



SIMFEN, Service Interopérable de Modélisation des flux d'eau (et de nitrate)

Table des matières

Préambule	1
1. Introduction.....	1
1.1 Présentation de la zone d'étude	1
1.2 Description du projet SIMFEN.....	1
1.3 État de l'art : Modélisation hydrologique et services web.....	2
1.4 Mise en place du projet.....	3
2. Matériels	4
2.1 Réseau hydrographique.....	4
2.2 Stations hydrométriques	5
2.3 Mesures hydrométriques.....	5
2.4 Modèle numérique de terrain	6
2.5 MNTSurf.....	7
2.6 PyWPS	7
2.7 Interface web et MViewer	7
3. Méthodologie.....	8
3.1 Correction hydrologique du MNT	8
3.2 Calcul des informations des bassins versants sources	9
3.3 Calcul et stockage de l'inversion	10
3.4 Service WPS	10
3.5 Modélisation hydrologique	10
3.6 Simulation d'un débit.....	11
3.7 Développement web	11
4. Utilisation du service WPS SIMFEN : interface web.....	13
5. Conclusion et perspectives.....	14
5.1 Bilan des deux premières années du projet.....	14
5.2 Propositions dans le cadre de la troisième année.....	15
Bibliographie	19
Annexes	22
1. Annexe 1	23
1.1. Configuration du WPS.....	23
1.2. Configuration du serveur Apache2	23
1.3. Création d'un process	24
2. Annexe 2.....	26
2.1. Création du package R.....	26
2.2. Package R	26

3.	Annexe 3	28
3.1.	Logiciel SIG : cas de QGIS pour l'utilisation du service WPS	28
3.2.	Script : cas de Python pour l'utilisation du service WPS	28
4.	Annexe 4	31

Préambule

Dans le cadre de l'Appel à Manifestation d'Intérêt pour l'acquisition et le partage de connaissances dans le domaine de la gestion intégrée de l'eau, Agrocampus Ouest a déposé un projet de Service Interopérable de Modélisation des Flux d'Eau et de Nutriments (SIMFEN), coordonné par Christophe CUDENNEC (professeur à Agrocampus Ouest). Ce projet s'effectue en lien avec l'IRSTEA Antony, GéoBretagne, la DREAL Bretagne et l'Observatoire de l'Eau en Bretagne.

Ce projet s'appuie sur les travaux développés à l'UMR SAS Agrocampus Ouest – INRA depuis les années 2000, en particulier les développements récents développés lors et autour de la thèse d'Alban de Lavenne (2013) concernant la modélisation de flux d'eau. Ceux-ci vont être intégrés dans un service web sous PyWPS respectant la norme OGC WPS. Ce service va permettre à toute personne de simuler des débits en tout point du réseau hydrographique breton sans nécessiter des compétences informatiques et hydrologiques.

Les outils qui seront disponibles sur ce service web permettront aux gestionnaires des bassins versants, en particulier, de mieux quantifier le fonctionnement hydrologique de leur territoire. Ces outils étant également accessibles à tous, de nouveaux besoins et utilisations pourront également émerger à l'usage.

1. Introduction

1.1 Présentation de la zone d'étude

La Bretagne représente un territoire de 27209 km². Elle est découpée en 18 secteurs hydrographiques, eux-mêmes divisés en 110 sous-secteurs hydrographiques (source : IGN, BD Carthage). Le suivi du débit des cours d'eau est assuré par un réseau de 123 stations contrôlant 58% du territoire régional, principalement à l'aval des bassins versants. Ces stations sont gérées par la DREAL Bretagne et souvent en cogestion avec d'autres partenaires. Les mesures sont archivées dans la banque de données nationale HYDRO, consultable sur [internet](#). Ces données devraient être accessibles en 2020 à partir d'un service web, nommé Hub'Eau : <https://hubeau.eaufrance.fr/page/api-hydrometrie>.

1.2 Description du projet SIMFEN

L'objectif du projet est de développer et de déployer un service web interopérable de modélisation permettant la simulation des flux d'eau en tout point du réseau hydrographique breton. L'enjeu principal est de mettre à disposition des gestionnaires et du public des outils web qui, d'une part, concrétisent des méthodes très récentes de modélisation hydrologique et, d'autre part, s'appuient sur des développements hydro-informatiques innovants.

