sol diminue, la transpiration devient supérieure à l'absorption d'eau par les racines et la plante entre en état de stress hydrique (Duchaufour, 2000). Un coefficient de stress hydrique a été créé par les agronomes en calculant le ratio :



$$k_s = \frac{ETR}{ETM} \quad (\text{Equation 4})$$

L'ETR dépend donc de l'ETM et du coefficient de stress hydrique. En effet :

$$ETR = k_s * k_c * ETP \quad (\text{Equation 5})$$

Précipitations, évapotranspiration, réserve utile, ruissellement sont autant de paramètres qui seront implémentés ou calculés dans le modèle SWAT. Leurs descriptions et la place qu'ils occupent dans l'équation du bilan hydrique étaient donc importantes pour mieux appréhender l'organisation des données dans SWAT. Nous allons présenter dans la partie suivante le modèle de simulation, les données nécessaires à son fonctionnement et la méthode avec laquelle nous avons généré ces données à entrer dans le modèle.

### 3. Modèle et Matériels.

#### 3.1. Le modèle SWAT.

SWAT est l'acronyme de Soil and Water Assessment Tool. Il est un modèle hydrologique conçu et développé par des chercheurs américains de l'USDA. Il permet donc de simuler l'évolution du bilan hydrologique du bassin versant tant au niveau qualitatif (pollutions diffuses...) que quantitatif (débit des cours d'eau).

##### 3.1.1. Présentation générale.

SWAT est un modèle agro-hydrologique car ses variables d'entrée et de sortie ont souvent une origine agronomique. Ainsi, l'occupation des terres, la composition des sols, les variations climatiques sont quelques-uns des paramètres pris en compte. Les bassins utilisés dans les calculs peuvent avoir une superficie de quelques centaines de km<sup>2</sup> à plusieurs milliers de km<sup>2</sup>. SWAT est considéré comme un modèle continu, semi distribué et semi physique :

Continu, car il fonctionne à un pas de temps journalier. Il est optimal pour simuler ses paramètres sur de longues périodes. En revanche, il est moins efficace pour des événements ponctuels ou ayant un caractère atypique.

Il est semi-distribué car certains composants du modèle sont globalisés alors que d'autres sont spatialisés et tiennent compte de la variabilité géographique du bassin versant étudié.

Enfin, il est semi-physique car son fonctionnement n'est pas entièrement réalisé à partir de lois physiques reconnues même si elles sont très présentes dans le modèle. Certaines de ses équations sont empiriques notamment celles calculant le ruissellement par la méthode du Curve Number (Lacroix *et al.*, 2005).

Le bilan hydrologique du bassin-versant est calculé en deux temps par le modèle, lors d'une phase dite terrestre du cycle hydrologique puis lors d'une phase de fonctionnement du cycle hydrologique.

Le modèle SWAT utilise une imbrication d'échelles spatiales dont l'unité spatiale élémentaire est appelée HRU (Hydrologie Response Unit ou Unité de Réponse Hydrologique). Le concept est qu'en tout point d'une HRU, une molécule d'eau se comporte de la même manière et soit soumis aux mêmes contraintes. Les HRU sont définis par juxtaposition du réseau hydrologique du bassin-versant, de la topographie (obtenu par le MNT), de l'occupation du sol, du type de sol (figure 3). Des fonctions de transferts (figure 4), permettent ensuite dans SWAT d'accéder au bilan hydrique de chaque sous bassin présent dans le bassin-versant. La présence d'un cours d'eau et de son exutoire délimite un sous bassin. Enfin, une fonction de transfert permet l'évaluation du bilan hydrique à l'échelle



globale du bassin. La méthode et les choix opérés pour délimiter ces HRU et contraindre leur nombre sont précisés dans la partie 4.

Figure 3 : Méthode de création des HRU dans SWAT (Ruelland et al ,2004)

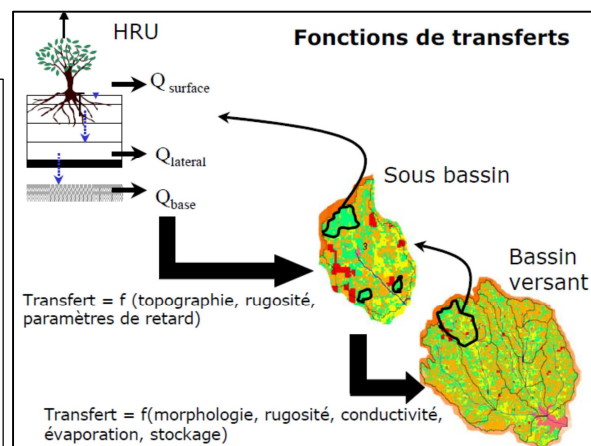
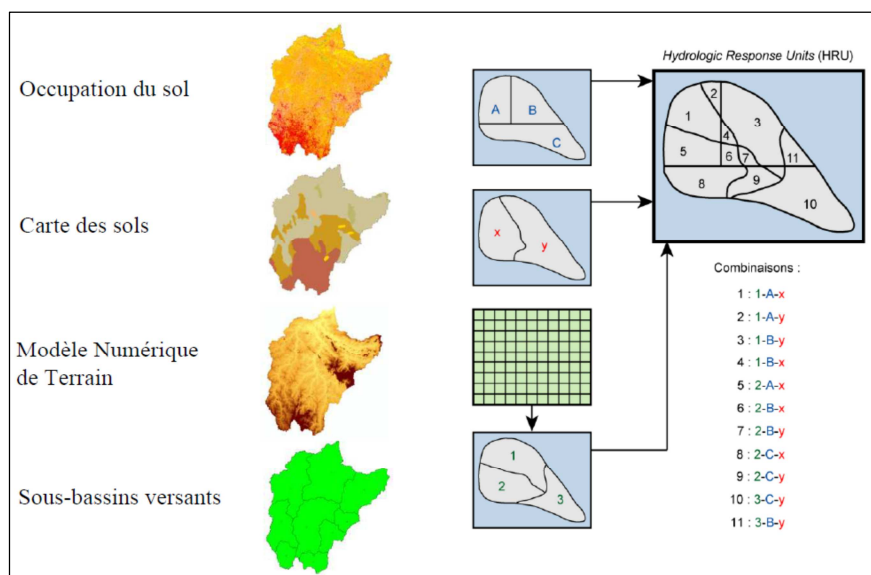


Figure 4 : Schématisation des fonctions de transferts de SWAT (Chaponnière, 2005).

SWAT possède également un module graphique sous ArcGis nommé ArcSWAT. Ce module permet de spatialiser les différents éléments nécessaires au modèle pour fonctionner. Notre étude s'appuie uniquement sur le paramétrage d'ArcSwat et sur l'analyse des variables en sortie de ce modèle. Il n'est donc pas nécessaire d'avoir le logiciel SWAT car ArcSWAT fonctionne selon les mêmes processus que SWAT avec une partie géographique en plus. Seuls une version d'ArcGIS et du module ArcSwat doivent être installés sur l'ordinateur. L'installation de ces deux outils informatiques ne sera pas appréhender dans le présent rapport, car cette procédure ne représente pas de difficulté particulière, outre une certaine habitude dans l'utilisation des outils informatiques.

Le paramétrage d'ArcSWAT se fait en implémentant trois types de données dans le logiciel :

- ✓ Des données hydrologiques
- ✓ Des données relatives au sol (pédologie, occupation et topographie)
- ✓ Des données relatives au climat.

Ces données doivent être créées et adaptées en fonction de la zone d'étude. Or, rappelons que le modèle ArcSWAT est développé par des chercheurs américains. De ce fait, toutes les données présentes par défaut dans la base de données du modèle concernent des sols ou des climats d'Outre-Atlantique. Cette précision est très importante, car elle va impliquer un temps de travail conséquent dans l'adaptation de la base de données native d'ArcSWAT à une application bourguignonne de la modélisation.

### 3.1.2. Présentation des données hydrologiques du modèle.

On accède à l'interface permettant de générer ces données par la barre d'outils ArcSWAT, menu WaterShed Delineator (figure 5).



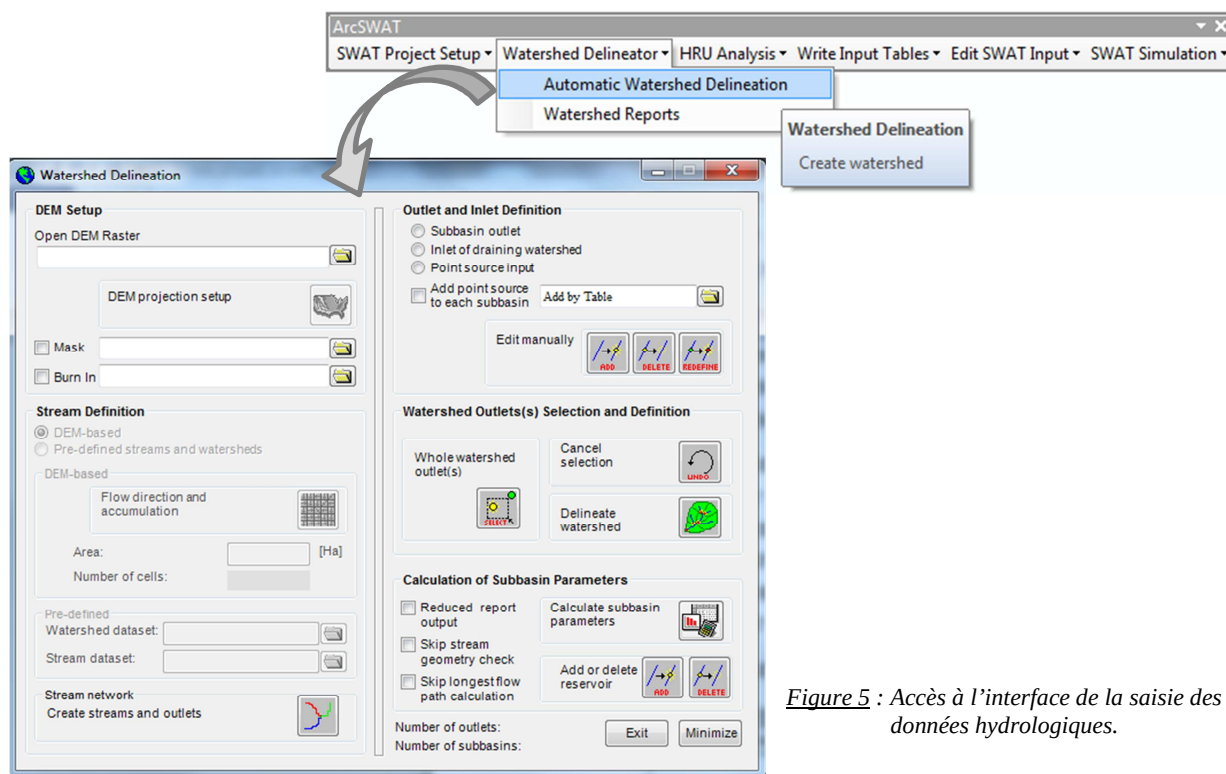


Figure 5 : Accès à l'interface de la saisie des données hydrologiques.

Ces données ne présentent pas de difficultés particulières. Cette étape permet de définir la délimitation des sous-bassins versants et donc par conséquent les différents exutoires des cours d'eau présents dans la zone d'étude.

En s'appuyant sur le Modèle Numérique de Terrain, que nous devons fournir au logiciel, nous allons consécutivement :

- ✓ Définir le bassin versant
- ✓ Remplir artificiellement toutes les dépressions présentes dans les cours d'eau. (a préciser)
- ✓ Créer l'ensemble des chenaux présents dans la zone étudiée. Pour un Système d'Information Géographique, un chenal est un fond de vallée dans laquelle ne s'écoule pas forcément de l'eau.
- ✓ Créer le réseau hydrographique du bassin versant en effectuant 2 sous opérations à savoir :
  - La définition de la taille (en hectare) des sous bassins versant désirés. Cette opération va influencer la finesse du réseau hydrographique à créer.
  - La sélection de l'ensemble des chenaux dans lequel passe un cours d'eau et permettant de créer des sous bassins-versants de la taille définie précédemment. Donc, plus les sous bassins-versants seront petits, plus le réseau hydrographique sera fin.
- ✓ Créer les exutoires de tous les cours d'eau du réseau hydrologique. Ces points sont définis automatiquement mais peuvent être modifiés (ajout, suppression, déplacement) par la suite
- ✓ Créer les exutoires des sous bassins-versants
- ✓ Créer les paramètres hydrologiques de tous les sous bassins-versants.
- ✓ Exporter l'ensemble des cartes « rasters » créées au cours de cette étape vers un dossier précis :RasterStore.

Ainsi, la création des données hydrologiques du bassin versant peut être personnalisée principalement aux niveaux de la taille des sous bassins-versants et des exutoires.



### 3.1.3. Présentation des données liées au sol : création des HRU.

Les données pédologiques sont plus longues à créer. En effet, il va falloir compléter la table « usersoil » de la base de données d'ArcSWAT (nommée SWAT2012.mdb). Ce travail est obligatoire pour pouvoir caractériser correctement les sols bourguignons. Ces caractéristiques seront utilisées dans les différentes équations d'ArcSWAT pour la modélisation. De la qualité de ces données dépendra la fiabilité des variables en sortie de modèle. Ces données liées au sol sont générées en quatre temps et serviront à créer les HRU.

- Création des cartes d'occupation du sol et pédologique sous ArcGis au format shape.
- Identification des principales occupations du sol, des classes des pentes majoritaires et des principaux types de sol présents sur la zone d'étude.
- Regroupement des caractéristiques pédologiques relatives aux différents types de sols afin de compléter la base access SWAT2012 (format mldb) servant à la modélisation sous ArcSWAT.

Les données pédologiques à renseigner dans la table usersoil de la base de données SWAT2012.mdb sont résumées dans le tableau 3.

| Nom de la variable                          | Description variable                                                                  | Unité               | Origine des données     |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------------|
| <b>SOL</b>                                  |                                                                                       |                     |                         |
| SNAM                                        | Nom du type de sol                                                                    | sans unité          | Libre                   |
| NLAYERS                                     | Nombre de couches                                                                     | sans unité          | DoneSol v3              |
| HYDGRP                                      | Groupe hydrologique                                                                   | sans unité          | DoneSol v3              |
| SOL_ZMX                                     | Profondeur racinaire maximum du sol                                                   | mm                  | Somme de SOL_Z          |
| ANION_EXCL                                  | Fraction de la porosité pour laquelle les anions sont exclus                          | sans unité          | Valeur par défaut (0.5) |
| SOL_CRK                                     | Volume des craquelures (potentiel ou maximum) du sol en fraction du volume totale sol | sans unité          | Valeur par défaut (0)   |
| TEXTURE                                     | Texture du sol                                                                        | sans unité          | Valeur par défaut (0)   |
| <b>Pour chaque HORIZON du sol considéré</b> |                                                                                       |                     |                         |
| SOL_Z                                       | Profondeur de la couche (de la surface au fond de la couche)                          | m                   | DoneSol v3              |
| SOL_BD                                      | Densité apparente humide                                                              | g/cm3               | Equations 7 et 8        |
| SOL_AW                                      | Disponibilité en eau de la couche                                                     | mm H2O/mm sol       | Base RU                 |
| SOL_CBN                                     | Teneur en carbone organique                                                           | % en masse          | Equation 11             |
| SOL_K                                       | Conductivité hydraulique à la saturation                                              | mm H2O /heure       | Equation 9              |
| CLAY                                        | Quantité d'argile contenue dans la couche                                             | % en masse          | DoneSol v3              |
| SILT                                        | Quantité de limon contenue dans la couche                                             | % en masse          | DoneSol v3              |
| SAND                                        | Quantité de sable contenue dans la couche                                             | % en masse          | DoneSol v3              |
| ROCK                                        | Quantité de fragments rocheux contenus dans la couche                                 | % en masse          | DoneSol v3              |
| SOL_ALB                                     | Albédo du sol humide                                                                  | Nombre entre 0 et 1 | Equation 10             |
| USLE_K                                      | Facteur d'érodibilité du sol                                                          | sans unité          | Equations 12 à 16       |
| SOL_EC                                      | Conductivité électrique du sol                                                        | dS/m                | Valeur par défaut (0)   |
| SOL_CALC                                    | Teneur en calcaire de l'horizon                                                       | %                   | DoneSol v3              |
| SOL_PH                                      | Teneur en pH de l'horizon                                                             | sans unité          | DoneSol v3              |

*Tableau 3 : Récapitulatif des données pédologiques à entrer dans le modèle.*



- Implémentation dans ArcSWAT des caractéristiques liées au sol (occupation, pédologie et classes des pentes) pour générer les HRU. Cette procédure se fait par le menu « HRU Analysis » de la barre d'outils ArcSWAT (figure 6).

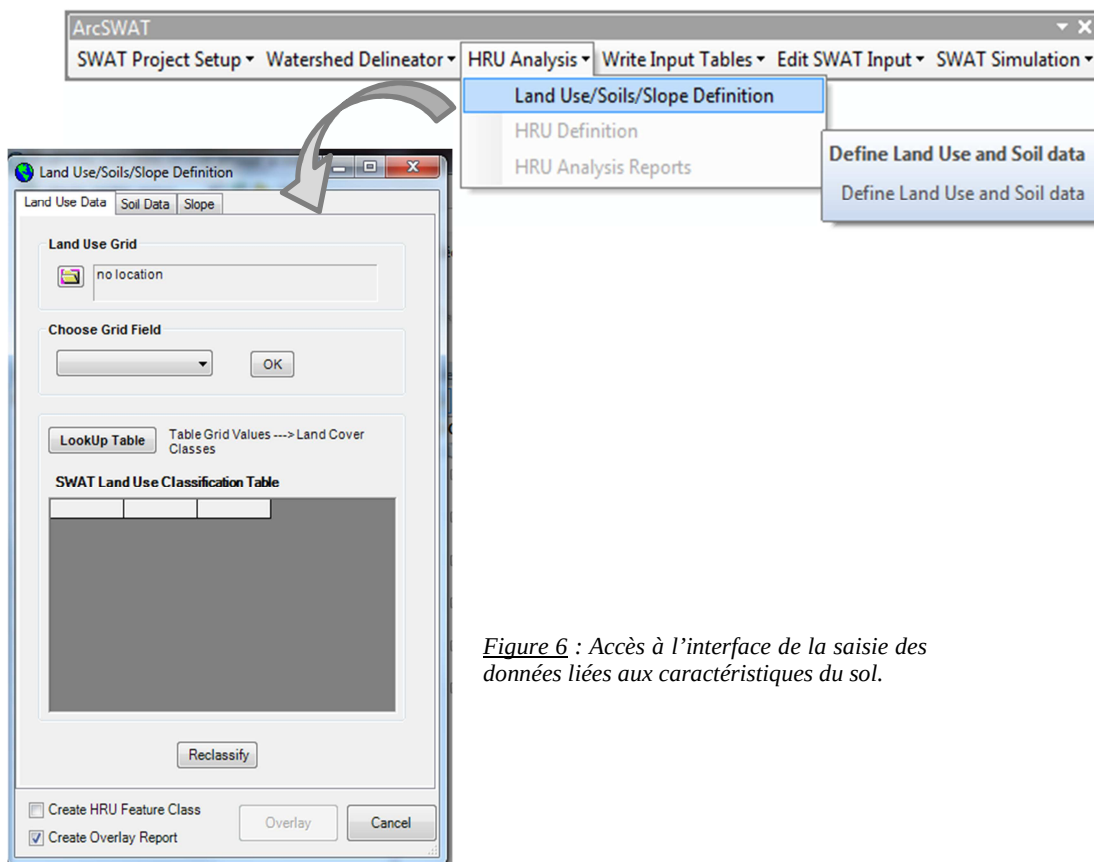


Figure 6 : Accès à l'interface de la saisie des données liées aux caractéristiques du sol.

### 3.1.4. Présentation des données climatiques.

La dernière étape avant de pouvoir faire fonctionner le modèle consiste à fournir des données climatiques. Celles-ci sont récoltées sur des stations météorologiques pour lesquelles nous devons renseigner des données de localisation et statistiques. Ces informations sont entrées par le menu WriteInput table de la barre d'outils ArcSWAT (figure 7).

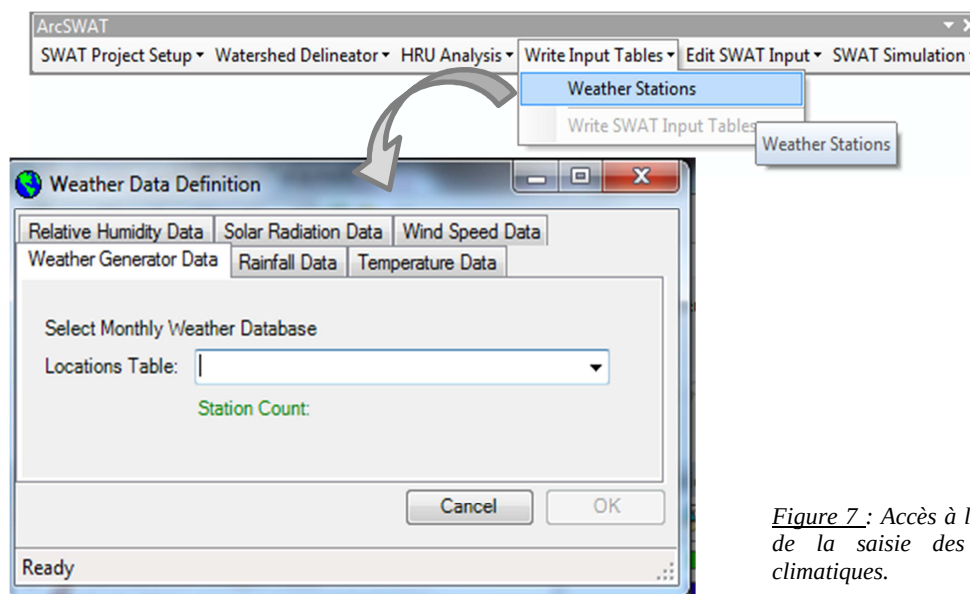


Figure 7 : Accès à l'interface de la saisie des données climatiques.



Elles sont de 6 catégories différentes :

- ✓ Données climatiques statistiques (Weather Generator Data).
- ✓ Températures maximales et minimales.
- ✓ Pluviométrie.
- ✓ Radiation solaire.
- ✓ Vitesse du vent.
- ✓ Humidité relative.

Seul le fichier de données statistiques (Weather Generator Data) est obligatoire, les 5 autres catégories sont facultatives et peuvent être générées par ArcSWAT. Cependant, le projet HYCCARE étant composé d'une équipe de climatologues, nous avons à notre disposition ces catégories de données pour l'ensemble de la région Bourgogne. Pour les 5 catégories de données facultatives, nous renseignerons donc des valeurs réelles et non simulées par le modèle.

**1<sup>er</sup> catégorie de données** : Fichier de données climatiques statistiques (Weather Generator Data).

Ce fichier au format tableur (Calc, Excel...) permettra de renseigner dans la base de données SWAT2012.mbd (au même titre que pour les données liées au sol) la table WGEN\_user. Cette table contient pour chaque station météorologique les informations suivantes :

Des données de localisation.

- ✓ STATION : nom de la station
- ✓ WLATITUDE : coordonnée de la latitude en degré de la station
- ✓ WLONGITUDE : coordonnée de la longitude en degré de la station
- ✓ RAIN\_YRS : nombre d'année servant à définir les valeurs des précipitations mensuelles maximum durant 30 minutes (RAIN\_HHMX(1) – RAIN\_HHMX(12) )

Des données climatiques mensuelles.

Il s'agit de calculer pour chacun des mois de l'année des moyennes, des écarts types et des probabilités en fonction de l'ensemble des données mensuelles de la période étudiée.

*Exemple* : pour la moyenne journalière de la température maximale journalière du mois de janvier, on prendra l'ensemble des valeurs des mois de janvier de la période étudiée et on calculera la moyenne.

Ainsi, la formule sera :

$$\mu T M P M X_{janv} = \frac{\sum_{j=1}^N T_{max, janv}}{N} \quad (\text{Equation 6})$$

Où : -  $\mu T M P M X_{janv}$  est la moyenne journalière des températures maximum journalières de tous les mois de janvier de la période étudiée.

-  $T_{max}$  est la température journalière maximum au jour j au mois de janvier

- N est le nombre total d'enregistrements des températures maximum journalières (en théorie, 31x nombre de mois de janvier dans la période).

Il sera fait la même procédure pour les mois de février, mars,..., décembre.

L'ensemble des données climatiques mensuelles demandé est présentée dans le tableau 4.



| Nom du champ      | Description                                                                           |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| TMPMX $\alpha$    | Moyenne de la température maximale journalière des mois $\alpha$                      |
| TMPMN $\alpha$    | Moyenne de la température minimale journalière des mois $\alpha$                      |
| TMPSTDM $\alpha$  | Ecart type des températures maximales journalières pour les mois $\alpha$             |
| TMPSTDMN $\alpha$ | Ecart type des températures minimales journalières pour les mois $\alpha$             |
| PCPMM $\alpha$    | Moyenne des précipitations mensuelles des mois $\alpha$ .                             |
| PCPSTD $\alpha$   | Ecart type des précipitations journalières des mois $\alpha$ .                        |
| PCPSKW $\alpha$   | Coefficient d'asymétrie pour les précipitations journalières des mois $\alpha$ .      |
| PR_W1 $\alpha$    | Probabilité qu'un jour humide suive un jour sec durant le mois $\alpha$ .             |
| PR_W2 $\alpha$    | Probabilité qu'un jour humide suive un jour humide durant le mois $\alpha$ .          |
| PCPD $\alpha$     | Nombre moyen de jours où des précipitations sont enregistrées durant le mois $\alpha$ |
| RAINHHMX $\alpha$ | Précipitations maximum durant 30 minutes sur tous les mois $\alpha$                   |
| SOLARAV $\alpha$  | Moyenne de l'éclairement solaire journalier pour les mois $\alpha$ .                  |
| DEWPT $\alpha$    | Moyenne de la température journalière du point de rosée pour les mois $\alpha$ .      |
| WINDAV $\alpha$   | Moyenne de la vitesse moyenne du vent pour les mois $\alpha$ .                        |

Tableau 4 : Description des champs contenus dans le fichier Weather Generator Data.

Les catégories suivantes de données comprennent deux types de fichiers :

- ✓ Un fichier relatif à l'identification des stations météorologiques.
- ✓ Des fichiers relatifs aux données des variables (un fichier par station).

**2<sup>e</sup> catégorie de données** : précipitations journalières en millimètres (mm).

- ✓ Cette catégorie comprend un fichier d'identification de toutes les stations météorologiques, nommé **pcp.txt**. Ce fichier est composé des champs décrits dans le tableau 5, séparés par une tabulation ou un point-virgule.

| Nom du champ | Description                                                                     |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| ID           | Numéro d'identification de la station                                           |
| NAME         | Nom de la station (sert de clé de correspondance avec le fichier des variables) |
| LAT          | Latitude en degré décimal                                                       |
| LONG         | Longitude en degré décimal                                                      |
| ELEVATION    | Altitude de la station en mètre                                                 |

Tableau 5 : Description des champs contenus dans les fichiers de renseignements des stations météorologiques.

- ✓ Cette catégorie comprend également des fichiers contenant l'ensemble des données de la variable étudiée (ici précipitations) pour une station. Il y a aura autant de fichiers qu'il y aura de stations. Ces fichiers sont nommés **p[nom\_de\_la\_station1].txt**, **p[nom\_de\_la\_station2].txt** etc... Ils comprennent un seul champ décrit dans le tableau 6.

| Ligne         | Format       | Description                                                          |
|---------------|--------------|----------------------------------------------------------------------|
| 1ere ligne    | aaaammjj     | Date du début de la période d'enregistrement des données climatiques |
| Autres lignes | format libre | Valeur de la variable. Chaque ligne représente un jour suivant       |

Tableau 6 : Description du contenu des fichiers textes contenant les valeurs des variables météorologiques.

L'organisation des fichiers est la même pour les catégories de données présentées ci-après.

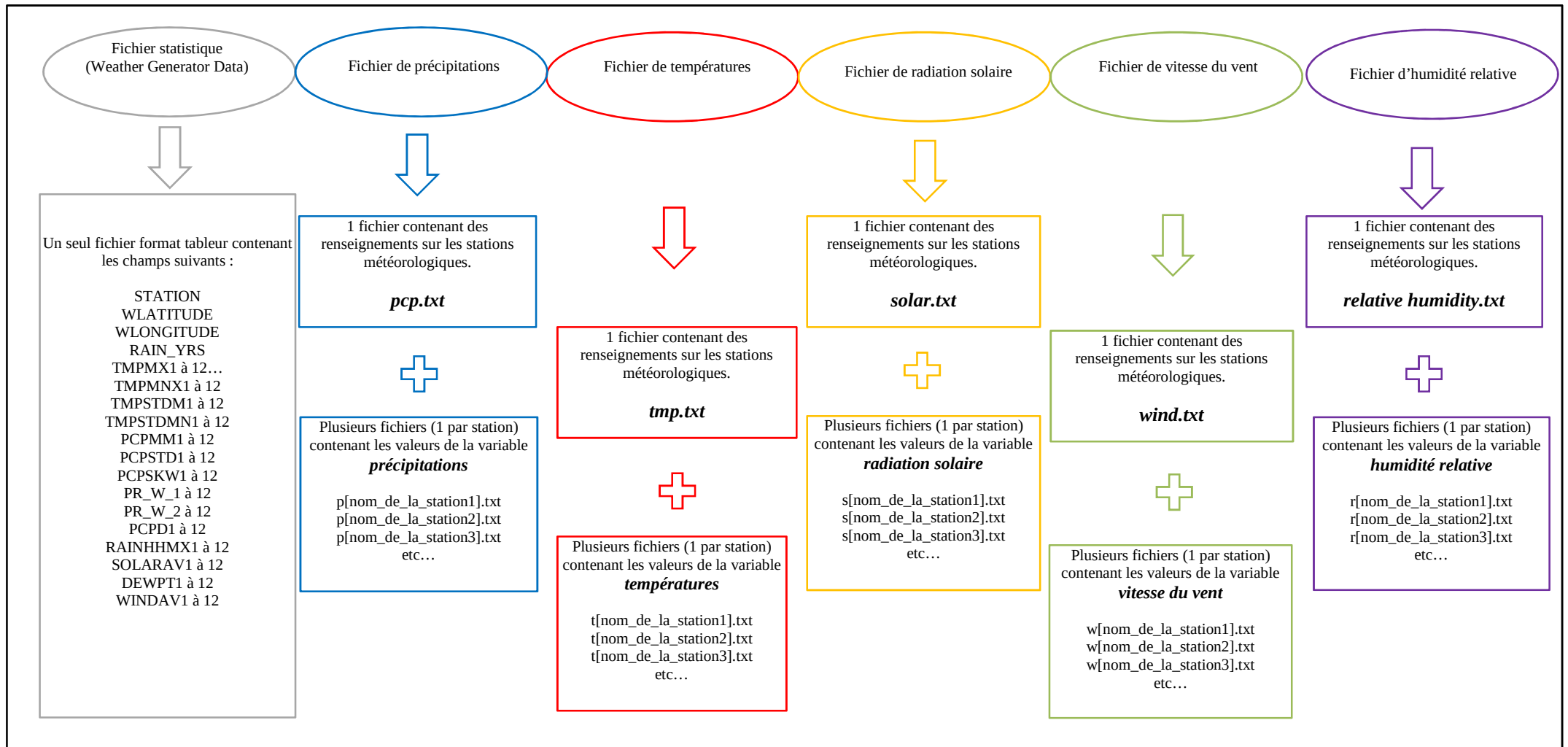


Figure 8 : Synthèse des données climatiques demandées en entrée du logiciel ArcSWAT.

**3<sup>e</sup> catégorie de données** : températures journalières maximum et minimum (°C).

Cette catégorie comprend :

- ✓ un fichier d'identification des stations nommé **tmp.txt** composé des champs décrits dans le tableau 5.
- ✓ des fichiers nommés **t[nom\_de\_la\_station1].txt**, **t[nom\_de\_la\_station2].txt** etc...comprenant les valeurs des précipitations pour chaque station comme précisé dans le tableau 6.

**4<sup>e</sup> catégorie de données** : Radiation solaire (MJ/m<sup>2</sup>/jour).

Cette catégorie comprend

- ✓ un fichier d'identification des stations nommé **solar.txt** composé des champs décrits dans le tableau 5.
- ✓ des fichiers nommés **s[nom\_de\_la\_station1].txt**, **s[nom\_de\_la\_station2].txt** etc...comprenant les valeurs des radiations solaires reçues pour chaque station comme précisé dans le tableau 6.

**5<sup>e</sup> catégorie de données** : Vitesse du vent (m/s).

Cette catégorie comprend

- ✓ un fichier d'identification des stations nommé **wind.txt** composé des champs décrits dans le tableau 5.
- ✓ des fichiers nommés **w[nom\_de\_la\_station1].txt**, **w[nom\_de\_la\_station2].txt** etc...comprenant les valeurs des vitesses du vent pour chaque station comme précisé dans le tableau 6.

**6<sup>e</sup> catégorie de données** : Humidité relative (%).

Cette catégorie comprend

- ✓ un fichier d'identification des stations nommé **relative humidity.txt** composé des champs décrits dans le tableau 5.
- ✓ des fichiers nommés **r[nom\_de\_la\_station1].txt**, **r[nom\_de\_la\_station2].txt** etc...comprenant les valeurs de l'humidité relative pour chaque station comme précisé dans le tableau 6.

Les renseignements climatiques nécessitant un grand nombre d'informations et de fichiers, nous avons réalisé ci-contre un schéma de synthèse (figure 8) afin de bien préciser les données à prendre en compte.

L'ensemble de ces données, hydrologiques, relatives au sol et climatiques, ne sont pas disponibles en l'état. Il faudra non seulement les créer à l'aide d'informations connexes, mais également vérifier si elles sont en adéquations avec la réalité du terrain. Cette vérification est très importante dans notre travail car elle justifiera des données fiables et de bonne qualité. La partie suivante apporte des détails sur la zone d'étude et des précisions sur l'origine des informations qui nous ont permis de générer les données nécessaires au modèle SWAT.

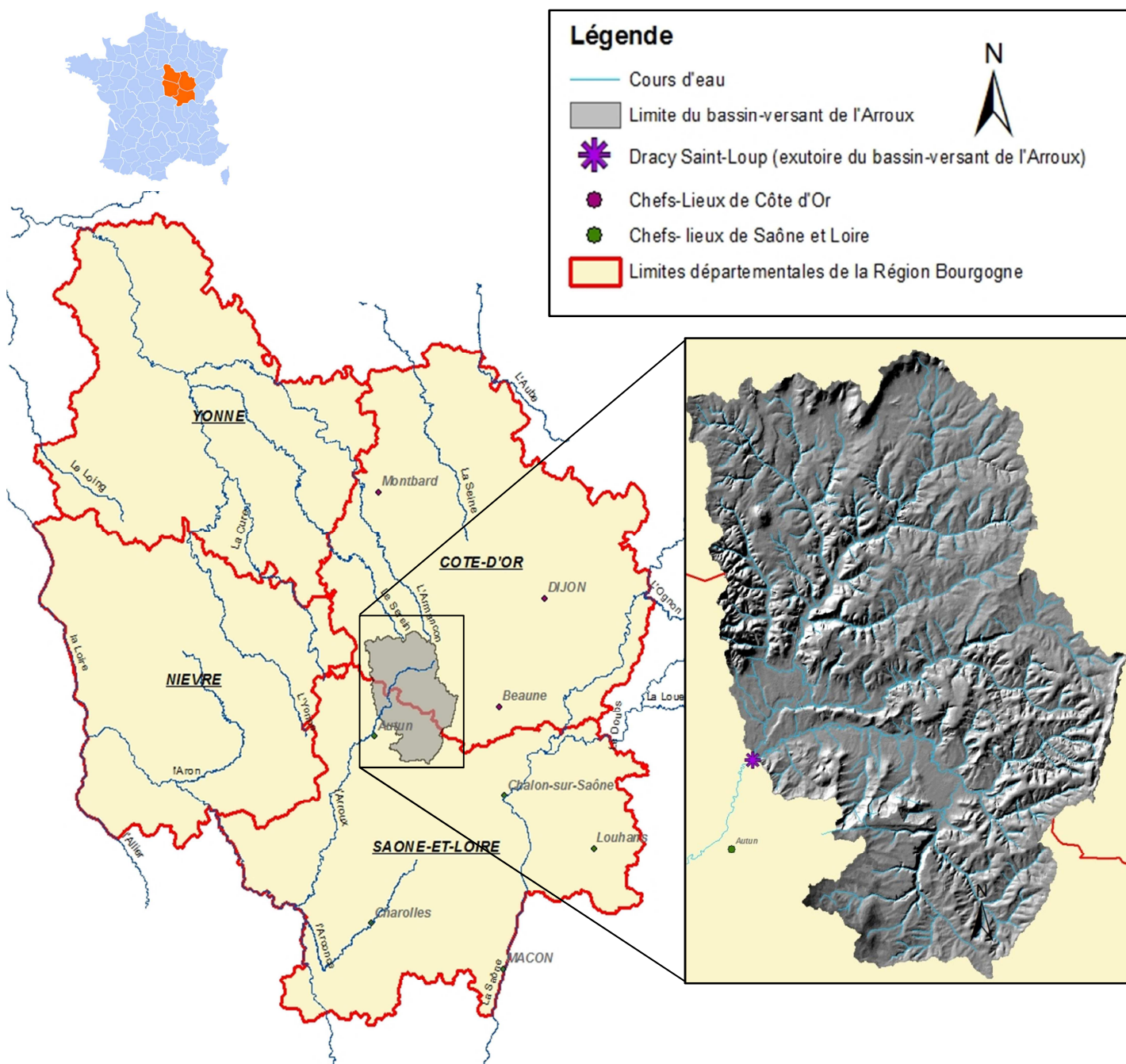


Figure 9 : Localisation du bassin-versant de l'Arroux à Dracy Saint Loup..

## 3.2. Matériels.

### 3.2.1. Présentation du territoire : le bassin-versant de l'Arroux.

Le bassin-versant pilote choisi pour mener cette étude est celui de l'Arroux à Dracy Saint-Loup. Ce choix a été privilégié en raison de la grande disponibilité de différents jeux de données sur l'emprise du bassin. En effet, nous avons à notre disposition des données sur l'occupation des sols, sur les caractéristiques pédologiques, le réseau hydrologique... A cheval sur deux départements, la Côte d'Or et la Saône-et-Loire, il est toutefois situé en totalité sur la région Bourgogne et donc est couvert par les simulations climatiques. Enfin, sa position en tête de bassin permet d'étudier les problématiques de la solidarité des connexions entre l'amont et l'aval (figure 9 ci-contre).

Le bassin-versant s'étend sur 773 km<sup>2</sup>. Son altitude est comprise entre 293 m et 566 m avec une altitude moyenne de 406 mètres (Fock, 2013). L'Arroux et ses affluents ont une longueur cumulée sur la zone d'étude de 1370 km.

Les caractéristiques hydrogéologiques de ce bassin-versant sont qualifiées de « socle métamorphique, grès triasiques et calcaires jurassiques ». En effet, ce bassin repose sur plusieurs formations géologiques différentes. En amont, le substratum est constitué du socle métamorphique et plutonique du Morvan. En aval, on trouve des formations plus récentes de grès du Trias et des calcaires du Jurassique.

Le bassin versant de l'Arroux à Dracy Saint-Loup possède d'autres intérêts qui ont conduit à son choix comme bassin pilote (Toussaint, 2013) :

- Il se situe à la confluence de deux autres « grands » bassins versants : Canche et Dret
- Dracy est également un champ d'expansion pour Autun. Il constitue donc une zone privilégiée pour évaluer l'impact de la pression anthropique sur le bassin, mais aussi les conséquences d'une modification importante de la réserve utile des sols sur l'activité économique, notamment agricole.

La figure 10 représente les différents types d'occupation du sol sur le bassin-versants de l'Arroux. Il s'agit d'un paramètre essentiel qui permet de mieux appréhender le fonctionnement d'un bassin versant et les enjeux présents. Nous pouvons constater que la zone d'étude est peu urbanisée. Le bassin-versant est plutôt rural. Les forêts, représentant un quart du territoire, y sont très présentes. L'activité qui caractérise le plus cette zone est l'activité agricole, notamment l'élevage, en raison d'une part importante de prairies. De ce fait, la ressource en eau, tant au niveau qualitatif que quantitatif revêt un intérêt stratégique aux plans sanitaire et économique.

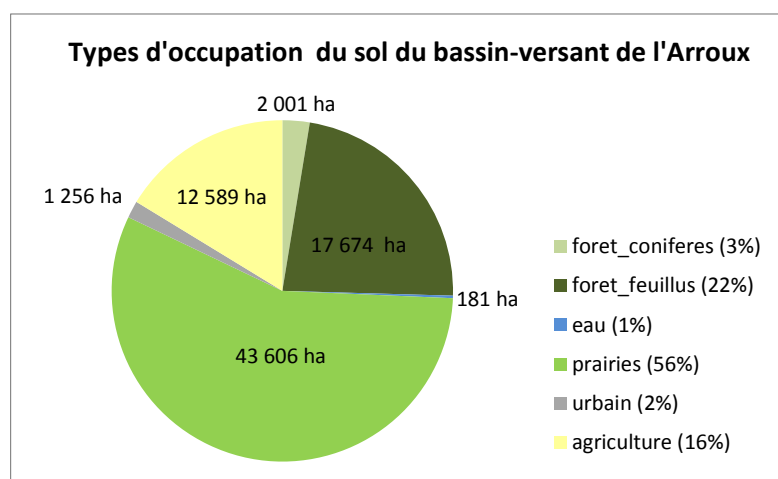


*Figure 10 : Types d'occupation du sol du bassin-versant de l'Arroux à Dracy Saint Loup (en hectare et en pourcentage)*



La connaissance de la quantité d'eau dans une rivière à un moment précis et son évolution dans le temps, permet de déterminer les périodes pendant lesquelles cette rivière est le plus vulnérable aux pollutions. Ces informations sont un enjeu très important pour la protection des milieux et des populations. Ainsi, une des caractéristiques importantes de ce bassin versant est la présence de plusieurs stations de mesures hydrométriques. Les relevés sont réalisés par la DREAL et sont consultables en ligne sur le site internet [www.rdbmrc.com](http://www.rdbmrc.com).