Cela permettra d'avoir des chroniques de débit en tout site d'intérêt non jaugé en transposant les données des stations hydrométriques existantes (BD HYDRO). Ces sites peuvent correspondre à des lieux de diagnostic ou de gestion de la qualité de l'eau tels que des prises d'eau, des ouvrages hydrauliques, des plans d'eau, des zones vulnérables, des sites d'observation d'autres variables et des embouchures. La prise en compte de l'exutoire des cours d'eau entrant dans une masse d'eau, typiquement des fleuves côtiers alimentant une baie ou des cours d'eau entrant dans une retenue, permet en outre d'aborder des thématiques d'interface terre-mer ou terre-étang/lac.

La généralisation aux flux de Nitrate associés à l'eau, est envisagée dans le cadre d'une troisième année, de même que l'élargissement au-delà de la Bretagne, dans le bassin de la Loire.

1.3 État de l'art : Modélisation hydrologique et services web

Selon l'Organisation Météorologique Mondiale, les services hydrologiques permettent de fournir des informations et des recommandations sur le passé, le présent et le futur de l'état des rivières, lacs et d'autres surfaces en eau, dont les souterraines. Pour cela, il est nécessaire d'utiliser et produire des données, effectuer des simulations et définir des scénarios de gestion.

Parmi les informations principales en hydrologie, le débit des cours d'eau est très important pour les prises de décision. Cependant, cette information n'est pas disponible sur la totalité des réseaux hydrographiques, mais uniquement aux endroits où il y a des stations de mesures. De ce fait, beaucoup d'efforts ont été initiés depuis plusieurs années pour être capables de simuler les débits sur des bassins non jaugés (Blöschl *et al.* 2011, Hrachowitz *et al.* 2013, Pomeroy *et al.* 2014).

Le modèle utilisé ici repose sur la régionalisation et une transposition à base géomorphologique. En hydrologie, la régionalisation permet de transférer les informations hydrologiques d'un bassin jaugé à un bassin non jaugé (He *et al.* 2011). La modélisation à base géomorphologique permet d'assurer une généralité et une robustesse de la simulation des débits sur les bassins non jaugés. La géomorphologie d'un bassin versant est une donnée facilement observable et importante pour estimer les débits (Beven and Wood 1993). Les hydrologues ont étudié le lien entre l'organisation du réseau hydrographique et le fonctionnement d'un bassin versant (Cudennec 2000). Ainsi, un bassin versant non jaugé peut être décrit sans nécessiter l'acquisition de données sur le terrain.

Le modèle utilise le concept d'Hydrogramme Unitaire Géomorphologique ou GUH (Dooge 1959, Surkan 1969, Rodríguez-Iturbe and Valdés 1979, Gupta *et al.* 1980) qui est un hydrogramme unitaire obtenu à partir de l'analyse du réseau hydrographique. Cette information permet d'estimer la probabilité d'écoulement d'une goutte de pluie à travers le bassin et le temps assimilé. Pour obtenir cette information, il est donc nécessaire de calculer la Fonction de Transfert à base géomorphologique (TF) du bassin par une analyse morphométrique du réseau hydrographique (Cudennec 2000, Boudhraâ *et al.* 2006, 2009, 2018, Boudhraâ 2007). Cette information est calculée à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) pour obtenir la distance hydraulique de chaque pixel jusqu'à l'exutoire du bassin. Avec cette information, la vitesse d'écoulement moyenne du bassin peut être estimée pour être employée par le modèle lors des étapes d'inversion et de convolution.

Pour avoir cette information, le MNT doit être corrigé hydrologiquement. En effet, un MNT peut être produit à partir de différentes sources de données (radar, laser, orthophotographies, numérisation) ayant différentes résolutions spatiales. De ce fait, des erreurs de pentes peuvent être produites et donc, modifier les caractéristiques hydrologiques des bassins versants, voire même empêcher le calcul de celles-ci. Ces erreurs sont dues à des pics ou des dépressions de valeurs qui peuvent être corrigés à partir de modèles de corrections et qui ont évolué en termes de temps de traitements pour prendre en compte les développements informatiques et les résolutions spatiales toujours plus fines (Jenson and Domingue 1988, Planchon and Darboux 2002, Barnes *et al.* 2014, Zhou *et al.* 2016). Cependant, certains de ces modèles peuvent produire des plateaux rendant impossible d'identifier la direction d'écoulement. Cette limite est prise en compte dans d'autres modèles en produisant un micro-dénivelé. Il est également possible de sur-creuser le MNT (Nagel *et al.* 2011) au niveau du réseau hydrographique en employant un référentiel hydrologique, telle la BD CARTHAGE® (IGN) ou le Réseau Hydrographique Etendu (Pella *et al.* 2008). Avec cette information géomorphologique et des mesures effectuées sur des bassins versants jaugés, il est possible d'exécuter le modèle et donc, mettre en place le service web.

Un service web est un ensemble d'applications situées sur un serveur accessible via internet au travers de protocoles d'échanges d'informations standardisés (Curbera *et al.* 2002). Ces standards ont été définis par le World Wide Web Consortium (W3C). Ces protocoles sont :

- le Web Service Description Language (WSDL) permettant de décrire un service web (Chinnici *et al.* 2007),

- le Simple Object Access Protocol (SOAP) qui permet l'échange d'informations par internet (Mitra and Lafon 2007),
- l'Universal Description, Discovery and Integration (UDDI) qui est un annuaire de services.

Dans le cadre de ce projet, le service web va être développé selon le standard pour les traitements spatiaux OGC Web Processing Service (WPS) (Čepický and De Sousa 2016).

Un service web est une solution efficace pour rendre accessible des traitements et données (Goodall *et al.* 2008, Kadlec and Ames 2011). Pour accentuer l'intérêt d'un service web qui est accessible à tous, il est important de respecter également des standards vis-à-vis des données, comme le WaterML (Taylor 2011) pour les chroniques hydrologiques ou le Geography Markup Language (GML) (Portele 2007) pour les données spatiales. Ainsi, il est aisé d'ajouter des services web au sein de chaînes de traitements déjà existantes (Granell *et al.* 2010, Castronova *et al.* 2013, Goodall *et al.* 2013, Turuncoglu *et al.* 2013) si elles utilisent déjà ces standards. Cela permet également à toutes personnes dans le monde de pouvoir utiliser ces services (Kadlec and Ames 2011) grâce à cette interopérabilité.

Ensuite, en produisant une interface web pour le service, il est possible de développer un ensemble d'outils permettant de traiter, analyser et ajouter les résultats avec des outils spécifiquement développés tout en assurant l'accessibilité et l'ergonomie de ceux-ci (Granell *et al.* 2010, Squividant *et al.* 2015, Rosatti *et al.* 2018). De ce fait, les limites dues à l'exécution de modèles, le matériel et la compétence requise pour traiter les données sont restreintes, rendant l'outil attractif et utilisable par tous. De plus, employer un service web pour collecter des données à intégrer dans une chaîne de traitement permet de limiter la duplication, la maintenance et le coût de stockage de celles-ci tout en accentuant leur utilisation (Goodall *et al.* 2008, Bera *et al.* 2015).

Ainsi, dans le cadre de ce projet, un service web reposant sur des protocoles standards d'échanges et de données est produit pour rendre accessible à tous une modélisation hydrologique à base géomorphologique. Rendre cela accessible a nécessité de collecter et corriger un modèle numérique de terrain qu'il sera nécessaire de conserver. Ensuite, de par la régionalisation du modèle, l'utilisation de mesures de débit sur les cours d'eau est requise. Pour cela, un service web est employé pour collecter ces informations auprès des gestionnaires de la base de données hydrométriques. Le service web effectue donc le prétraitement, la collecte des données, la simulation des débits et d'autres actions permettant de fournir à l'utilisateur des résultats le plus simplement possible.

1.4 Mise en place du projet

Pour la réalisation de ce projet, il a été nécessaire de mettre en place une architecture permettant une efficacité optimale des traitements, faciliter la maintenance et l'évolution des outils qui sont développés. Pour cela, un effort notable en termes de généricité est effectué. De ce fait, l'ensemble des codes et réflexions pourra être réemployé dans d'autres projets ou pour développer de nouveaux outils.

Ainsi, une forge GitLab ayant pour but de faciliter le développement et la collaboration au niveau des scripts a été produite. De même, cette forge étant accessible à partir d'une interface web, les outils produits sont disponibles en permanence à toutes personnes qui pourraient en avoir besoin dans le cadre de leurs projets.

Concernant les données nécessaires au projet, une base de données PostgreSQL/PostGIS sur un serveur spécifique de l'Agrocampus Ouest a été produite. Cette base de données permet de :

- utiliser la puissance des Systèmes de Gestion de Base de Données (SGBD) vis-à-vis du langage SQL et de l'accessibilité aux données,
- centraliser en un même endroit l'ensemble des données du projet et de manière pérenne et optimale (mise à jour),
- rendre facilement accessibles ces données à d'autres personnes qui pourraient en avoir besoin,

- mettre en place de services et des outils employant une base de données,
- standardiser le stockage et le format des données,
- stocker différents types de données tout en permettant un aspect relationnel entre celles-ci.