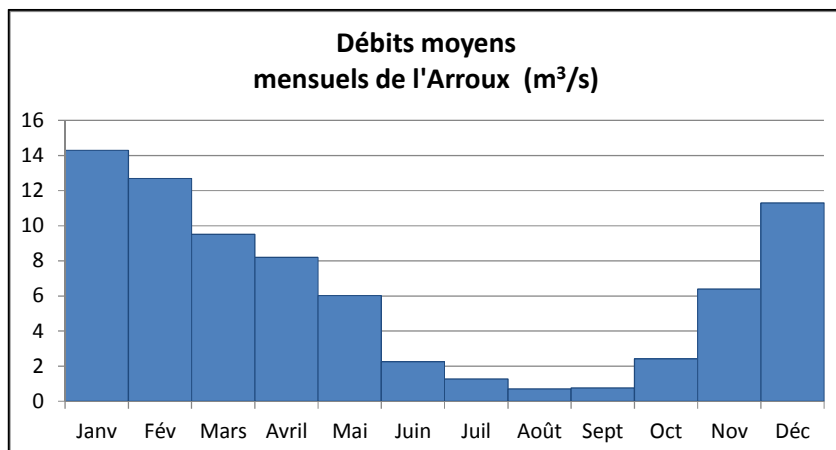


Figure 11 : Débits moyens mensuels de l'Arroux ([www.rdbmrc.com](http://www.rdbmrc.com), en ligne).

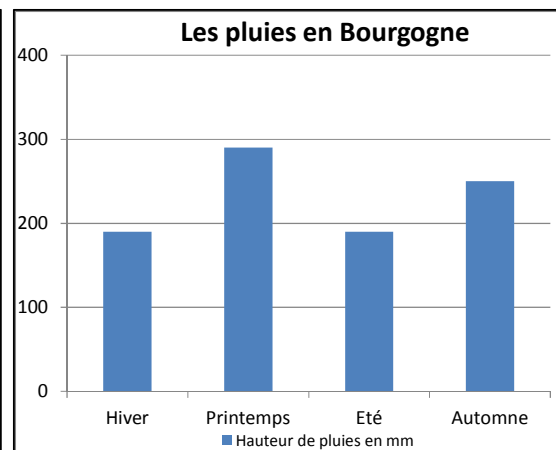


Figure 12 : Hauteur annuelle des pluies en Bourgogne. (Source: MétéoFrance)

La figure 11 est l'histogramme des débits moyens mensuels de l'Arroux. Ils ont été relevés par la station hydrologique de Dracy-Saint-Loup (K1251810), à partir des données hydrologiques de synthèse sur la période 1984 – 2013. Ces relevés montrent deux périodes de débit dans l'année. Entre ces deux périodes, le débit de la rivière peut se trouver multiplié par 10. Nous pouvons donc remarquer la présence d'une période à grand débit entre les mois de Novembre et Avril. Les débits varient de 6 à 14 m³/s. En revanche, la période entre les mois de Mai et Octobre présente un débit plus faible, allant de 6 à moins de 1 m³/s. Cette période est plus sensible aux pollutions. En effet, les assèchs de la rivière ne permettent pas une bonne dilution et une bonne évacuation des matières polluantes si celles-ci devaient se retrouver dans la rivière.

La figure 12 précise les hauteurs de pluies moyennes en millimètres relevées sur l'ensemble de la Bourgogne. Nous pouvons faire le constat que les précipitations sont relativement constantes sur l'ensemble de l'année avec un printemps légèrement plus humide. Or, la figure 11 nous a montré des périodes plus marquées quant au débit de l'Arroux. Les causes des différences de débits ne sont donc pas dues aux précipitations mais bien à l'évapotranspiration. En période hivernale, les plantes sont en repos végétal et leur demande en eau est très faible. Les précipitations rechargent en eau les sols, puis sont évacuées vers la rivière dont le débit augmente. Au printemps et en été, les plantes en pleine croissance, puis en floraison, ont une demande en eau très élevée. A ce phénomène s'ajoute des températures plus chaudes. L'eau tombée au sol, quasiment entièrement consommée par les végétaux et par l'évaporation des sols, ne permet plus de soutenir le débit de la rivière malgré des précipitations plus fortes au printemps.

Ce bassin est très étudié par un ensemble de chercheurs de l'Université de Bourgogne mais aussi par les services de l'administration (DREAL). Par conséquent, nous disposons d'une large série de données climatiques observées (précipitations, températures...), de données hydrologiques (débit...). Les instruments de mesures qui renseignent les données relatives à l'eau sont régulièrement calibrés, comme l'exigent les procédures. Les données sont donc très fiables.



Le choix du bassin-versant de l'Arroux à Dracy Saint-Loup s'est rapidement imposé comme un territoire d'étude privilégié, en raison de ses caractéristiques morphologique, agricole, socio-administrative, mais aussi pour la qualité des données disponibles.

### 3.2.2. Le programme IGCS et la base de données DoneSol v3.

Le programme "IGCS" a pour objectif de constituer des bases de données sur les caractéristiques des sols et sur leur répartition géographique. Ce programme a permis de créer une base ayant une structure unique nommée « DoneSol ». Cette base au format Access (.mdb) nous a renseigné sur de nombreuses caractéristiques du sol demandées par ArcSWAT. Les informations ont été récupérées par des requêtes exécutées par l'application Access. Avant de créer les requêtes, il fallait comprendre l'organisation de la base, la composition des différentes tables et les relations qu'elles avaient entre-elles. Cela a été possible grâce au dictionnaire des données de la base DoneSol v3. Ce dictionnaire détaille l'ensemble des tables et des champs qui composent la base. Il précise les méthodes et les conditions de création des données. Le dictionnaire est téléchargeable à l'adresse suivante :

<http://www.gissol.fr/outil/donesol/Dictionnaire-DoneSol3-igcs-2012-11-01.pdf>. Les mêmes requêtes ont été utilisées pour les départements de la Côte d'Or et de la Saône-et-Loire car les bases étaient organisées de manière identique.

| Variable                        | Remarques                                       |
|---------------------------------|-------------------------------------------------|
| Abondance en éléments grossiers | /                                               |
| pH de l'eau                     | /                                               |
| Taux d'Argile                   | /                                               |
| Taux de Limon                   | /                                               |
| Taux de Sable                   | /                                               |
| Taux Matière Organique          | /                                               |
| Calcaire Total                  | /                                               |
| Couvert végétal                 | Sert à calculer la valeur LUT2 (voir 4.2.2.5. ) |
| Couleur de l'horizon de surface | Sert à calculer l'albédo (voir 4.2.2.6. )       |

*Tableau 7 : Données extraites de la base DoneSol v3.*

Les données que nous avons récupérées grâce à DoneSol v3 sont présentées dans le tableau 7. Ce travail était d'une grande importance car les bases comportent un grand nombre de données et nous devons exploiter uniquement une partie restreinte de ces informations. Le travail que nous avons réalisé est présenté dans le chapitre 4.2.2.2.

### 3.2.3. Le référentiel pédologique de Bourgogne.

Associée au programme IGCS, la mise en forme des données acquises (DoneSol) a été réalisée dans de nombreux départements français afin de créer les Référentiels Régionaux Pédologiques. Ainsi, la Côte d'Or et la Saône-et-Loire possèdent un livre nommé « Référentiel Pédologique de Bourgogne » qui présente la description des Unités Cartographiques de Sols (UCS) et des Unités Typologiques des Sols (UTS) de chaque département. Une UCS est constituée d'une ou plusieurs UTS. Ces référentiels nous décrivent donc la composition et la proportion des UTS à l'intérieur de chaque UCS du département. Ces documents, grâce à une carte au format papier présente dans chaque livre, nous renseignent également sur la distribution spatiale des UCS. En revanche nous n'avons aucune information sur la localisation des UTS. Cette carte est aussi disponible au format numérique et sera utilisée dans notre travail (voir chapitre 4.2.2.1.). Nous nous sommes servis des



référentiels de la Côte d'Or et de la Saône-et-Loire. Ces documents nous ont été d'une grande utilité car ils nous ont permis de réaliser l'expertise des sols en vue de la délimitation géographique des UTS au sein de notre zone d'étude. (Voir chapitre 4.2.2.)

### **3.2.4. Cartes géographiques informatiques.**

Enfin, nous avons utilisé un grand nombre de cartes informatisées. Elles étaient projetées et analysées avec les logiciels ArcMap. Ces cartes étaient principalement des fichiers au format « .shape » (carte vectorielle) ou des fichiers aux formats « .jpeg » et « .ecw » (carte raster). Ces cartes nous ont permis de créer l'ensemble des cartes rasters à renseigner dans le module ArcSWAT. Les principales cartes sont présentées dans le tableau 8.

| Nom de la carte             | Format / type   | Echelle ou Résolution | Description                                             |
|-----------------------------|-----------------|-----------------------|---------------------------------------------------------|
| Modèle Numérique de terrain | JPEG / raster   | 1 pixel = 25 m        | Représentation de la topographie (Altitude)             |
| Carte pédologique           | shape / vecteur | 1 / 250 000e          | Répartition des UCS                                     |
| Carte géologique            | shape / vecteur | 1 / 50 000e           | Couche géologique                                       |
| BD Carthage                 | shape / vecteur | 1 / 25 000e           | Réseau hydrographique                                   |
| Corine Land Cover           | shape / vecteur | 1 / 100 000e          | Occupation du sol                                       |
| BD Topo                     | shape / vecteur | 1 / 25 000e           | Modélisation 3D du territoire et de ses infrastructures |
| Scan 25                     | ECW / raster    | 1 / 25000             | Numérisation des cartes IGN                             |
| Orthophoto                  | ECW / raster    | 1 pixel = 0,50 m      | Photographies aériennes                                 |

*Tableau 8 : cartes utilisées avec le logiciel ArcGIS*

Dans la section suivante nous allons détailler les choix effectués pour générer ces données et les opérations réalisées pour justifier de la fiabilité des données.

## **4. Méthodologie de création des données.**

Nous avons présenté dans la partie précédente l'ensemble des données que nous devons créer mais aussi l'ensemble du matériel dont nous disposons pour réaliser cette création. L'objectif principal de ce mémoire est de concevoir une méthodologie sur un bassin pilote pouvant être réutilisé pour les autres bassins-versant du projet HYCCARE. Nous allons détailler dans cette section l'ensemble des choix et des stratégies que nous avons réalisés pour construire les données nécessaires au logiciel pour effectuer la modélisation. A chaque étape, nous voulions répondre à une seule question :

Quel est le niveau de représentativité de la donnée ainsi créée, ou en d'autres termes, les données construites sont-elles représentatives de la réalité du terrain ?

Pour cela, nous avons réalisé des calculs permettant d'affirmer que les données ainsi générées sont bien conformes aux caractéristiques effectives de la zone d'étude.



#### 4.1. Construction des données hydrologiques.

Les données hydrologiques représentent :

- ✓ La délimitation du bassin-versant principal.
- ✓ La taille du réseau hydrographique qui est fortement corrélée au nombre de sous bassins. Plus le réseau sera grand, plus il y aura de cours d'eau, plus il y aura de sous bassins, et plus ceux-ci seront petits.
- ✓ La délimitation des sous bassins-versants et de leurs exutoires (outlet) sachant qu'à chaque sous bassin correspond un cours d'eau.

Tout l'enjeu de cette étape est de choisir un réseau hydrographique de taille correcte et un nombre de sous bassins-versants ayant une superficie acceptable. En effet, les sous bassins-versants entrent dans la création des HRU (voir figure 2). Donc des sous bassins trop petits entraîneraient un grand nombre de HRU, et un allongement préjudiciable des temps de calculs du modèle. La construction des données hydrologiques se fait en deux temps :

- ✓ Définition de la taille du réseau hydrographique.
- ✓ Définition du nombre de sous bassins et de leurs exutoires.

La délimitation du bassin-versant principal ne présente pas de difficulté particulière. Il s'agit du bassin-versant de l'Arroux à Dracy Saint-Loup. La manipulation consiste juste à sélectionner le MNT découpé selon l'emprise du bassin-versant. Nous ne détaillerons pas cette manipulation car aucun choix n'est réalisé.

##### 4.1.1. Définition de la taille du réseau hydrographique.

La longueur du réseau hydrographique est réalisée en fonction de la surface d'emprise des sous bassins-versants. Ainsi, des petits sous-bassins versants entraînent un grand réseau hydrographique et inversement. Par défaut, le logiciel nous propose un seuil de 1513 ha générant un réseau hydrographique de 154 km de long. Quelle longueur choisir pour être le plus réaliste possible ? La seule référence précise dont disposons est la BD Carthage, donnée de référence au niveau national, qui cartographie l'ensemble du réseau hydrographique de la France. Nous nous sommes donc appuyés sur la longueur du réseau hydrographique du bassin-versant de l'Arroux trouvé dans la BD Carthage. Cette longueur est de 644 km. Nous avons réalisé de manière empirique plusieurs essais de dimensionnement des sous bassins versants. A chaque essai, nous calculions la dimension du réseau et nous la comparions à la longueur de référence, celle de la BD Carthage (644 km). Les résultats sont présentés dans le tableau 9.

| Seuil des surfaces des sous-bassins versants (ha) | Logueur du chenal (km) |
|---------------------------------------------------|------------------------|
| 50                                                | 870                    |
| <b>60</b>                                         | <b>662</b>             |
| 70                                                | 613                    |
| 80                                                | 574                    |

*Tableau 9 : Longueur du réseau hydrographique en fonction de la surface des sous bassins- versants.*



Nous avons donc opté pour un seuil de 60 hectares qui allait créer 662 km de réseau hydrographique.

Une fois ce seuil choisi, le logiciel positionne par défaut les exutoires. Avec un seuil de 60 ha par sous bassins, il crée 683 exutoires, ce qui correspond à 683 sous bassins-versants. Ce nombre est bien trop grand par rapport à la superficie de notre zone d'étude. Nous devons donc supprimer tous les exutoires et les positionner manuellement. Cependant, combien d'exutoires et de sous bassins-versants choisir pour avoir des sous bassins de taille acceptable scientifiquement et ne pas dégrader la puissance de calcul du logiciel ArcSWAT ? Rappelons que le nombre de sous bassins-versants impacte le nombre de HRU et donc le temps de calculs. L'étape suivante devra répondre à cette question.

#### 4.1.2. Définition du nombre de sous bassins-versants et de leurs exutoires.

Nous devons donc à présent définir un nombre et une taille moyenne de sous bassins-versants.

Le nombre d'entité a été choisi en réalisant avec le logiciel R un histogramme des surfaces des sous bassins en fonction de leur nombre. Nous avons choisi trois scénarios, à 10, 19 et 26 sous bassins-versants (watersheds). Le résultat est présenté par la figure 13. Les options à 10 et 19 sous bassins entraînent des surfaces très hétérogènes avec, respectivement, une amplitude de 150 km<sup>2</sup> et de 115 km<sup>2</sup>. Le nombre d'individu dans les classes est limité avec un maximum de 3 pour l'option à 10 sous bassins et 6 pour l'option à 19. La dernière possibilité, celle à 26 sous bassins, montre un étalement des superficies plus restreint (70 km<sup>2</sup>) avec, par conséquent, beaucoup plus d'individus par classe (jusqu' à 23 individus sur 26 regroupés dans deux classes).

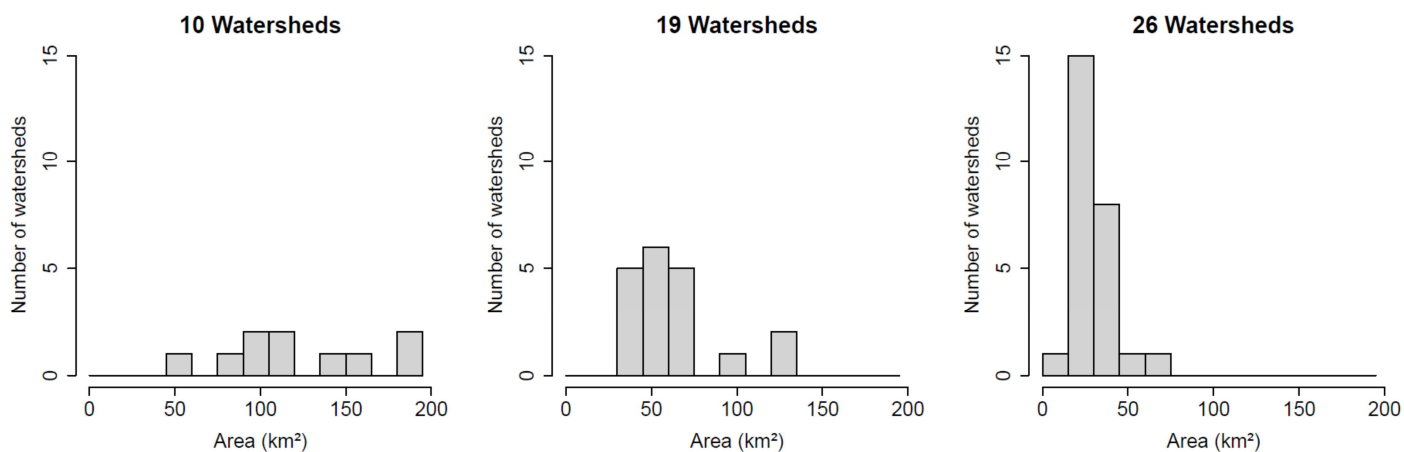


Figure 13 : Distribution des superficies des sous bassins-versants en fonction de leur nombre

La figure 14 est une autre représentation en utilisant les surfaces cumulées. On remarque que l'option à 26 sous bassins-versants (points bleus) présente bien une meilleure homogénéité de surfaces que les autres options.



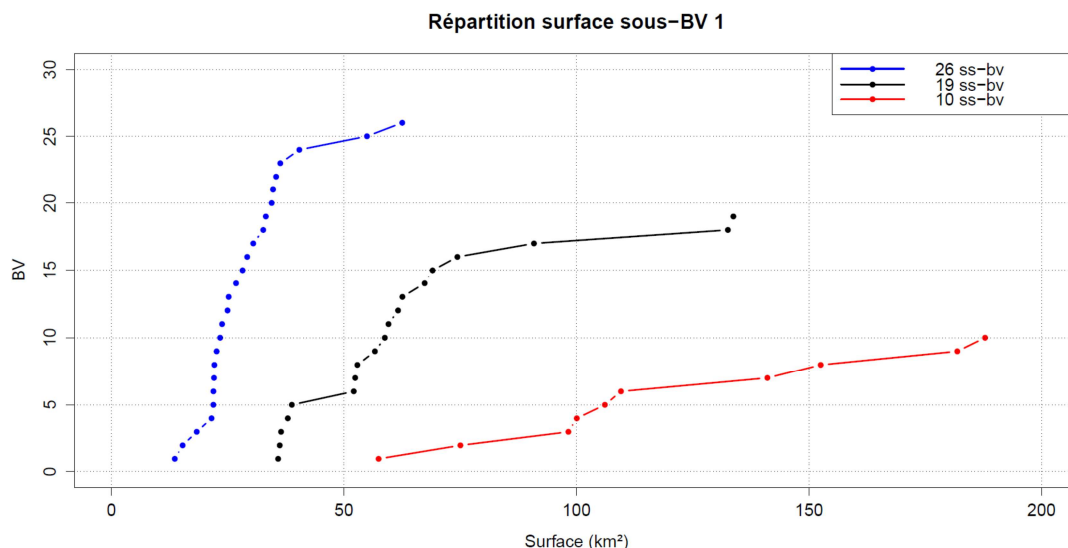


*Figure 14 : Graphique de surfaces cumulées des sous bassins versants en fonction de leur nombre.*

L'option à 26 entités sera donc retenue pour choisir le nombre de sous bassins-versants à créer dans notre zone d'étude.

Nous avons défini le nombre de sous bassins, il reste maintenant à les positionner sur le réseau hydrographiques pour avoir une surface de taille acceptable. La difficulté de cette étape est de définir ce qu'est un sous bassin-versant de taille acceptable pour la modélisation de notre zone d'étude. Ce choix comprend une part de subjectivité de la part de l'expérimentateur. Toutefois, pour réduire au maximum cette part d'arbitraire, nous avons rédigé un ensemble de conditions auxquelles devaient répondre les sous bassins sélectionnés, à savoir :

- ✓ Avoir une homogénéité des surfaces
- ✓ Sélectionner un nombre limité de sous bassins en amont du bassin-versant sélectionné pour éviter un phénomène de saturation (beaucoup de sous bassins se jettent dans un petit bassin)
- ✓ Créer des sous-bassins qui englobent des caractéristiques similaires du bassin hydrogéographique (un bassin avec une couverture majoritaire de forêt, ou avec une composition majoritaire de roche mère identique...)