Ensuite, le service web nécessite la mise en place d'un Web Processing Service (WPS). C'est un standard défini par l'Open Geospatial Consortium (OGC). Il décrit les règles de normalisation des entrées/sorties (demandes et réponses) pour les services de traitement de données géographiques. Le fonctionnement d'un WPS est le suivant :

1. Le client WPS émet une requête en direction du serveur de WPS en indiquant le nom du processus à exécuter et les paramètres en entrée,
2. Le serveur de WPS lance l'exécution du processus sur le serveur,
3. Le serveur de WPS retourne au client le résultat du processus.

Ainsi, une implémentation de la norme WPS en langage python, PyWPS, a été installée et configurée sur le serveur de calcul.

Puis, l'interface web du service sera un add-on à ajouter au visualiseur déjà employé par l'UMR SAS et développé par GéoBretagne, le MViewer. De plus, des données spatiales seront disponibles à l'affichage et proviendront d'un GeoServer administré par l'UMR SAS ou récupéré via des flux WMS ou WFS.

La Figure 1 représente l'architecture mise en place :

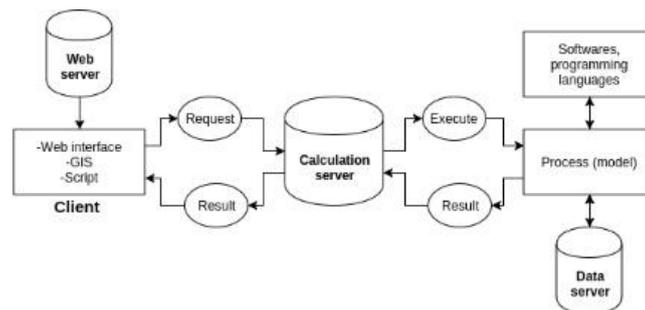


Figure 1: Représentation de l'architecture du service web SIMFEN

2. Matériels

La simulation des débits et le fonctionnement du service SIMFEN nécessitent de nombreuses données. Celles-ci concernent principalement des informations sur le territoire, les bassins et les débits mesurés. La méthodologie employée utilise plusieurs langages de programmation et logiciels (R, Python, MNTSurf, JavaScript).

2.1 Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique représente l'ensemble des milieux aquatiques (plans d'eau, cours d'eau, eaux souterraines, zones humides, etc...) présents sur un territoire donné, le terme de réseau évoquant explicitement les liens physiques et fonctionnels entre ces milieux (source : Agence de l'eau). Dans le cas présent, le réseau va se limiter aux cours d'eau et sera affiché dans l'interface web, mais aussi employé pour des traitements.

En France, plusieurs réseaux hydrographiques sont disponibles. Tout d'abord, il y a celui issu de la BD CARTHAGE® qui se présente comme le référentiel national. Elle est produite par les Agences de l'eau à partir de la base de données cartographique BD CARTO® de l'IGN. Cependant, ce référentiel présente des erreurs par endroits, telles des boucles ou des discontinuités, empêchant de modéliser une direction d'écoulement unique. Un réseau hydrographique corrigé et issu de la BD CARTHAGE® est

disponible, il s'agit du **Réseau Hydrographique Etendu (RHE)** (Pella *et al.* 2008). Ce réseau présente une compatibilité complète avec la BD CARTHAGE®, tout en présentant des arcs parfaitement jointifs, orientés de l'amont vers l'aval et les plus naturels dans la classification CARTHAGE®.

Cependant, le RHE n'est pas exhaustif, c'est une simplification de la BD CARTHAGE®. De ce fait, il est envisagé d'employer **la BD TOPAGE®** lorsque celle-ci sera disponible. En attendant, ce réseau a été récupéré à l'échelle de la Bretagne pour étudier sa composition, ses attributs et pour commencer à développer des scripts pour nettoyer celui-ci afin de l'employer dans le cadre de ce projet. De ce fait, un effort envers la pérennité de ce projet est effectué en permanence.

Le réseau hydrographique est utilisé pour corriger le MNT en effectuant un surcreusement de celui-ci pour s'assurer que le réseau simulé du MNT passe exactement au même endroit que le référentiel employé. En effet, il est important de localiser exactement le réseau pour générer les bassins versants. De plus, ce réseau permet à l'utilisateur de se repérer et de s'assurer que celui-ci va simuler les débits à l'emplacement du réseau. Cela permet également de rattacher automatiquement les stations hydrométriques sur le réseau si celles-ci ont été enregistrées avec un décalage afin de générer leur bassin versant.

2.2 Stations hydrométriques

Ce sont des stations de mesure où sont effectués des relevés sur un ou plusieurs des éléments relatifs aux cours d'eau, plans d'eau et réservoirs : hauteur d'eau, débit, transport et dépôt de matériaux, température et autres propriétés physiques et chimiques de l'eau (source: BRGM).