Ces critères de choix nous ont permis de délimiter 26 sous bassins-versants avec une superficie moyenne de 29 km<sup>2</sup> et un écart-type de 11 km<sup>2</sup>. La distribution des surfaces peut se répartir en 4 classes présentée dans la figure 15 où nous avons en abscisse les classes de superficies et en ordonnée le nombre d'individus dans chaque classe. Nous pouvons remarquer que la majorité des sous bassins (21 sur 26) ont une superficie homogène, comprise entre 15 et 35 km<sup>2</sup>.

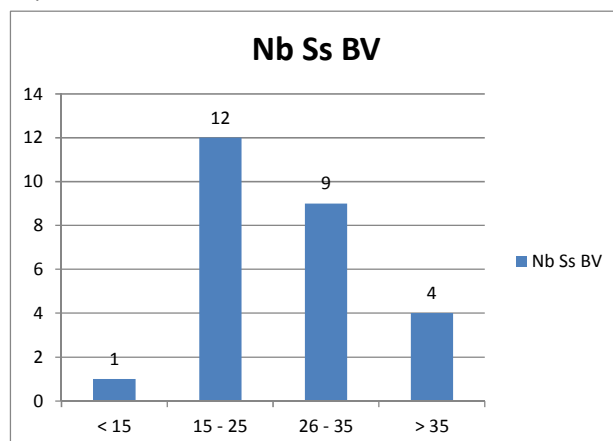


*Figure 15 : Nombre de sous bassins-versants créés par classe de superficies.*

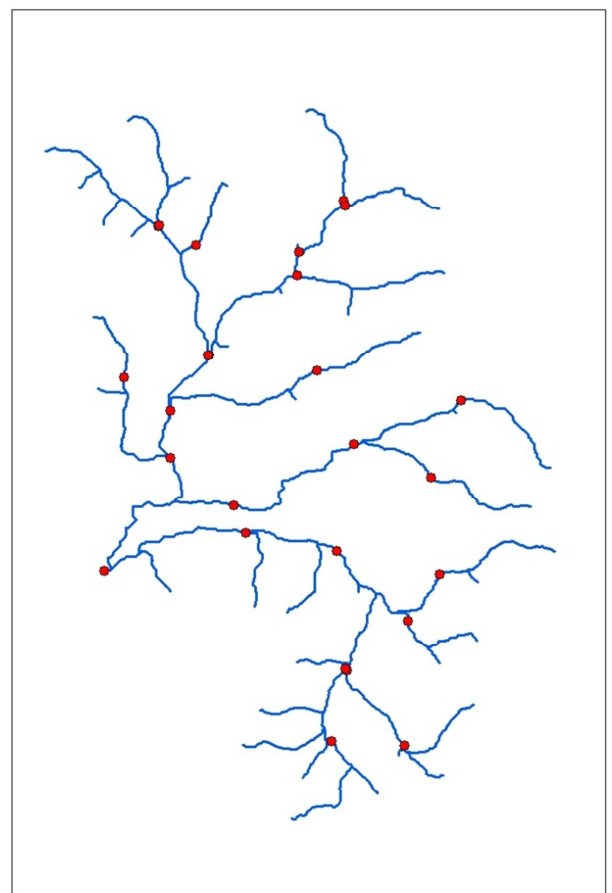
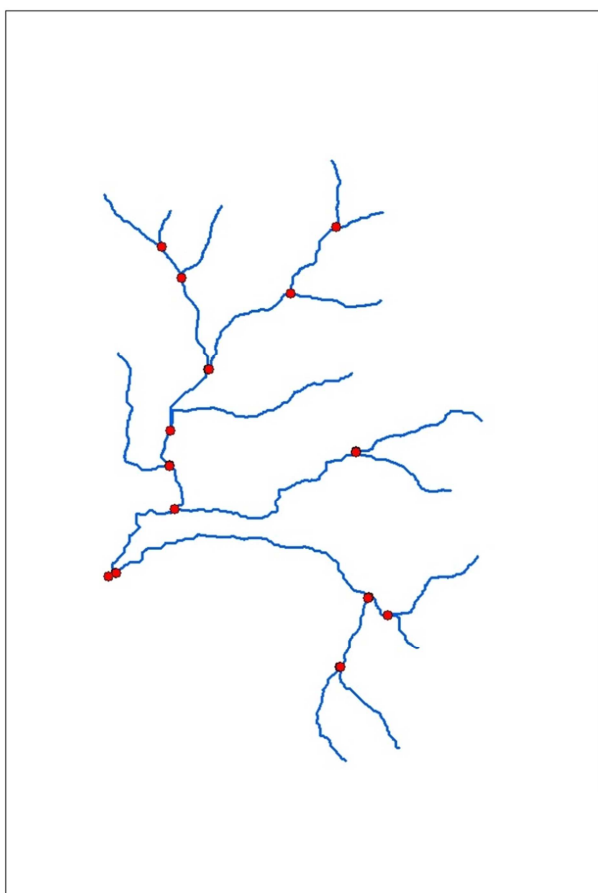
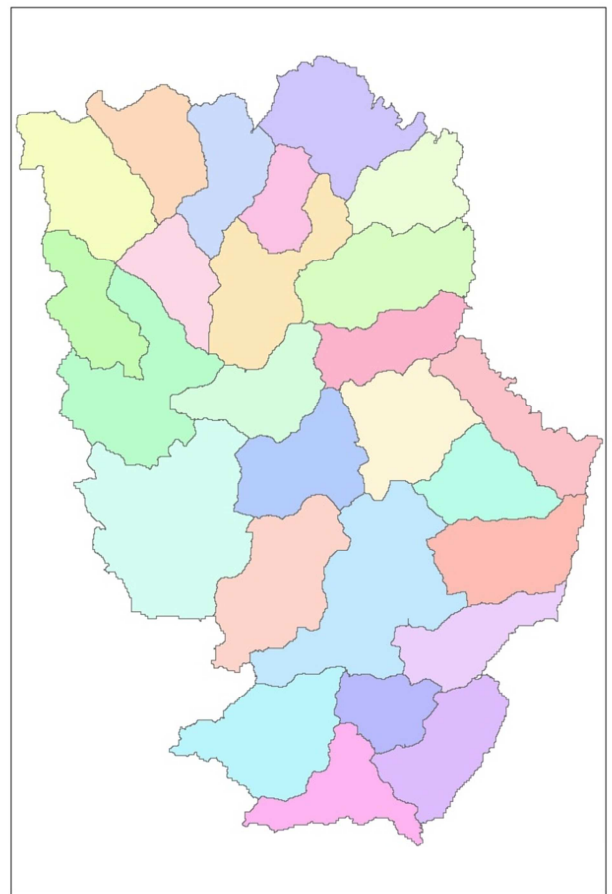
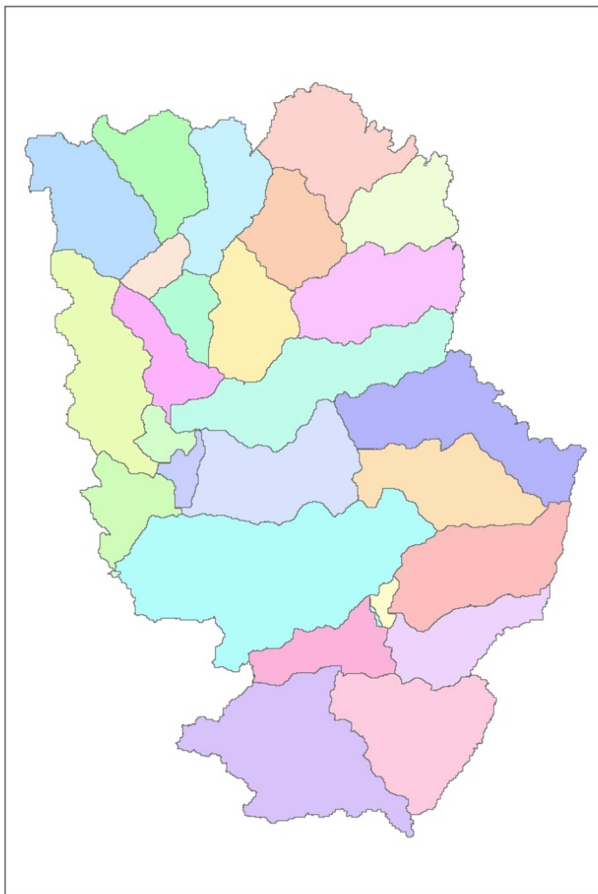


*Figure 16 : Résultats des deux scénarios (par défaut à gauche et manuel à droite) sur la construction des données hydrologiques (nombre de sous bassins-versants en haut et nombre d'exutoires en bas).*

Pour rappel, le tableau 10 compare les principales caractéristiques des données hydrologiques créées par défaut et manuellement. Nous pouvons voir un nombre de sous bassins et une surface moyenne presque identiques, mais un écart-type quasiment doublé. Cela signifie que les surfaces des sous bassins dans le scénario par défaut seront moins homogènes que lorsqu'on les délimite manuellement. La figure 16 (ci-contre) présente la comparaison des résultats des deux scénarios aux niveaux de la création du nombre de sous bassins-versants (en haut) et du nombre d'exutoires (en bas).

|                                                                      | Scénario réalisé par défaut par ArcSWAT | Scénario réalisé manuellement | Valeur à approcher |
|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| Longueur du réseau hydrographique (km)                               | 154                                     | 662                           | 644                |
| Nombre de sous bassins-versants et d'exutoires                       | 27                                      | 26                            | 26                 |
| Moyenne de la surface des sous bassins-versants (km <sup>2</sup> )   | 28                                      | 29                            |                    |
| Ecart-type des surfaces des sous bassins-versants (km <sup>2</sup> ) | 19                                      | 11                            |                    |

*Tableau 10 : Différences des données hydrologiques entre un choix par défaut et un choix manuel*

Le résultat final délimitant les 26 sous bassins-versants de l'Arroux et leurs exutoires est représenté dans la figure 17 ci-après. Nous pouvons observer une répartition homogène des bassins sur l'ensemble du territoire étudié.

## 4.2. Sélection des données relatives au sol.

### 4.2.1. Données concernant l'occupation du sol.

Ces données sont nécessaires au logiciel ArcSWAT pour la bonne exécution de la modélisation. Nous avons réalisé l'occupation du sol de la zone grâce au Corine Land Cover 2006 qui est une couche d'information géographique exploitable par un logiciel d'information géographique comme ArcGIS. La couche Corine Land Cover renseigne le type d'occupation du sol en plusieurs catégories. Sur le bassin versant de l'Arroux, nous avons :

- ✓ Equipements sportifs et de loisirs
- ✓ Extraction de matériaux
- ✓ Forêt et végétation arbustive en mutation
- ✓ Forêts de conifères
- ✓ Forêts de feuillus
- ✓ Forêts mélangées
- ✓ Marais intérieurs
- ✓ Plans d'eau
- ✓ Prairies
- ✓ Surfaces essentiellement agricoles, interrompues
- ✓ Systèmes cultureux et parcellaires complexes
- ✓ Terres arables hors périmètres d'irrigation
- ✓ Tissu urbain discontinu

Cependant, pour une meilleure lecture, pour une information simplifiée et plus pertinente, nous avons regroupé ces classes en 5 grandes catégories. Si nous avons conservé un grand

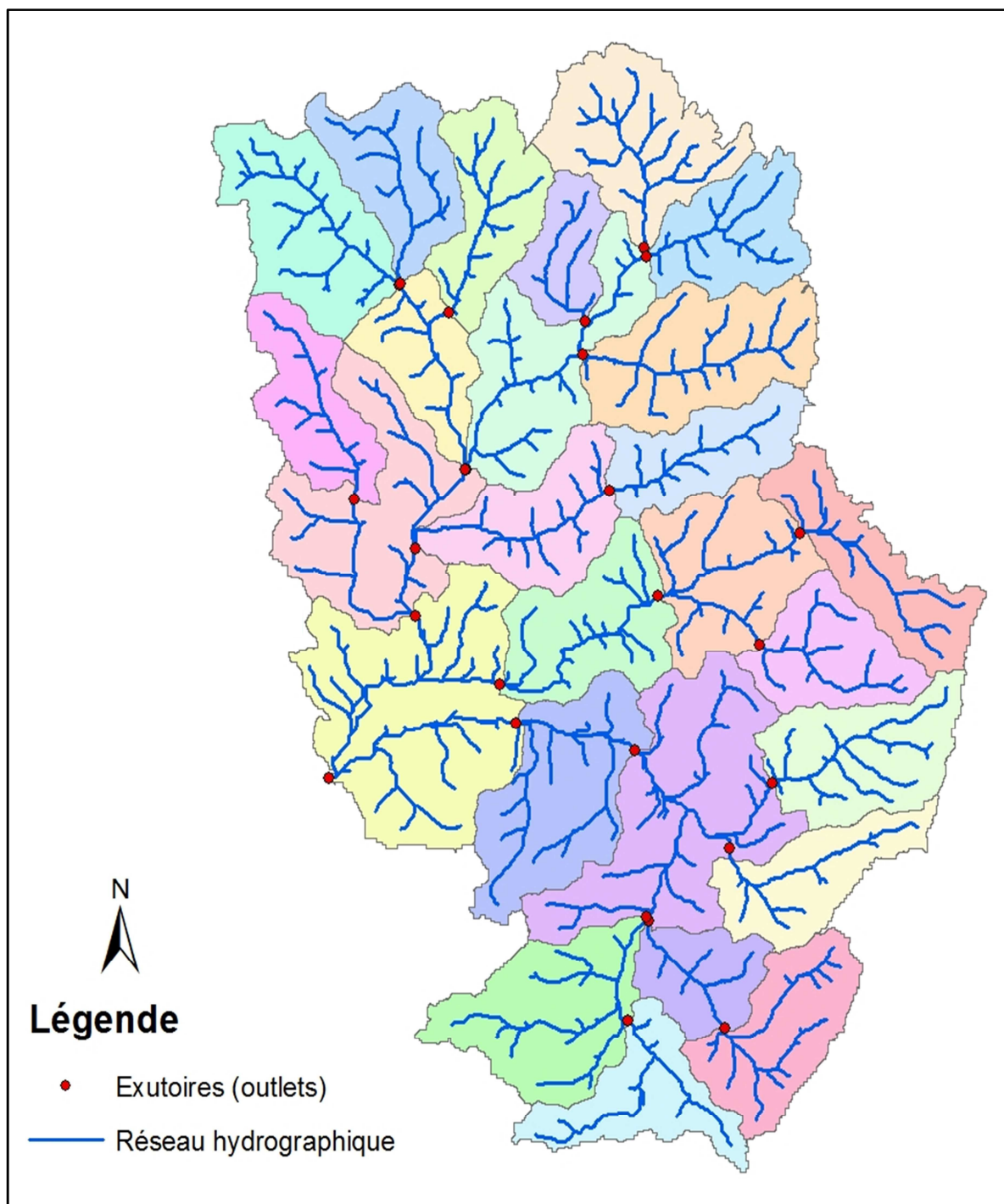


*Figure 17 : Réseau hydrographique, implantations des exutoires et délimitation géographique des 26 sous bassins-versants.*

nombre de classes d'occupation, cela aurait généré de nombreuses HRU. Cette nouvelle classification comprenant désormais 5 types (au lieu de 14) a donc été réalisée sur les bases d'un regroupement des classes en fonction de leurs caractéristiques similaires de couverture du sol.

Ainsi, les équipements sportifs et de loisirs, au nombre de deux, sont un golf et un parc. Ces deux structures étant composées d'une grande couverture herbacée, elles ont été fusionnées avec la classe « prairies ».

Les extractions de matériaux, eux aussi au nombre de deux présentent une surface très restreinte et sont comparable à des surfaces anthropisées. Ils ont été intégrés à la classe « urbain ».

Les forêts ont été regroupées en deux types selon leur feuillage : les conifères (feuillage permanent) et les feuillus (feuillage caduque). En effet, ces deux grands types d'arbres, en fonction de la permanence de leur feuillage et de leur itinéraire de culture, ont une interaction différente sur les composantes hydriques du sol. Ainsi, les forêts et végétation arbustive en mutation, les forêts mélangées (toutes deux composées principalement de feuillus) et les forêts de feuillus ont été mises dans la classe forêt de feuillus. En revanche, les forêts de conifères est une classe à part entière.

Marais et plans d'eau ont été mis dans la classe « eau ».

Les surfaces essentiellement agricoles, les systèmes culturaux et parcellaires complexes, les terres arables hors périmètres d'irrigation, en raison de leur forte dominante agricole, ont été fusionnés dans la classe « agriculture ».

La répartition géographique dans la zone d'étude de ces nouvelles classes est présentée ci-après dans la figure 18.

#### **4.2.2. Création des données pédologiques.**

Le regroupement des données pédologiques nécessaires à ArcSWAT représente le temps de travail le plus important de ce stage. Ces données doivent être générées en deux étapes. Lors de chacune d'elle, un travail d'expertise doit être mené pour modéliser correctement la zone d'étude:

- ✓ Création de la carte physique des sols de la zone étudiée.
- ✓ Création du fichier contenant les valeurs qualitatives et quantitatives en fonction des types de sols identifiés à l'étape précédente.
- ✓ Identification des classes de pente du bassin-versant.

##### **4.2.2.1. Carte physique des sols.**

Il s'agit de créer avec ArcGis un raster de la spatialisation des différents types de sols dans la zone d'étude. Le principal problème rencontré lors de cette étape, est qu'il n'existe aucune spatialisation des Unités Typologiques des Sols (UTS). Seules les Unités Cartographiques des Sols (UCS) sont représentées en couche vectorielle sur ArcGIS et sont donc géoréférencées. Il faudra donc établir une logique décisionnelle pour géoréférencer les UTS. Pour cela, nous avons à notre disposition plusieurs types de données.

Les référentiels pédologiques de Bourgogne des départements de la Côte d'Or et de la Saône-et-Loire.

La base Donesol v3, sous format Access, qui permet grâce à la création de requêtes, de nous donner la composition des sols en terme de texture, de pH, de taux de matière organique, de calcaire.

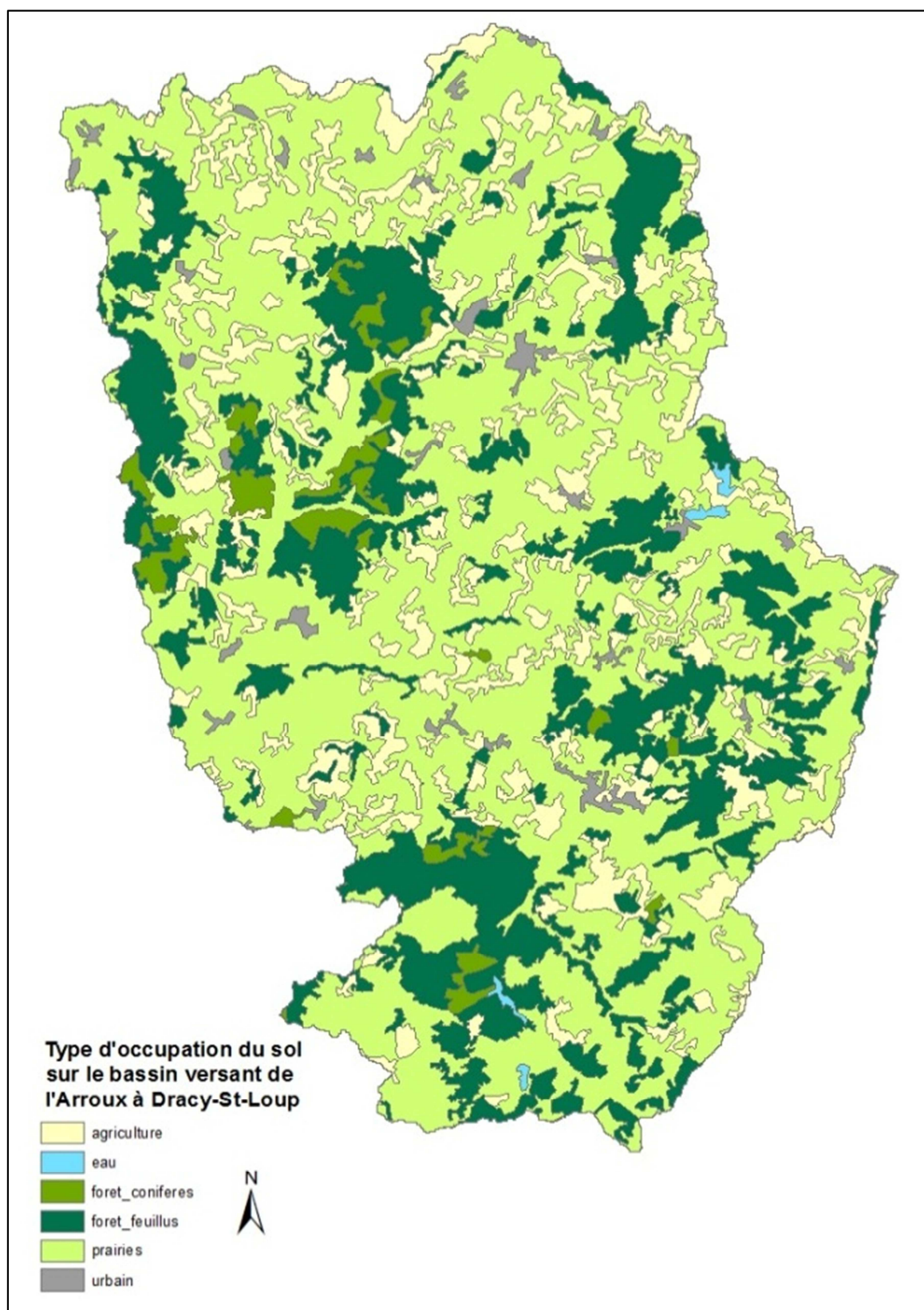


*Figure 18 : Répartition des types d'occupation du sol sur le bassin versant de l'Arroux à Dracy Saint-Loup*

La couche pédologique (format shape) qui nous informe via ArcGis de la localisation des différentes UCS en Bourgogne.

La couche géologique (format shape) qui nous renseigne sur l'emplacement géographique des différentes roches mères et de la succession des couches géologiques en Bourgogne.

Aucune de ces données ne permet de créer directement la couche localisant les UTS au sein du bassin-versant de l'Arroux. Il faudra réaliser une expertise en croisant l'ensemble des informations disponibles pour créer une carte de la distribution spatiale des différents types de sols sur la zone d'étude. Nous avons mis en place une procédure pour réaliser cette carte physique des sols.

✓ Etape 1 : Croisement des cartes pour délimiter les UTS.

Nous avons réalisé un test sur une petite partie du territoire (bassin-versant du cours d'eau Corcelles). Nous avons alors croisé les cartes de l'occupation du sol, de la géologie et des unités cartographiques, pour essayer de délimiter les UTS le plus précisément possible sur cette zone. Dans les parties du territoire testé, où le croisement des cartes n'était pas satisfaisant, nous complétions notre analyse en nous appuyant sur les données du référentiel pédologique pour trouver des caractères discriminants. Le résultat n'a pas été satisfaisant pour deux raisons :

Tout d'abord, il a nécessité un temps de travail important de 4 jours pour une zone de 30 km<sup>2</sup>. Pour mémoire, la zone d'étude de l'Arroux est 25 fois plus grande, soit 773 km<sup>2</sup>.

Ensuite, nous avons commencé à paramétrer ArcSWAT avec les données ainsi générées. La taille très petite de certaines UTS entraînait la création de très nombreuses HRU. Nous avons créé jusqu'à 1500 HRU pour une zone de 30 km<sup>2</sup>. Ce nombre, trop important, dégradait la capacité de calcul du logiciel. De plus, le logiciel demande de sélectionner un seuil minimal de surface à prendre en compte dans les calculs. Le seuil minimal de surface était plus grand que la surface de certaines des UTS créées. Si nous augmentions ce seuil à 20% (valeur par défaut) presque toutes les UTS étaient agrégées et notre travail d'expertise devenait inutile.

Il a alors été décidé d'attribuer une seule UTS à chaque UCS. L'UTS choisie est l'UTS majoritaire de l'UCS. Pour acquérir cette information, nous récupérons avec une requête dans la base DoneSol v3 les numéros et les noms des UCS et des UTS majoritaires. Puis, nous croisons ces données avec la table attributaire de la couche pédologique en prenant comme clé de jonction le numéro de l'UCS. A la fin de cette étape, nous disposons d'une carte avec les UTS positionnées géographiquement. Les limites de ces UTS étaient donc les limites des UCS.

✓ Etape 2 : Agrégation des données limitrophes.

Une des spécificités du bassin-versant de l'Arroux est qu'il est sur deux départements. Or, les référentiels et les cartes pédologiques n'ont pas été homogénéisés en limites départementales. Ainsi, toutes les UTS s'arrêtent à la limite administrative et non à des limites plus naturelles. Nous avons des doublons c'est-à-dire que des UTS aux caractéristiques identiques, mais avec des numéros différents, étaient contiguës entre la Côte d'Or et la Saône-et-Loire. Nous avons dû identifier ces UTS grâce aux informations fournies par les référentiels pédologiques des deux départements. Ces entités ont ensuite été fusionnées (figure 19). Nous avons ainsi pu regrouper 8 UTS.



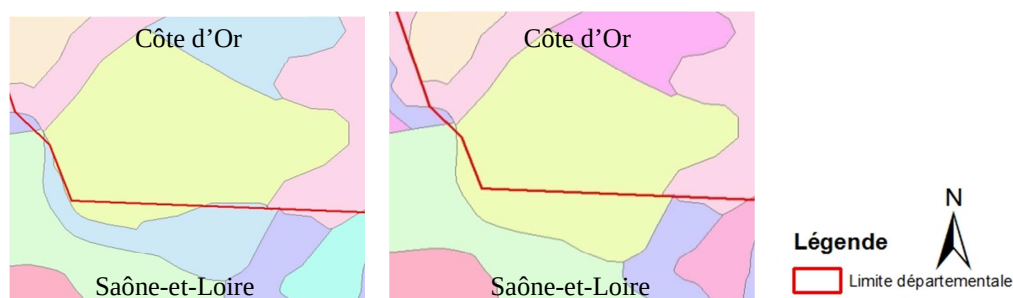


Figure 19 : Exemple d'agrégation de polygones en limite départementale

✓ **Etape 3 : Nettoyage de la carte : suppression des superpositions de polygones et des découpages trop petits.**

La carte créée des UTS majoritaires présentait deux faiblesses que nous avons dû rectifier.

La première était la présence de données superposées. La zone d'étude étant sur deux départements différents, nous avons pris les cartes pédologiques de la Côte d'Or et de la Saône-et-Loire que nous avons fusionnées. En réalité les cartes ne s'arrêtaient pas strictement à la limite départementale mais dépassait de quelques mètres à certains endroits. Cela était visible uniquement lorsque nous zoomions fortement sur la limite des deux départements et que nous mettions en transparence une des deux cartes. Cette juxtaposition a entraîné, lors de la fusion des deux cartes pédologiques, des zones en double. Pour rectifier ce problème, nous avons ouvert une session de mise-à-jour de la carte fusionnée sous ArcGis puis nous avons modifié les points des polygones mal positionnés que nous avons remis sur la limite départementale. La superficie totale corrigée était de 5000 m<sup>2</sup> (0,5 ha). Cette surface n'était pas très grande (figure 20) mais elle aurait pu générer un dysfonctionnement dans le modèle si l'ensemble des pixels de la carte pédologique n'avait des valeurs homogènes. De plus, par rigueur scientifique, nous ne pouvions travailler avec des cartes présentant ce type d'erreur.

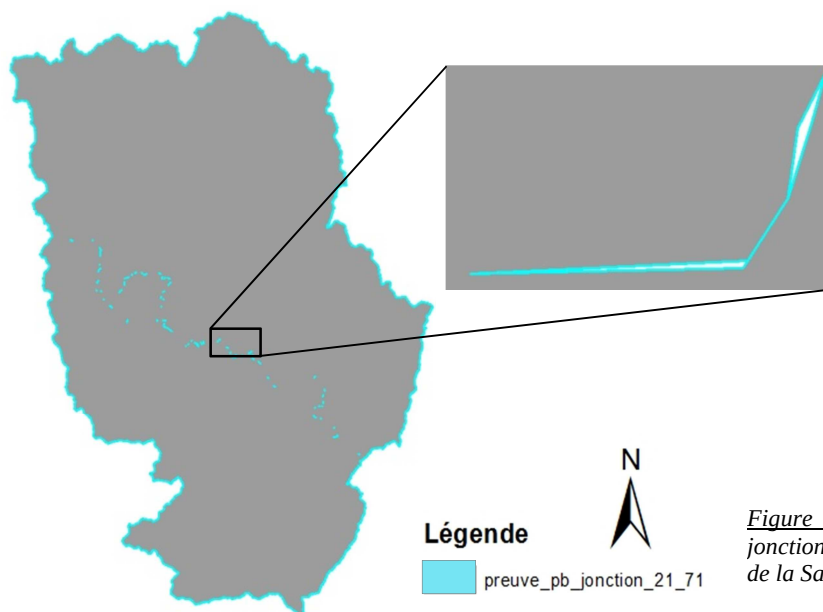


Figure 20 : Identification des problèmes de jonction entre les départements de la Côte d'Or et de la Saône-et-Loire

Le deuxième problème provenait du découpage des cartes pédologiques (précédemment fusionnées) sur zone du bassin-versant de l'Arroux. En effet, nous ne voulions pas avoir les départements en entier à étudier, mais seulement le territoire de l'Arroux. Nous avons alors réalisé un « clip » (figure 21) des limites du bassin-versant de l'Arroux sur le résultat de la



fusion des deux cartes pédologiques. Au niveau de l'extrémité de la zone d'étude, nous avons vérifié si des bouts d'UCS très petits n'avaient pas été découpés. Nous avons trouvé une UCS qui faisait environ 3000 m<sup>2</sup> soit 0,3 ha (figure 22). Cette UCS a été fusionnée avec une UCS voisine qui, après expertise du référentiel pédologique, présentait des caractéristiques similaires. Dans le cas du bassin-versant de l'Arroux nous avons trouvé un seul polygone, mais cette vérification devra être faite lors de l'étude des 12 autres bassins-versants. Ce type de polygones pouvant être plus fréquent en fonction des aléas du découpage.

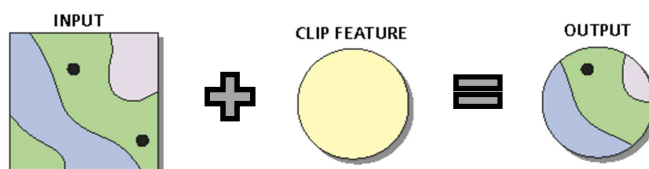


Figure 21 : Principe du Clip (Source : aide ArcMap)

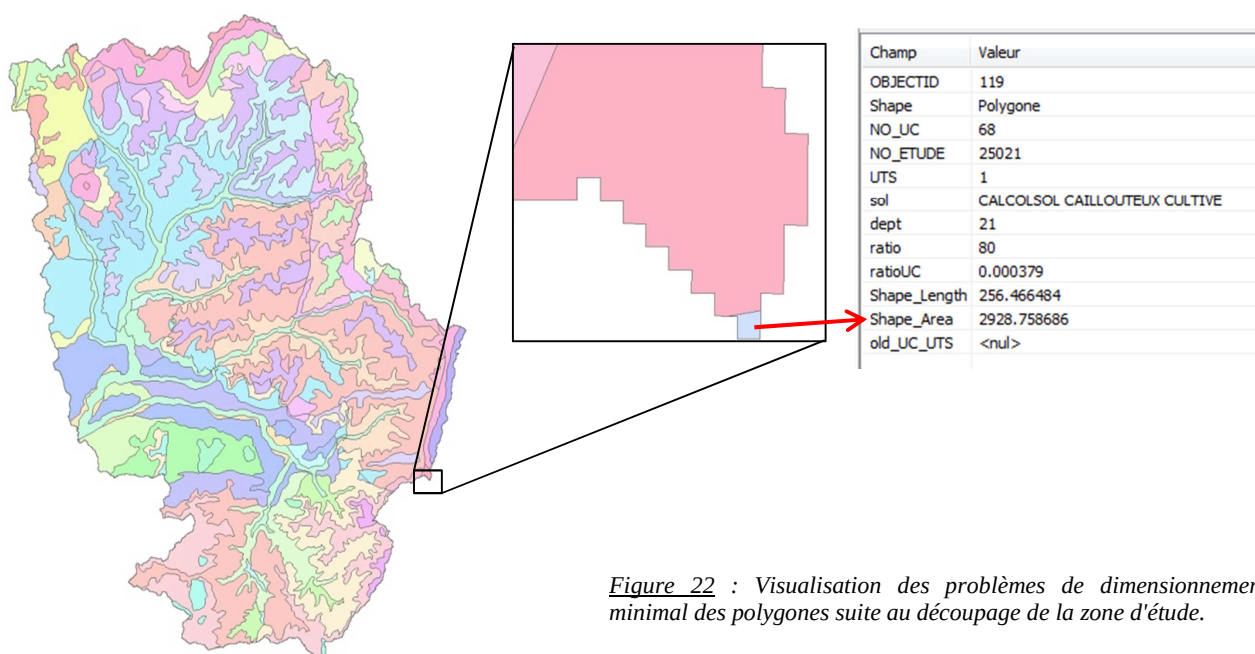


Figure 22 : Visualisation des problèmes de dimensionnement minimal des polygones suite au découpage de la zone d'étude.

#### ✓ Etape 4 : Justification de la fiabilité des données.

Nous avons décidé de considérer l'UTS majoritaire de chaque UCS. Nous avons donc simplifié la réalité. Cette dernière étape consistait à connaître l'écart de la carte ainsi générée avec la réalité du terrain. Nous avons sélectionné trois critères, que nous estimons discriminants pour caractériser au niveau pédologique une zone. Ces trois critères sont la distribution des types de sols, la réserve utile et la texture.

- La distribution des types de sols.

Rappelons qu'une UCS est constituée de plusieurs UTS et qu'une UTS est un type sol particulier (luvisol, pélosol, calcisol, calcosol etc...). Pour connaître la distribution des types de sols, nous avons extrait de la table attributaire de la couche pédologique, les superficies de chaque UCS de la zone d'étude. Puis, nous avons réalisé deux opérations.

Pour connaître une estimation de la part de surface de chaque UTS, nous avons pondéré la surface de chaque UCS avec le ratio de surface des UTS constituant l'UCS. Le résultat est présenté par la figure 23 (histogramme bleu).



Pour connaître la part de surface de chaque UTS majoritaire nous avons pris simplement la surface de chaque UCS de la zone d'étude. Le résultat est présenté par la figure 23 (histogramme rouge).

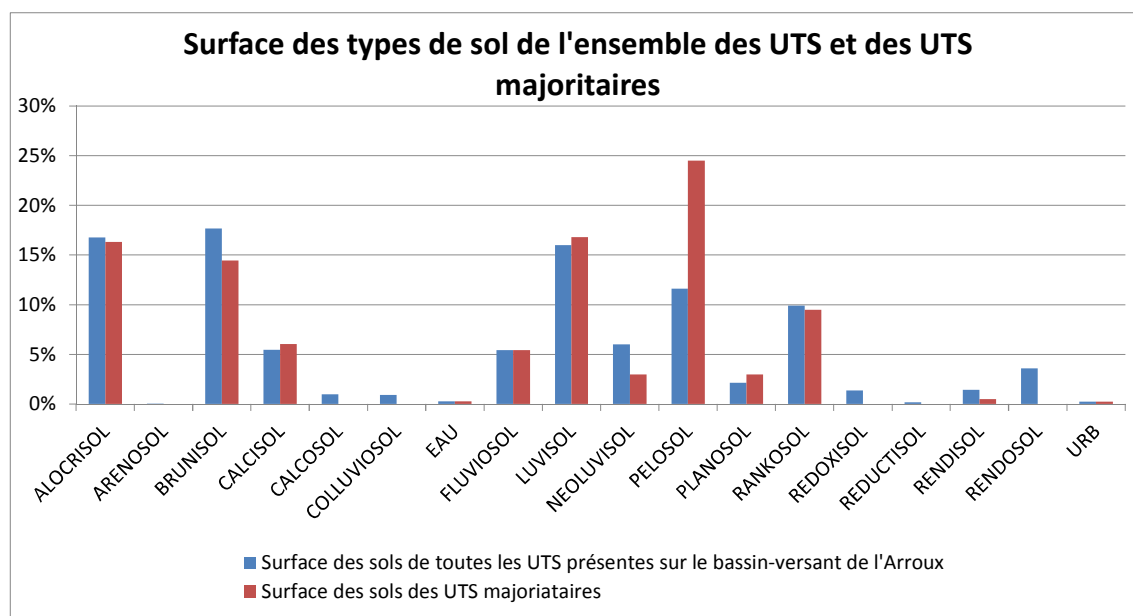


*Figure 23 : Histogrammes des surfaces des types de sol présents sur la zone d'étude*

La figure 24 est un histogramme représentant la différence du pourcentage de la surface de chaque sol avant et après l'attribution de l'UTS majoritaire à chaque UCS. Chaque sol a un écart d'estimation de sa surface réelle comprise entre - 3.5% et 0.5% après attribution des UTS majoritaires. A l'exception des pélosols qui sont nettement surreprésentés (+ 13%) par rapport à leur surface réelle. Nous pouvons donc affirmer que l'ensemble des types de sols, à l'exception des pélosols, est assez bien représenté lorsque nous attribuons l'UTS majoritaire à chaque UCS.

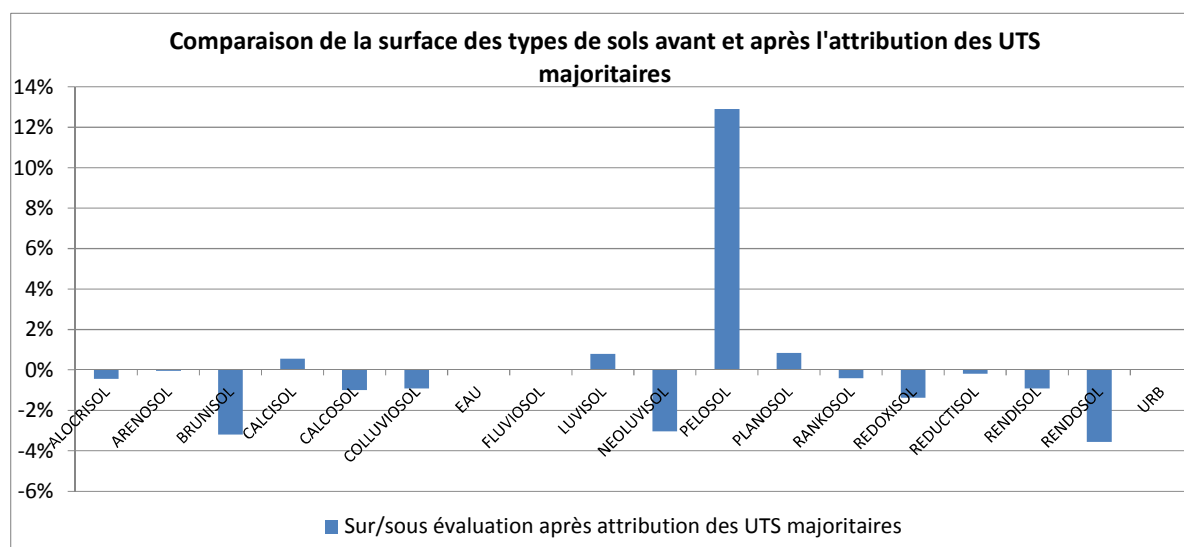


*Figure 24 : Evolution de la surface des types de sol après attribution des UTS majoritaires.*



- La réserve utile (RU).

Pour justifier de la fiabilité de notre démarche, plusieurs paramètres auraient pu être comparés comme l'épaisseur du sol, sa densité...Au final, il a été choisi d'utiliser un indicateur qui permet d'agréger plusieurs paramètres du sol et qui est fort pertinent dans cette étude : la réserve utile.

La RU a été évaluée pour chaque strate grâce aux coefficients proposés par Bruand (Bruand *et al.*, 2004). Les coefficients utilisées évaluent la RU en mm d'eau par cm de sol en considérant que la RU est comprise entre la teneur en eau à pF 4.2 (point de flétrissement) et la teneur en eau à pF 2 (capacité au champ). La RU par strate est donc calculée ainsi :

$$\text{Coefficient}_{\text{Bruand}} * \% \text{ terre fine} * \text{épaisseur de la strate} \quad (\text{Equation 7})$$

La RU d'une UTS est alors :

$$RU_{UTS} = \sum_{s=1}^n (\text{Coefficient}_{\text{Bruand } s} * \% \text{ terre fine }_s * \text{épaisseur }_s) \quad (\text{Equation 8})$$

Où n est le nombre de strate et s le numéro de la strate.

Ce coefficient de Bruand peut être majoré s'il s'agit d'une strate de surface, en fonction des classes de texture du triangle de l'Aisne ou si le taux de matière organique est supérieur à 7%. Ainsi la RU prend en compte :

- ✓ Le pourcentage de terre fine,
- ✓ La texture
- ✓ L'épaisseur des strates (donc du sol)
- ✓ Le taux de MO

Pour l'ensemble de ces raisons, la réserve utile est un indicateur qui prend en compte une multitude de paramètres légitimes pour caractériser un sol. Nous allons donc comparer la réserve utile des sols avant et après attribution de l'UTS majoritaire à chaque UCS.

Nous avons à notre disposition la table des RU pour chaque UTS de Bourgogne élaborée dans le cadre du précédent projet « Adaptation au changement climatique en Bourgogne : Contribution à l'élaboration des stratégies d'adaptation régionales et territoriales » (Ubertosi *et al.*, 2009). Ainsi, nous avons pu calculer :

La RU majoritaire attribuée à chaque UCS (colonne 5 du tableau 11 en exemple).

La différence entre la RU majoritaire de l'UCS et la RU de chaque UTS de l'UCS (colonne 6 du tableau 11 en exemple).

La surface de chaque UTS en pondérant la surface totale de l'UCS au pourcentage couvert par chaque UTS de l'UCS (colonne 8 du tableau 11 en exemple).

Enfin, nous avons réalisé des classes de RU avec un pas de 20 mm. A chaque classe nous avons additionné les surfaces de RU correspondantes (tableau 12 en exemple).

Les tableaux 11 et 12 illustrent les calculs réalisés avec un exemple.



| UCS | UTS | Part de l'UTS dans l'UCS ( % ) | RU (mm) | RU majoritaire (mm) | RU majoritaire - RU (mm) | Superficie de l'UCS (ha) | Superficie pondérée de l'UTS (ha) |
|-----|-----|--------------------------------|---------|---------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| 1   | 1   | 10                             | 90      | 50                  | -40                      | 1500                     | 150                               |
| 1   | 2   | 30                             | 80      | 50                  | -30                      | 1500                     | 450                               |
| 1   | 3   | 60                             | 50      | 50                  | 0                        | 1500                     | 900                               |
| 2   | 1   | 40                             | 74      | 74                  | 0                        | 2100                     | 840                               |
| 2   | 2   | 10                             | 85      | 74                  | -11                      | 2100                     | 210                               |
| 2   | 3   | 20                             | 60      | 74                  | 14                       | 2100                     | 420                               |
| 2   | 4   | 30                             | 55      | 74                  | 19                       | 2100                     | 630                               |

**Tableau 11** : Exemple de calculs réalisés pour étudier l'évolution de la RU après l'attribution des UTS majoritaires

| RU             | ha   |
|----------------|------|
| [-40 ; -20]    | 600  |
| [>-20 ; -0,01] | 210  |
| [0]            | 1740 |
| [0,01 ; 20]    | 1500 |
| [>20 ; 40]     | 0    |

**Tableau 12** : Exemple de classes créées en fonction des données du tableau 11

Les calculs réalisés sur l'ensemble de notre zone d'étude sont résumés dans le tableau 13. Nous avons créé 12 classes avec un pas de 20 mm comprenant les surfaces dont la RU a été surestimée, sous-estimée ou correctement estimée. La figure 25 a été faite avec les données du tableau 13. Cet histogramme nous montre que 50 % environ des sols ont une estimation comprise entre -20 et + 20 mm.

| RU (mm)       | Surface (ha) |
|---------------|--------------|
| [-120 ; -101] | 229          |
| [-100 ; -81]  | 0            |
| [-80 ; -61]   | 3907         |
| [-60 ; -41]   | 3796         |
| [-40 ; -21]   | 4611         |
| [-20 ; -0,1]  | 14308        |
| [0]           | 12900        |
| [0,1 ; 19]    | 6970         |
| [20 ; 39]     | 18705        |
| [40 ; 59]     | 9408         |
| [60 ; 79]     | 368          |
| [80 ; 99]     | 2109         |

**Tableau 13** : Classes de RU générées pour l'étude de l'évolution de l'estimation de la RU après attribution des UTS majoritaires

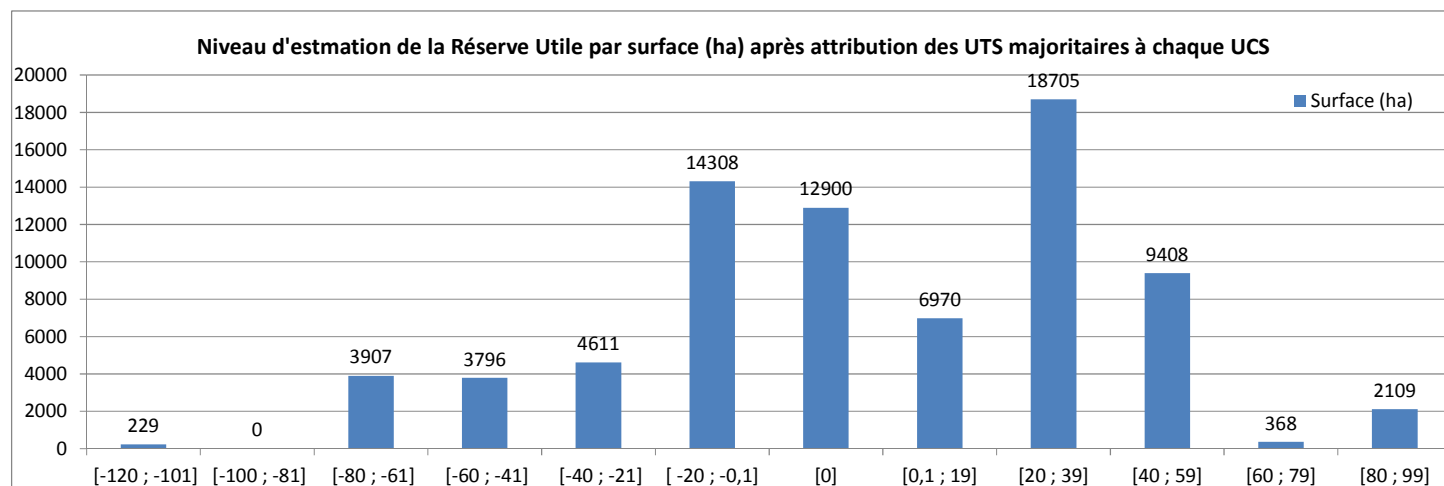
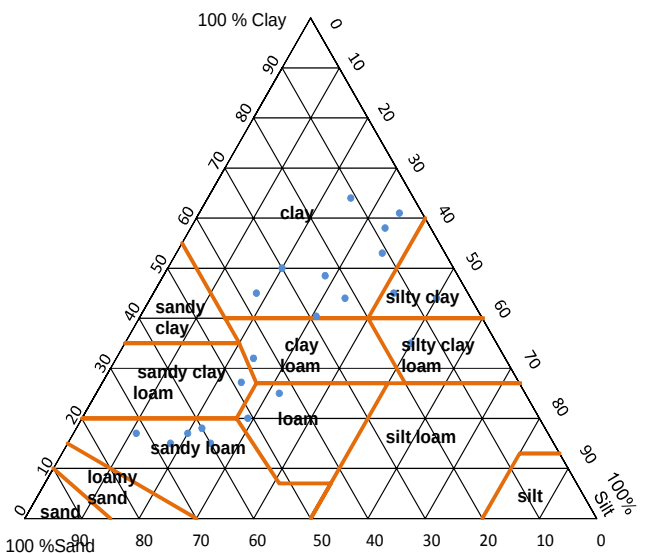
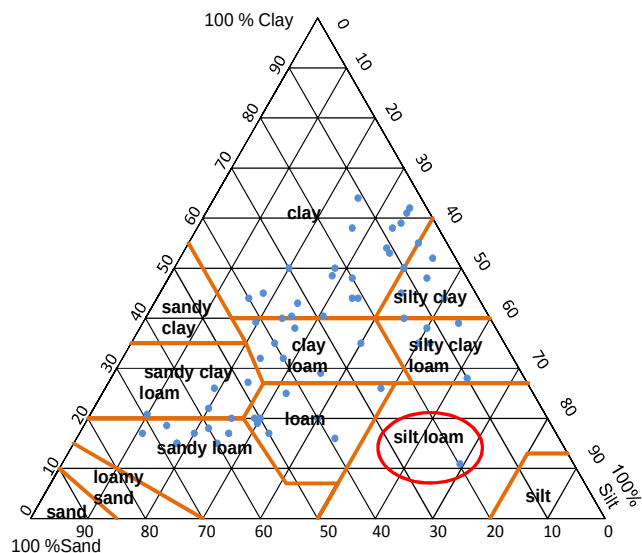
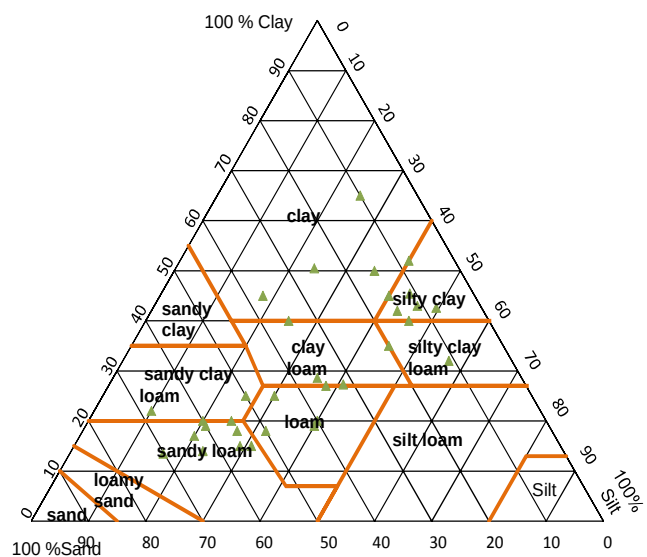
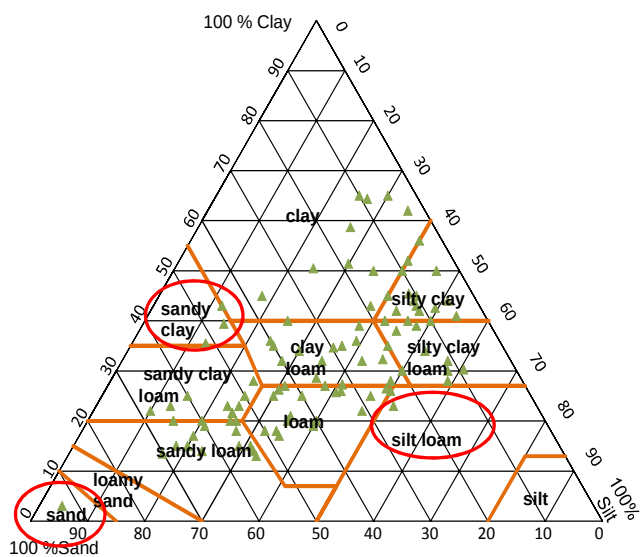
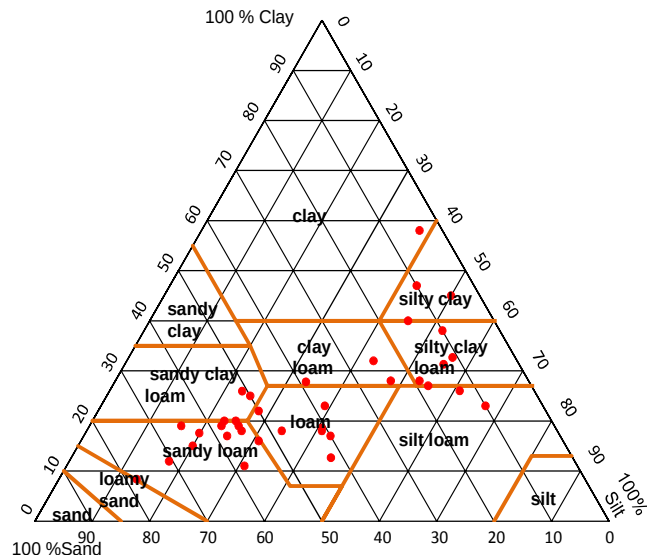
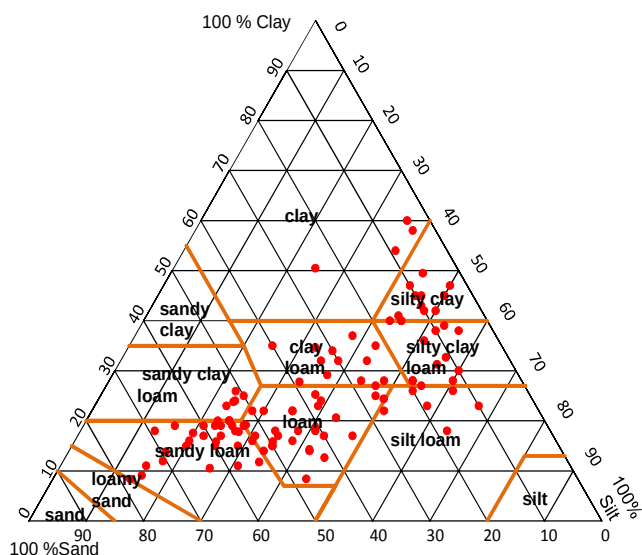


**Figure 25** : Histogramme de l'évolution de l'estimation de la RU après attribution des UTS majoritaires.



Textures des strates de la totalité des UTS de la zone d'étude

Textures des strates des UTS majoritaires

#### Légende :

- |                                               |                                                    |                                                 |                                                                                                                                                                                      |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <span style="color: red;">●</span> : strate 1 | <span style="color: blue;">●</span> : strate 2     | <span style="color: green;">▲</span> : strate 3 | <span style="border: 1px solid red; border-radius: 50%; width: 15px; height: 15px; display: inline-block;"></span> : classe de texture perdue par l'attribution des UTS majoritaires |
| <b>Clay</b> : Argileux                        | <b>Sand</b> : Sableux                              | <b>Silt</b> : Limoneux très fin                 |                                                                                                                                                                                      |
| <b>Clay Loam</b> : Limoneux argileux          | <b>Sandy clay</b> : Argilo-sableux                 | <b>Silty clay</b> : Argilo-limoneux             |                                                                                                                                                                                      |
| <b>Loam</b> : Limoneux                        | <b>Sandy clay loam</b> : Limoneux-argileux-sableux | <b>Silty clay loam</b> : Limono-argileux fin    |                                                                                                                                                                                      |
| <b>Loamy Sand</b> : Sablo-limoneux            | <b>Sandy Loam</b> : Limono-sableux                 | <b>Silty loam</b> : Limoneux fin                |                                                                                                                                                                                      |

Figure 26 : comparaison de l'étendue des diversités de textures par strate avant et après attribution des UTS majoritaires

- La texture.

La texture d'une strate représente sa composition en argile, limon et sable. Cette texture va influencer la structure, le réseau poreux, les propriétés de rétention en eau et de conductivité hydraulique.

Au final, le choix d'attribuer l'UTS majoritaire à toute l'UCS peut se traduire par la perte de la diversité des textures présente dans le bassin-versant. Ainsi, nous avons décidé de comparer, avant et après l'attribution des UTS majoritaires aux UCS, la dispersion des différentes classes de textures des strates du bassin-versant dans le triangle des textures de la FAO. Pour cela nous avons reporté sur le triangle des textures la composition de chacune des strates des UTS présentes dans la zone d'étude. Nous avons procédé de la même manière pour les strates des UTS majoritaires. Enfin, nous avons comparé les dispersions des points représentant la texture des strates pour l'ensemble des UTS puis pour les UTS majoritaires uniquement.

Le triangle des textures est un triangle équilatéral dont chaque côté correspond à un taux de matériau (argile, limon ou sable) en pourcentage. L'intérieur du triangle est divisé en compartiments qui représentent une classe de texture (limoneux argileux, sableux limoneux, etc...).

Les résultats sont présentés dans la page ci-contre (figure 26).

Dans les triangles du haut (strate 1), on peut remarquer que nous avons 8 classes de textures différentes quand nous prenons l'ensemble des UTS. Après l'attribution des UTS majoritaires, c'est-à-dire lorsque nous simplifions la réalité pour les besoins de la modélisation, nous conservons les 8 types de texture.

Pour la strate 2 (triangles du milieu) entre la situation où toutes les UTS sont représentées et la situation où seules les UTS majoritaires sont présentes, nous passons de 10 à 7 classes de texture.

Enfin, pour la strate 3, nous passons de 8 classes de textures à 7 classes.

Ainsi, nous perdons entre 0 et 3 classes de texture. De plus, nous pouvons remarquer qu'à chaque fois, les types de texture perdus sont minoritaires, c'est-à-dire qu'il y a seulement 1 à 2 individus dans le type de texture supprimé. Nous pouvons affirmer que l'attribution des UTS majoritaires à l'ensemble des UCS de la zone d'étude ne réduit pas de manière significative la diversité des classes de textures présente réellement dans les sols du bassin-versant. Cette précision est très importante car le bilan hydrique, et plus généralement le comportement de l'eau dans une strate, est très dépendant de la classe de texture de la strate. Conserver une diversité des textures des strates très proche entre la situation réelle et la situation modélisée est la garantie de données fiables et fidèles par rapport à la réalité. Les données en sortie du modèle n'en seront alors que plus pertinentes.

#### **4.2.2.2. Fichiers des caractéristiques des sols.**

Ce fichier comprend l'ensemble des données qualitatives et quantitatives dont ArcSWAT a besoin pour caractériser un sol. En effet, nous avons deux options pour attribuer les caractéristiques des sols dans le logiciel ArcSWAT :

Soit se servir des sols déjà présents dans la base de données du logiciel. Or ces renseignements correspondent à des sols américains et la similitude entre ces sols et ceux du bassin-versant de l'Arroux n'est pas garantie.



Soit entrer dans la base de nouveaux sols en renseignant toutes les valeurs nécessaires au logiciel. Nous disposons directement ou après calcul par des fonctions de pédotransfert, de l'ensemble de ces valeurs. Cette solution a été choisie.

Les valeurs demandées sont décrites dans le tableau 3. Ce tableau précise les unités des valeurs et l'origine de ces valeurs, à savoir si elles ont été extraites de la base Donesol v3 ou si elles ont été calculées à partir d'équations. Dans tous les cas, la base DoneSol v3 a été notre principale source de données puisqu'elle nous a fourni soit directement les valeurs à intégrer dans ArcSWAT, soit les valeurs demandées par les fonctions de pédotransfert générant ensuite les valeurs nécessaires au logiciel. Toutefois, les données dans DoneSol v3 n'étaient pas accessibles instantanément. Il a fallu réaliser une étude de la base de données et du dictionnaire de données pour bien comprendre l'organisation de la base. Nous avons ensuite créé les requêtes adéquates pour récupérer les données les plus pertinentes. Ce travail a duré deux semaines en raison de la taille importante de la base et du nombre élevé de relations entre les tables. Les principales étapes de ce travail étaient :

- ✓ L'étude de l'architecture de la base DoneSol v3.
- ✓ L'identification et localisation des données à exploiter.
- ✓ La création et l'amélioration des requêtes.

Nous ne pouvons pas détailler l'ensemble des requêtes réalisées, mais nous présentons, au travers du tableau 14, les tables, les champs et les valeurs sur lesquels ont porté les requêtes.

| Nom de la table | Nom du champ | Valeur recherchée                                                       | Description                                                                                                                                                |
|-----------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ucs             | nom_ucs      | nom_ucs                                                                 | Nom de l'UCS                                                                                                                                               |
| ucs             | no_ucs       | no_ucs                                                                  | Numéro de l'UCS                                                                                                                                            |
| ucs             | nb_uts       | nb_uts                                                                  | Nombre d'UTS dans l'UCS                                                                                                                                    |
| uts             | no_uts       | no_uts                                                                  | Numéro de l'UTS                                                                                                                                            |
| l_ucs_uts       | pourcent     | pourcent                                                                | Pourcentage de l'UTS dans l'UCS                                                                                                                            |
| uts             | nom_uts      | nom_uts                                                                 | Nom de l'UTS                                                                                                                                               |
| strate          | no_strate    | no_strate                                                               | Numéro de la strate de l'UTS                                                                                                                               |
| strate          | epais_moy    | epais_moy                                                               | Epaisseur moyenne de la strate                                                                                                                             |
| strate_quant    | nom_var      | ABONDANCE_EG;CALC_TOT;PH_EAU;TAUX_ARGILE;TAUX LIMON;TAUX SABLE; TAUX MO | Abondance en Eléments Grossiers, Taux de calcaire, pH, Taux d'argile, de limon , de sable et de matière organique dans la strate                           |
| strate_quant    | val_mod      | val_mod                                                                 | Valeur modale des variables ci-dessus                                                                                                                      |
| strate_quant    | unite        | unite                                                                   | Unité des variables                                                                                                                                        |
| l_ucs_uts       | forme_veg    | forme_veg                                                               | Forme végétale du couvert végétal (sert pour calculer la valeur LUTS2 de l'équation de Jarvis <i>et al.</i> (voir chapitre 4.2.2.5.)                       |
| strate_qual     | nom_var      | COULEUR                                                                 | Sélectionne la variable COULEUR                                                                                                                            |
| strate_qual     | mode_prin    | mode_prin                                                               | Donne la valeur principale de la variable COULEUR (sert pour calculer la valeur de l'ALBEDO dans l'équation de Post <i>et al.</i> (voir chapitre 4.2.2.6.) |

*Tableau 14 : Données de la base DoneSol v3 utilisées pour créer les requêtes d'extraction des données.*

Lorsque ce travail a été réalisé nous disposons de deux types de données :

- ✓ Des données que nous qualifierons de « directes », exploitables en l'état par ArcSWAT
- ✓ Des données « indirectes » permettant de générer grâce à des fonctions de pédotransfert d'autres données directement exploitables par le logiciel.

Les fonctions de pédotransferts sont donc des outils qui occupent une place centrale dans ce travail car elles ont permis de mener la paramétrisation à son terme. Nous allons



expliquer ce concept de fonction de pédotransfert, puis nous présenterons les équations dont nous nous sommes servis durant notre étude.

#### 4.2.2.3. *Les fonctions de pédotransfert.*

L'ensemble des opérations nécessaires pour connaître les différentes caractéristiques d'un sol est généralement coûteux et long à réaliser en laboratoire. Ce constat est encore plus marqué si les manipulations sont faites sur le terrain. Ces coûts élevés en temps et en argent représentent des limites dans l'étude des sols et de leurs composantes. Pour tenter de dépasser ces contraintes, les pédologues ont réalisé de manières empiriques des équations qui permettent de calculer certains paramètres des sols en fonction d'autres. Pour Girard, « il s'agit d'établir des relations logiques ou mathématiques, capables d'estimer des variables non mesurées à partir des variables disponibles dans les bases de données géographiques (Girard, 2011). Ces équations, appelées Fonctions de Pédotransfert (FPT), sont donc des outils basés sur des relations statistiques. Elles permettent d'évaluer et de prévoir les propriétés d'un sol à partir d'autres caractéristiques plus facilement mesurables ou observables in situ. En général, ces fonctions de pédotransfert sont établies par régression multilinéaire (Baize *et al.*, 2009).

Dans notre étude, le logiciel ArcSWAT nécessite de nombreuses données qui ne sont pas toujours renseignées dans les bases de données que nous avons à notre disposition. La base DoneSol v3 a, dans son architecture, l'ensemble des champs relatifs aux caractéristiques quantitatives et qualitatives d'un sol. Cependant, certains de ces champs ne sont pas remplis. C'est le cas par exemple de la densité apparente humide. Nous pourrions acquérir ces données manquantes par des prélèvements sur le terrain. Cependant cette solution est complexe et onéreuse. Nous devons donc passer par des fonctions de pédotransfert pour acquérir ces données absentes. Dans ce mémoire, les données à calculer par fonctions de pédotransfert sont détaillées ci-après.

#### 4.2.2.4. *La densité apparente humide (Keller *et al.*, 2010).*

La croissance des plantes est fortement affectée par le degré de compacité et la structure des sols. Un sol compact entraîne une forte résistance à la pénétration pour les racines et une faible porosité ne permettant pas l'aération du sol et un bon passage de l'eau (Hakansson, 2005). La densité apparente est le paramètre habituellement utilisé pour décrire la compacité du sol. Cette grandeur est très dépendante de la texture des sols et donc de leur composition en argile, limon, sable, mais aussi en matière organique. Keller (2010) a prélevé des échantillons sur 171 sites en Suède. Ces travaux ont abouti à la création d'une équation qui permet de définir la densité apparente en fonction de la texture des sols. La base Donesol v3 nous fournit ces informations de texture mais pas la densité apparente. L'équation de Keller nous sera d'une grande utilité pour renseigner une autre donnée en entrée du modèle SWAT. Le coefficient de corrélation  $r^2$  est de 0.81. L'équation ainsi définie se formule :

$$\rho = 1.308 + (0.0119 * \text{argile}) + (0.0103 * \text{sable}) - (0.00018 * \text{argile}^2) - (0.00008 * \text{sable}^2) - (0.00062 * \text{limon} * \text{MO}) - (0.00059 * \text{sable} * \text{MO}) \quad (\text{Equation 9})$$

Où  $\rho$  est la valeur de la densité apparente. Argile, sable et limon sont les taux des matériaux en % et OM le taux de matière organique en %.

Le logiciel ArcSWAT a besoin de la valeur de la densité apparente humide. Pour avoir cette valeur, nous ajouterons à la densité apparente sèche, la part d'eau contenue en théorie dans un échantillon de même texture. La formule est :

$$\rho_{\text{hum}} = \rho + (1 - \frac{\rho}{\rho_s}) \quad (\text{Equation 10})$$



Où  $\rho_{\text{hum}}$  est la densité apparente humide,  $\rho$  est la densité apparente sèche calculée à partir de l'équation de Keller et *al.* (2010) et  $\rho_s$  est la densité réelle moyenne du sol.

#### 4.2.2.5. La conductivité hydraulique (Jarvis et al., 2013).

La deuxième valeur à calculer était la conductivité hydraulique (K). De nombreux chercheurs ont travaillé sur le calcul de cette valeur en fonction du type de sol, de son utilisation et de facteurs climatiques. Cette variable permet de comprendre la répartition entre le ruissellement de surface et l'écoulement de l'eau dans le sol qui participe à la croissance des plantes et au rechargement des nappes souterraines. La conductivité hydraulique est donc un facteur important qui influence le développement des végétaux. La mesure de ce paramètre se fait habituellement sur des petits échantillons au laboratoire ou sur le terrain avec la technique des infiltromètres (Jarvis et al., 2013). Ces méthodes, coûteuses en temps et en argent ont été généralisées par des fonctions de pédotransfert.

Nous avons alors étudié deux publications, une de Vereecken et al. (1990) et l'autre de Weynants et al. (2009), qui proposaient une équation de modélisation de la conductivité hydraulique. Cependant, ces équations étaient obtenues avec de petits échantillons de sols prélevés dans le Nord de la Belgique, à forte teneur en sable et limon. Ces textures ne correspondaient pas à nos types de sol, qui avaient une tendance plus argileuse. De plus, la taille des échantillons utilisés n'est pas représentative de l'échelle à laquelle nous travaillons pour caractériser les sols de notre zone d'étude. L'utilisation de ces équations n'a pas donné de résultats exploitables pour le bassin versant de l'Arroux. Nous nous sommes alors appuyés sur une autre publication, celle de Jarvis (2013). Ses travaux prennent en compte la texture au travers de la densité apparente (voir ci-avant), le taux de carbone organique et l'occupation des sols. Ce dernier paramètre, nommé LUT2 (Land Use Traffic) dans la publication, est une valeur binaire (0 ou 1) affectée en fonction de l'occupation du sol. Si le couvert est de la prairie ou de la forêt, le paramètre LUT2 = 0, si c'est une culture, LUT2 = 1. Nous avons attribué la valeur en fonction de l'occupation du sol majoritaire de l'UTS, obtenu en croisant les données des couches Corine Land Cover et pédologique dans le logiciel ArcGis.

La formule de Jarvis est donc :

$$\text{Log } K_s = 3.796 - 5.083 \text{foc} - 1.152 * \rho - 0.454 * \text{LUT2} \quad (\text{Equation 11})$$

Où  $K_s$  est la conductivité hydraulique à saturation, foc est le taux de carbone organique,  $\rho$  est la densité apparente (calculée ci-avant) et LUT2, un coefficient binaire relatif à l'occupation du sol.

Cette équation nous a donné des valeurs très acceptables à dire d'experts et conformes aux résultats attendus pour les types de sol en présence dans la zone d'étude.

#### 4.2.2.6. L'albedo (Post et al., 2000).

L'albédo est le rapport entre le rayonnement solaire réfléchi par une surface et le rayonnement solaire incident. Il s'agit d'un nombre sans dimension compris entre 0 et 1. Plus une surface est obscure, et réfléchi par conséquent peu d'énergie solaire, plus son albédo est proche de 0. A contrario, un matériau ayant une albédo proche de 1, aura une couleur blanche. L'albédo d'un matériau est donc fortement corrélé à sa constitution et donc sa couleur. Ainsi, Post et al. (2000) ont pu mettre en évidence un lien entre la couleur du sol et son albédo. Pour cela, ils ont étudié 36 sols différents et les ont caractérisés en fonction de l'atlas colorimétrique de Munsell, qui permet de distinguer les couleurs en fonction de leur luminosité (value), de leur nuance (hue) et de leur pureté (chroma). Ainsi, Post et al. ne mettent pas en évidence de corrélation entre l'albédo et la nuance et la pureté d'un sol. En



revanche, ils réussissent à mettre en évidence une relation entre l'albédo et la luminosité du sol avec un très bon coefficient de corrélation ( $r^2$ ) égal à 0.93. L'équation est de la forme :

$$\text{SOL\_ALB} = 0.069 * (\text{value}) - 0.114. \quad (\text{Equation 12})$$

Où SOL\_ALB est la valeur d'albédo du sol et value est la valeur de la luminosité lue dans l'atlas de Munsell. Nous nous servons de cette formule pour calculer la valeur de l'albédo à renseigner dans le logiciel ArcSWAT.

#### 4.2.2.7. Le taux de carbone (Walkley et Black, 1934).

Le taux de carbone et le taux de matière organique ont une relation mise en évidence en 1934 par la méthode Walkley et Black. Ainsi, conventionnellement, on multiplie par 1.724 le taux de carbone pour avoir le taux de matière organique. La base Donesol nous fournit ce taux. La formule que nous avons appliquée est donc :

$$C = \frac{MO}{1.724} \quad (\text{Equation 13})$$

Où C est le taux de carbone en pourcentage et MO le taux de matière organique en pourcentage.

#### 4.2.2.8. Le facteur d'érodibilité du sol (Williams, 1995).

Certains sols s'érodent plus facilement que d'autres même si l'ensemble des caractéristiques sont identiques. Cette différence est nommée érodibilité du sol dans SWAT et peut être calculée par un ensemble d'équations développé par les travaux de Williams en 1995. L'auteur propose une méthode qui prend en compte la texture des sols et leur taux de carbone. Cela est très intéressant pour notre étude car nos sols, même s'ils sont assez argileux, ont des teneurs en limon, en sable et en carbone qui ne peuvent être négligées. Cette méthode a donc l'avantage de modéliser un coefficient d'érodibilité fortement corrélé à la réalité des caractéristiques des sols. Les équations à calculer sont donc :

$$\text{USLE\_K} = f_{\text{csand}} * f_{\text{cl-si}} * f_{\text{orgc}} * f_{\text{hisand}} \quad (\text{Equation 14})$$

Où :

- ✓  $f_{\text{csand}}$  (csand pour coarse sand – sable grossiers) est un facteur qui réduit la possibilité d'érosion pour les sols ayant un fort taux en sable grossier. En revanche, il donne des valeurs d'érodibilité élevées pour les sols contenant une grande partie de sable fin. Il est calculé par la formule :

$$f_{\text{csand}} = (0.2 + 0.3 e^{[-0.256 * m_s * (1 - \frac{m_{\text{silt}}}{100})]}) \quad (\text{Equation 15})$$

où  $m_s$  est le pourcentage de sable et  $m_{\text{silt}}$  celui de limon.

- ✓  $f_{\text{cl-si}}$  (clay-silt ratio) est un facteur qui donne des faibles valeurs d'érosion pour les sols ayant un ratio élevé d'argile sur limon. On l'obtient en posant l'équation :

$$f_{\text{cl-si}} = \left( \frac{m_{\text{silt}}}{m_c + m_{\text{silt}}} \right)^{0.3} \quad (\text{Equation 16})$$

où  $m_{\text{silt}}$  est le pourcentage de limon et  $m_c$  celui d'argile.



- ✓  $f_{orgc}$  (organic carbon) est un facteur qui réduit l'érodibilité des sols comprenant un fort taux de carbone. Ce facteur est égal à :

$$f_{orgc} = \left(1 - \frac{0.0256 * orgC}{orgC + e^{(3.72 - 2.95 * orgC)}}\right) \quad (Equation 17)$$

où orgC est le pourcentage de carbone contenu dans la couche.

- ✓  $f_{hisand}$  (hight sand) est un facteur qui donne une faible érosion aux sols ayant un taux de sable extrêmement élevé. Il est calculé grâce à la formule suivante :

$$f_{hisand} = \left(1 - \frac{0.7 * \left(1 - \frac{m_s}{100}\right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100}\right) + e^{[-5.51 + 22.9 * \left(1 - \frac{m_s}{100}\right)]}}\right) \quad (Equation 18)$$

où  $m_s$  est le pourcentage de sable.

#### 4.2.3. Création des classes de pente.

Le logiciel ArcSWAT prend en compte la pente du terrain que nous devons renseigner pour calculer les HRU. Ainsi, nous devons créer des classes de pente. Or, réaliser des classes de pente qui rendent bien compte de la réalité du terrain est un exercice difficile à appréhender. Nous aurions pu créer des classes en fonction des fréquences d'apparition des pentes. Ainsi, nous aurions eu :

- ✓ Classe 1 : 33% des pentes les plus faibles
- ✓ Classe 3 : 33% des pentes les plus fortes
- ✓ Classe 2 : 33% des pentes restantes.

Cette méthode n'était pas satisfaisante car les limites inférieure et supérieure de ces 3 classes sont totalement arbitraires ce qui conduirait probablement à placer dans des classes différentes des pixels d'un même ensemble géomorphologique (le versant d'une colline par exemple). Nous avons alors décidé d'adapter la discrétisation des pentes à l'objectif de notre démarche. Rappelons que ce dernier est de vouloir classer les pentes en fonction du comportement hydrique induit par leur pourcentage d'inclinaison. Ainsi, de créer des classes qui représentent bien la réalité du terrain, nous avons croisé deux types de paramètres qui correspondent aux objectifs de notre méthodologie :

- ✓ faire des classes qui sont représentatives des processus de ruissellement à dire d'expert
  - ruissellement impossible (0-3%),
  - ruissellement rare (3-7%)
  - ruissellement possible (7-11%)
  - ruissellement fréquent (11-22%)
  - fort ruissellement (>22%)

Ces classes présentes toutefois une part d'approximation car le ruissellement dépend de beaucoup d'autres paramètres

- ✓ faire des classes qui occupent un minimum de superficie du bassin-versant. En effet, une classe de pente qui occupe moins de 1% de la zone d'étude n'a pas beaucoup d'intérêt et conduirait également à dégrader le temps de calcul du modèle.

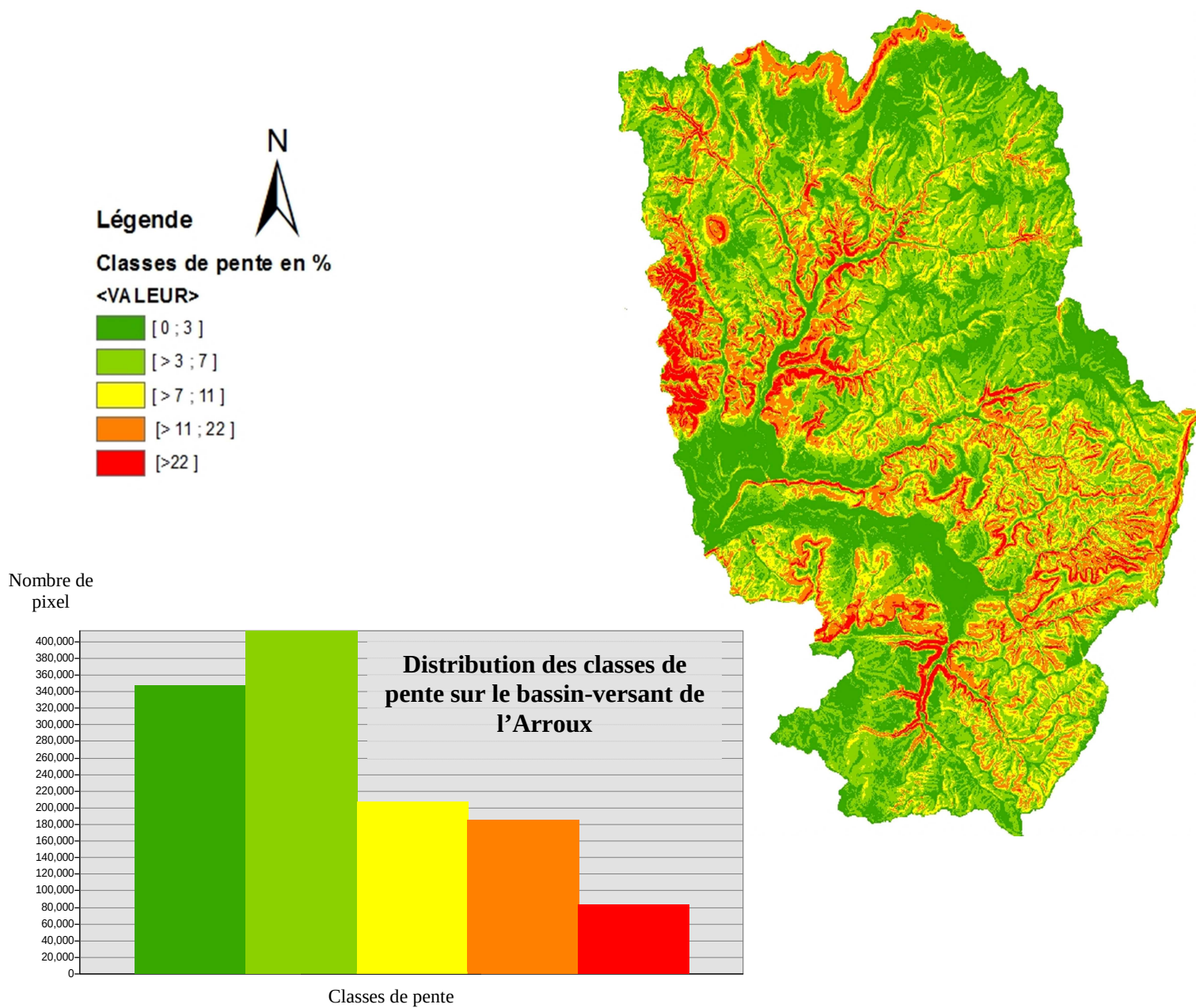


*Figure 27 : Histogramme et carte des distributions des classes de pente sur le bassin-versant de l'Arroux à Dracy Saint-Loup*

Ainsi, après plusieurs essais avec le logiciel ArcGIS, nous avons sélectionné des classes de pente qui correspondent à l'analyse des paramètres précédents et qui représentent une distribution normale. Les résultats de cette analyse sont présentés dans la figure 27 ci-contre. Les pourcentages des limites supérieures des classes de pente choisies à entrer dans le logiciel ArcSWAT seront donc 3%, 7%, 11%, 22% et supérieur à 22%.

### 4.3. Construction des données climatiques.

Les données climatiques à entrer dans le modèle sont décrites dans le chapitre 3.1.4. Le projet HYCCARE est composé d'une équipe de climatologues qui travaille spécifiquement sur la collecte des données climatiques et sur la création d'un climat continu en temps (pas de temps journalier) et en espace (sur la totalité de la région Bourgogne).

Ainsi, ces données n'ont pas nécessité de traitements particuliers autres que leur extraction depuis les bases de données des climatologues. Ces extractions ont été faites par des scripts sous le logiciel R.

Au niveau du choix des stations météorologiques, les climatologues avaient des données précises et fiables pour chaque maille de 3 km de côté sur l'ensemble de la région Bourgogne. Nous avons alors décidé de considérer les centres des mailles contenus dans le bassin-versant de l'Arroux comme autant de stations météorologiques. En effet, ayant des informations en grandes quantités et de qualité très satisfaisante, nous avons gardé la résolution de 9 km<sup>2</sup> (3 km x 3 km) comme résolution des données climatiques. Il aurait été dommage de dégrader cette précision compte tenu de la disponibilité des données et du travail des climatologues accompli depuis le début du projet.

Une interrogation devait toutefois être levée, à savoir si les données des climatologues n'étaient pas trop importantes pour le logiciel en termes de nombre de stations météorologiques et de quantité des valeurs des variables. Autrement dit, n'y avait-il pas trop de stations météorologiques et d'années de simulations ?

Le tableau 15 rappelle les caractéristiques des fichiers climatiques et leurs contenus à renseigner dans ArcSWAT.

| Nom des fichiers climatiques à renseigner          | Contenu                                         | Nombre                                                                                                         |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Weather Generator Data                             | Calculs statistiques                            | 1                                                                                                              |
| Fichiers de localisation des stations              | Renseignements sur les stations météorologiques | 5 ( soit 1 par variable: précipitations, températures, radiation solaire, vitesse du vent, humidité relative). |
| Fichiers des valeurs des variables météorologiques | Valeurs des variables météorologiques           | 1 par station et par variable ( ex : si 80 stations : 400 fichiers)                                            |

*Tableau 15 : Description des fichiers climatiques à entrer dans ArcSWAT.*

Concernant le fichier Weather Generator Data, la notice du logiciel précise que les calculs statistiques doivent être faits sur au moins 20 ans pour être fiables (Arnold *et al.*, 2012). Les calculs seront faits sur 100 ans de données. Les données entrées dans ce fichier ne seront pas limitantes.

Au niveau du nombre de stations météorologiques, il faut comprendre le fonctionnement du logiciel. Les différentes documentations de SWAT et ArcSWAT nous informent que l'ensemble des données renseignées (stations météorologiques et valeurs des variables précipitations, températures, radiation solaire, vitesse du vent et humidité relative - voir



figure 8 et tableau 15) servent à créer respectivement les fichiers .pcp, .tmp, .slr, .wnd, .hmd. qui agrègent les valeurs des variables aux stations. Le logiciel peut générer jusqu'à 18 fichiers pour .pcp et .tmp et un fichier pour .slr, .wnd et .hmd. Des tests ont été faits par l'équipe du logiciel SWAT avec 300 stations météorologiques par fichier, soit 5400 stations pour .pcp et .tmp et 300 pour les autres fichiers. Aucun problème n'a été signalé. (Arnold *et al.*, 2012, Winchell *et al.*, 2013). L'emprise du bassin-versant de l'Arroux est de 31 km sur 41 km soit 1271 km<sup>2</sup>. Chaque station est au centre d'un carré de 9 km<sup>2</sup>. Il y a donc 142 stations (1271 / 9) sur l'emprise de la zone d'étude, ce qui est bien supérieur à la réalité vu que le bassin-versant ne fait pas un rectangle parfait. Le nombre de stations météorologiques n'est donc pas un facteur limitant.

Quant au nombre de valeurs des différentes de variables, (nombre d'année de simulation) la documentation d'ArcSWAT précise qu'un maximum de 150 ans de données est autorisé. Les climatologues possèdent des données sur 100 ans. Donc le nombre de valeurs des différentes variables n'est également pas un facteur limitant (Winchell *et al.*, 2013).

Ainsi, l'ensemble de ces informations nous permet d'utiliser pleinement les données des climatologues du projet HYCCARE sans aucun risque d'incompatibilité avec les règles de fonctionnement du logiciel ArcSWAT.



## 5. Discussions.

Le travail que nous avons réalisé a permis de décrire et de tester une méthodologie pour générer des données qui seront entrées dans le logiciel ArcSWAT. Cette méthodologie comprend de nombreuses étapes qui sont toutes liées les unes aux autres. Nous pouvons citer par exemple l'identification des UCS et des UTS majoritaires sur la zone d'étude qui permettra de sélectionner dans les requêtes de la base DoneSol v3 uniquement les informations adaptées au territoire étudié. Cette méthode comporte des avantages et des inconvénients. La dernière partie du mémoire engage une discussion sur ces intérêts et ces limites.

### 5.1. Intérêts.

Le modèle méthode SWAT prend en compte de nombreux paramètres dans ses calculs. L'occupation du sol, le réseau hydrologique, les caractéristiques pédologiques etc... Cette multiplicité de facteurs et leurs interactions permettent de se rapprocher au plus près du fonctionnement réel du bassin-versant. Les données en sortie de modèle n'en seront que plus pertinentes et fiables à condition toutefois d'avoir paramétré les données en entrée avec une grande rigueur. La méthodologie décrite dans ce mémoire a pour objectif de faciliter la mise en place de cette rigueur.

Le logiciel ArcSWAT a besoin de nombreuses données sur le climat du bassin-versant à modéliser. Ces données pourraient être simulées par le logiciel, mais cette option aurait dégradé la pertinence et la fiabilité des résultats. Le projet HYCCARE est conduit par plusieurs équipes de chercheurs multidisciplinaires. Parmi eux, se trouve des chercheurs en climatologie dont le travail a permis d'établir une chronologie de qualité au pas de temps journalier des données climatiques. Ces données sont valables pour un maillage resserré du territoire (carré de 3km sur 3km). La méthode développée utilise le travail des climatologues qui est d'un grand intérêt en termes de qualité mais aussi de rapidité d'extraction. En effet, le plus long était d'écrire les scripts permettant de sélectionner dans la base de données des climatologues les informations à exporter. Ces scripts, désormais écrits, seront réutilisables pour l'étude des 12 bassins-versants restants. Nous estimons à moins d'une semaine le délai entre la demande des données aux climatologues et leur réception. De plus, les fichiers générés au format texte (.txt) étant peu volumineux, les échanges peuvent se faire par messagerie électronique, ce qui réduit les délais d'attente.

La base de données DoneSol a été également un élément déterminant dans la réussite de la mise en place de la méthodologie. En effet, ce programme d'étude des sols répertorie l'ensemble des caractéristiques qualitatives et quantitatives des UTS de Bourgogne. La version utilisée est DoneSol v3. Ces informations sont exploitables au travers de requêtes. Ainsi, cela revêt deux intérêts majeurs :

- ✓ La présence de ces données nous permet d'utiliser le moins de fonction de pédotransfert possible et de travailler sur les données réelles et non issues d'extrapolations ou de prédictions. Les données entrées dans le logiciel ArcSWAT n'en seront que plus fiables.
- ✓ L'acquisition de ces données au travers de requêtes est, dans un premier temps, long et contraignant notamment pour comprendre et maîtriser l'organisation de la base de données. Cependant, ce travail par requêtes est facilement exportable et réutilisable. En effet, les requêtes peuvent être transmises par messagerie électronique, les résultats des requêtes peuvent être exportés dans plusieurs formats différents (texte, tableau,



base de données). Cela permet dans un deuxième temps une acquisition et une exploitation des résultats beaucoup plus rapide.

Enfin, ce mémoire s'inscrit dans un travail de thèse sur l'ensemble des 13 bassins-versants du projet HYCCARE. La méthode pourra être réutilisée très prochainement et être testée. Cette dynamique montre bien l'intérêt du projet HYCCARE et surtout la nécessité de créer une méthode simple et facilement transposable à d'autres bassins-versants. L'homogénéité, la fiabilité et la disponibilité des données utilisées font partie des conditions qui ont favorisé la création de cette méthode.

## 5.2. Limites.

L'étude que nous avons réalisée présente des limites que nous allons développer.

Avant de travailler sur le bassin-versant de l'Arroux, nous avons sélectionné une zone d'étude plus restreinte pour nous familiariser avec le logiciel ArcSWAT, pour générer de manière beaucoup plus rapide les données et pour créer ces mêmes données avec une grande définition. La création d'informations ayant une grande finesse d'expertise n'est pas forcément rentable et les résultats de cette stratégie nous ont permis d'identifier des limites quant à l'analyse à mener sur la totalité du bassin-versant de l'Arroux.

- ✓ L'expertise fine des données prend beaucoup de temps notamment la délimitation des HRU.
- ✓ Ce travail de grande précision n'est pas réutilisé dans le logiciel ArcSWAT qui ne prend pas en compte la totalité de la finesse de l'analyse. En effet, lors de la création des HRU, le logiciel demande le pourcentage minimal des surfaces des UTS, des types d'occupation du sol et des classes de pente à prendre en compte. Par exemple, si nous mettons le seuil à 5%, toutes les surfaces dont le type d'occupation du sol est inférieur à 5% (urbain, eau etc..) ne seront pas prises en compte. Le principe est le même pour les UTS et les classes de pentes. Ainsi, on peut se poser la question de l'intérêt de caractériser avec minutie le territoire, si c'est pour ensuite ne pas utiliser cette finesse d'analyse.
- ✓ De plus, si nous paramétrons le logiciel ArcSWAT de manière à ce qu'il soit le plus précis possible, un grand nombre de HRU sera généré, ce qui dégradera les capacités de calculs du logiciel. Il faut donc faire un compromis entre finesse du paramétrage et temps de calculs pour être le plus efficace possible.

Ces remarques nous ont alors conduits à simplifier la réalité du terrain. Cela entraîne une dernière limite à notre travail. Modéliser le bassin-versant implique de perdre de la donnée. A chaque fois que nous créons une information, au niveau hydrologique, pédologique, ou climatique, nous nous éloignons de la réalité du terrain. Cela est une limite inhérente au processus de modélisation et nous ne pouvons que la prendre en considération. Cependant, pour tenter de dépasser cette limite, tous nos choix ont été justifiés et la perte d'information a toujours été identifiée et quantifiée. Cela permet d'apporter un regard critique mais objectif sur la qualité des données entrées dans le logiciel ArcSWAT.



## 6. Conclusion.

Le changement climatique est un phénomène dont les conséquences sur notre société ne sont pas encore totalement connues. Pourtant, nous devons nous adapter à cette modification du climat. Les données nécessaires à la mise en place de politiques d'adaptation ne sont pas toujours accessibles ou disponibles par les décideurs publics. Le projet HYCCARE a pour objectif de créer ce type de données (axe 1 du projet) et d'étudier les stratégies mises en place par les acteurs du territoire pour mettre en œuvre ces politiques d'adaptation (axe 2). Ce mémoire s'inscrit dans l'axe 1 et plus particulièrement dans la volonté de mieux connaître l'impact du changement climatique sur l'évolution du bilan hydrique grâce au fonctionnement du modèle SWAT. Cependant, une étape de paramétrisation est nécessaire avant de pouvoir faire fonctionner correctement ce modèle. L'objectif de ce mémoire a été de proposer une méthode pour identifier l'ensemble de ces réglages et les réaliser de manière optimale.

Les résultats obtenus lors de ce travail de mémoire montrent que la configuration d'un modèle de simulation climatique prend du temps. Tout d'abord, il est nécessaire de s'approprier le logiciel et les données nécessaires à son bon fonctionnement. Ensuite, il faut identifier comment créer ces informations et avec quelles autres sources de données. Enfin, il faut tester la fiabilité des données et leur conformité par rapport à la réalité du terrain. L'ensemble de ces opérations doivent faire l'objet de justifications pour réduire l'approximation des choix arbitraires. Ce mémoire a mis en œuvre une méthode qui regroupe l'ensemble des stratégies et de leurs justifications pour l'élaboration des données à implémenter dans le modèle. Cette méthode a été appliquée sur un bassin-versant pilote. Nous pouvons désormais identifier deux perspectives de travail à mener afin de compléter notre étude.

Tout d'abord, il conviendrait maintenant de tester la méthode à plus grande échelle pour évaluer son efficacité. C'est d'ailleurs ce que propose de réaliser prochainement un travail de thèse qui étudie les aspects hydrologiques de la totalité des 13 bassins-versants sélectionnés par le projet HYCCARE.

Ensuite, une autre perspective serait d'analyser les données en sortie de simulation après avoir fait fonctionner le modèle SWAT via le logiciel ArcSWAT. Cela permettra de vérifier la conformité des résultats avec des valeurs de références et, le cas échéant, de recalibrer le modèle en modifiant la précision des données entrées. Cette phase opérationnelle du modèle SWAT sera l'occasion de confirmer la pertinence de la méthode développée dans ce travail et d'identifier les éventuelles évolutions à apporter afin d'accroître la fiabilité des prédictions obtenues.



## **- BIBLIOGRAPHIE -**

- Agreste**, 2013. *Memento de la statistique agricole*. Côte d'Or, Nièvre Saône-et-Loire, Yonne. Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt. 24 p.
- Arnell N.**, 2003. *Climate change and global water resources : SRES emissions and socio-economic scenarios*. Global Environmental Change, 14, p. 31–52
- Arnold J. G., Kiniry J. R., Srinivaran R., Williams J. R., Haney E. B., Neitsch S. L.**, 2011. *Soil and Water Assessment Tool, input/output file documentation, version 20012*. 650p. Document téléchargeable en ligne à l'adresse : <http://swat.tamu.edu/documentation/>
- Baize D., Bellanger L., Tomassone R.**, 2009. *Relationships between concentrations of trace metals in wheat grains and soil*. Agronomy for Sustainable Development, 29 : 297–312.
- Bates B. C., Kundzewicz Z. W., Wu S. et Palutikof J.P.**, 2008. *Le changement climatique et l'eau*. Document technique publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Secrétariat du GIEC, Genève, 236 p.
- Beauchamp J.**, 2006 *L'eau et le sol* [En ligne]. Disponible sur : « [www.u-picardie.fr/beauchamp/mst/eau-sol.htm](http://www.u-picardie.fr/beauchamp/mst/eau-sol.htm) ». Consultée le 30 mars 2014.
- Bruand A., Duval O., Cousin I.**, 2004. *Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à partir de la base de données SOLHYDRO : Une première proposition combinant le type d'horizon, sa texture et sa densité apparente*. Étude et Gestion des Sols, 11, pp 323-332.
- Callendar, G. S.**, 1938. *The Artificial Production of Carbon Dioxide and Its Influence on Temperature*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 64, n°. 275 ,pp. 223-240.
- Calvet R.**, 2013. *Le sol*. 2<sup>e</sup> édition. Edition France Agricole. 678 p.
- Chaponnière A.**, 2005. *Fonctionnement hydrologique d'un bassin versant montagneux semi-aride. Cas du bassin versant du Rehraya (Haut Atlas marocain)*. Institut National Agronomique Paris-Grignon. 268 p.
- Dee, D. P., Uppala S. M., Simmons A. J., Berrisford P., Poli P. et. al.**, 2011. *The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 137, pp 553 – 597.
- Duchaufour P.**, 2000. *Introduction à la science du sol*. Dunod Edition. Paris. 331p.
- Fock S.**, 2013. *Les enjeux de la ressource en eau face au changement climatique en Bourgogne. Représentativité des bassins versants choisis pour les simulations*. Mémoire pour l'obtention du Master 1 Transport, Mobilité, Environnement, Climat. 54p.
- GICC**, 2012. *HYCCARE Bourgogne : Réponse à l'Appel à Projet de Recherche*. 23p.
- GIEC**, 2007. *Bilan 2007 des changements climatiques*. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. GIEC, Genève, Suisse, 103 p.
- Girard M.-C., Walter C., Rémy J.-C., Berthelin J., Morel J.-L.**, 2011. *Sols et environnement*. 2e édition. DUNOD. 881 p.
- Glacken C. J.**, 1967. *Traces on the Rhodian shore*, Berkeley, University of California Press.



- Hakansson I.**, 2005. *Machinery-induced compaction of arable soil, incidence – consequences – counter-measure*. Reports from the division of soil management, 109.154 p.
- INRA**, 2012. *DoneSol version 3, dictionnaire des données*. Rédigé par INRA, Unité Scientifique 1106, Info sol. Orléans. 478 p.
- Jarvis N., Koestel J., Messing I., Moeys J., et Lindahl A.**, 2013. *Influence soil, land use and climatic factors on the hydraulic conductivity of soil*. Hydrology and Earth Sciences, 71, 5185 – 5195.
- Keller T., Hakansson I.**, 2010. *Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content*. Geoderma, 154, 398 -406. Elsevier science.
- Lacroix A., Laurent F., Ruelland D., Sauboua E.**, 2005. *Nitrate pollution risk assessment : from the model to the indicator*. International Journal of Agricultural Resources, Governance and Ecology, vol. 5, n°. 2/3, p. 206-223.
- Lang M., Wellens J. et Tychon B.**, 2011. *ArcSWAT manuel d'utilisateur, Cas du bassin versant du Kou (Burkina Faso)*. 70p.
- Mouhot, J. F.**, 2012. *Du climat au changement climatique : chantiers, leçons et défis pour l'histoire*. Cultures et conflits, n°. 88, pp. 19 -42.
- Musy A., Soutter M.**, 1991. *Physique du sol*. Presses polytechniques et universitaires romandes, 335p.
- Post D. F., Fimbres A., Matthias A. D., Sano E. E., Accioly L., Batchily A. K., et Ferreira L. G.**, 2000. *Predicting soil albedo from soil color and spectral reflectance data*. Soil science Society of America Journal, 64, 1027 – 1034.
- Ruelland D., Laurent F., Trebouet A.**, 2004. *Spatialisation des successions culturales à partir d'images HRV de SPOT pour une intégration dans un modèle agro-hydrologique*. Télédétection 4. p.231-250.
- Sergent A.-S., Rozenberg P., Bréda N.**, 2012. *Douglas-fir is vulnerable to exceptional and recurrent drought episodes and recovers less well on less fertile sites*. Annals of Forest Science.
- Thiebault M.** 2010. *Modélisation hydrologique d'un scénario de changement climatique sur le bassin-versant du Bani avec SWAT*. Mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur de l'ENGEES. 55 p.
- Toussaint H.** 2012. *Réponse à l'appel d'offre recherche du GICC 2012*. 23 p.
- Toussaint H.** (ALTERRE Bourgogne), 2013. *HYCCARE Bourgogne, choix des bassins versants pour simulation hydroclimatique : Validation et argumentaire du choix*. 14p.
- Ubertosi M., Vautier A., Curmi P., Lamy C., Toussaint H., Castel T., Richard Y., Amiotte-Suchet P.**, 2009. *Évaluation de la réserve en eau à l'échelle des pédopaysages de Bourgogne*. 33e journées scientifiques GFHN. Teneur en eau et transferts en milieux poreux : mesures et statistiques à l'échelle stationnelle, Aix en Provence, 25 - 26 novembre 2009.
- Vallon S.**, 2013. *Impact du changement climatique sur le bilan hydrique : comparaison des modèles STICS et SWAT*. Mémoire pour l'obtention du Master I Sciences de l'Environnement. 64 p.
- Vereyken H.**, 1995. *Estimating the unsaturated hydraulic conductivity from theoretical models using simple soil properties* Geoderma, 5, 81 – 92. Elsevier science.



- Vereecken H., Maes J., et Feyen J., 1990.** *Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties.* Soil science, 149. 12 p.
- Walkley A., BLACK A., 1934.** *Etude de la méthode Dejtjareff pour le dosage de la matière organique : modification apportée au dosage de l'acide chromique.* Soil Science, 37, 29-38.
- Weill S., 2004.** *Modélisation hydrodynamique du cycle de l'eau de pluie sur un sol incliné.* Rapport de DEA HHGG. Paris VI. 52p.
- Weynants M., Vereecken H., et Javaux M., 2009.** *Revisiting Vereecken pedotransfer functions : introducing a closed-form hydrologic model.* Vadose zone journal, 8. 10 p.
- William J. R., 1995** *The EPIC model. Computer models of watershed hydrology.* Water resources Publication. Pp 909-1000.
- Winchell, M., Srinivasan, R., Di Luzio, M., Arnold, J., 2013.** *ArcSWAT Interface for SWAT2012 –User's Guide.* 464p.



## **- RESUME -**

Le changement climatique est dorénavant communément accepté par l'ensemble des communautés scientifique et politique. Cette nouvelle situation climatique aura des conséquences sur de nombreux aspects de notre société. Les effets de ce changement doivent donc être clairement identifiés à l'échelle des territoires pour établir des stratégies d'adaptation. Or, les données à l'échelle régionale ne sont pas toujours disponibles et accessibles aux décideurs publics pour mettre en place ces stratégies. Le projet HYCARRE a pour objectif de développer d'une part ces données manquantes à l'échelle de la Bourgogne et d'autre part d'étudier les relations et les synergies mises en place entre les décideurs du territoire. Parmi les données à élaborer, celles portant sur l'impact du changement climatique sur la ressource en eau de bassins-versants font l'objet d'une étude particulière dans le projet HYCCARE. Des précédents travaux ont permis de sélectionner 13 bassins-versants à étudier et de choisir SWAT comme modèle de simulation.

L'objectif de ce mémoire est donc de faire fonctionner le modèle SWAT via le logiciel ArcSAWT, sur un bassin-versant pilote, celui de l'Arroux, parmi les 13 du projet HYCCARE. Ainsi, une méthodologie sera créée. Les principales difficultés et les étapes clés dans la configuration du modèle seront alors mises en évidence. Pour atteindre ce but, nous serons confrontés à la problématique qui est de savoir **comment créer un bassin versant virtuel dont le comportement hydraulique sera aussi proche que possible de celui du bassin-versant réel pour modéliser le remplissage de la Réserve Utile des sols via ArcSWAT dans une situation de changement climatique ?**

Afin de répondre à cette problématique, nous avons analysé les caractéristiques des données à entrer dans le modèle, puis nous avons créé ces données en précisant leur degré de qualité par rapport à la réalité du terrain. Enfin, nous avons discuté sur les intérêts et les limites d'une telle démarche.

**Mots clés** : modèle, réserve utile, bilan hydrique, changement climatique, ArcSWAT,

## **ABSTRACT**

Nowadays climate change is collectively accepted by all the scientific and political communities. This new climatic situation will have consequences on numerous aspects of our society. Thus, the effects of climate change must be clearly identified on the scale of territories in order to establish adaptation strategies. However, the data on a regional scale are not always available and accessible to the public decision-makers to set up these strategies. The HYCARRE project has for objectives, in one hand, to develop these missing data on the scale of Burgundy and on the other hand to study the relations and the synergies between the decision-makers of the territory. Among the data to be developed, those concerning the impact of the climate change on the water resources of hillsides ponds are the objective of a particular study in the project HYCCARE. Previous works allowed to select 13 hillsides ponds to be studied and to choose ArcSWAT as the model for simulation.

Thus, the objective of this report is to run the model SWAT with ArcSWAT software, on the catchment pilot area of Arroux among 13 others, to create a methodology and highlight the main difficulties and the key stages in the configuration of the model. To reach this purpose, we shall be confronted with the problem which is to know **how to create a virtual catchment basin with a hydraulic behavior as close as possible of the real catchment basin to model the water holding capacity filling via ArcSWAT in a situation of climate change?**

To answer this problem, we analyzed the data characteristics to be entered into the model, and then we created these data by specifying their degree of quality compared to the reality of the ground. Finally, we discussed the interests and the limits of this approach.

**Keywords**: model, water holding capacity, hydric balance sheet, climate change, ArcSWAT.