Ces stations ne sont pas installées en tout point du réseau ni sur tous les bassins versants. Le projet SIMFEN a donc pour objectif de compenser ce manque. Les débits des bassins jaugés sont alors employés pour simuler le débit en tout point du réseau hydrographique (technique de régionalisation).

Il est possible d'ajouter les stations dans la base de données, mais étant donné la disponibilité d'un service web sur GéoBretagne met à disposition les données de débits de toutes les stations hydrométriques de Bretagne pour l'année en cours. Cela permet de récupérer les données de débits des stations dynamiquement, mais aussi la localisation des stations sans avoir besoin de les stocker dans la base de données SIMFEN que nous avons créée. La disponibilité de ce flux direct en temps réel évite tout problème de mises à jour. Le lien direct avec le service sur Geobretagne facilite aussi les requêtes utilisées dans SIMFEN qui contiennent des requêtes spatiales comme "rechercher les stations présentes dans un rayon de 50 kilomètres à partir d'un point". La migration vers le service Hub'Eau lorsqu'il sera terminé sera aisée.

Cette donnée permet de savoir quelles stations ont été employée pour effectuer la simulation de débits, mais aussi pour permettre à l'utilisateur de sélectionner manuellement les stations qu'il souhaite employer si la méthode automatique ne lui convient pas.

2.3 Mesures hydrométriques

Les débits sont mesurés par des stations hydrométriques placées sur le réseau hydrographique. Ces mesures sont mises à disposition dans la [banque HYDRO](#) par les services de l'Etat principalement, telles les Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL). Ces producteurs de données installent les stations de mesure en rivière, assurent leur maintenance, recueillent les données, les vérifient et en alimentent la banque. Ils réalisent des jaugeages aux endroits des stations de mesure et établissent les courbes de tarage qui figurent également dans la banque. Ensuite, ils valident, et éventuellement corrigent les données. Ils en sont responsables et veillent à leur qualité.

Cependant, il n'est pas efficient de passer par cette banque de données pour plusieurs raisons :

- le téléchargement des débits s'opère en remplissant un formulaire en plusieurs étapes, rendant complexe l'automatisation des téléchargements,
- il semble que le téléchargement des données ne soit pas fiable sur une longue période (erreur de données ou valeurs manquantes),
- il est impossible d'effectuer des requêtes attributaires ou spatiales sur les stations et débits.

La bancarisation des données n'est pas envisageable pour des raisons réglementaires et techniques.

Pour cette raison, un partenariat avec la DREAL a été discuté (F. Phung, O. Nauleau) pour avoir un accès direct à la base de données ou bien la mise en place d'un service web pour le téléchargement des débits. Celui-ci existe déjà sur le site de GéoBretagne (<https://cms.geobretagne.fr/content/hydrometrie-en-bretagne>), mais avec seulement les débits de l'hydrologique en cours (actuellement 2018-2019) et les données sont au pas de temps journalier et non pas variable. Il a été demandé des archives plus conséquentes sur GéoBretagne (par ex. 10 ans) ; cette solution est en attente de réponse de la DREAL. Elle serait temporaire en attendant la mise en place du service Hub'Eau qui permettra d'effectuer des requêtes dynamiques sur toutes les données, sans limite historique et sans problème de maintenance ou mise à jour.

2.4 Modèle numérique de terrain

La transposition d'hydrogramme s'effectue par une modélisation hydrologique à base géomorphologique, information accessible à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT). C'est une représentation de la topographie d'un territoire sous la forme d'image (raster). Il provient de la BD ALTI V2¹ et a une résolution spatiale de 25 mètres..

Cette seconde version n'est plus issue des courbes de niveau, mais à partir de plusieurs sources de données :

- le laser (LIDAR) sur les zones inondables, littorales et les grands massifs forestiers avec une exactitude altimétrique pour ces zones comprises entre 0.2 et 0.5 mètre,
- le radar pour les zones de montagne (Alpes, Pyrénées, Cévennes et Corse) avec une exactitude altimétrique de 7 mètres en cas de forte pente,
- corrélation de photographies aériennes avec une utilisation du recouvrement stéréoscopique en zone urbaine. Dans certaines zones, en cas de manque de mesures au sol, des données altimétriques anciennes sont utilisées. L'exactitude de ces zones est de 0.5 à 0.7 mètre.

Cependant, il est nécessaire de prétraiter cette donnée avant de l'employer pour modéliser les flux. Ces prétraitements consistent à corriger les pics et dépressions présents dans le MNT pour pouvoir calculer une direction d'écoulement unique pour chaque pixel. De plus, l'utilisation du réseau hydrographique permet de forcer le MNT à suivre celui-ci. Cette étape est nécessaire, particulièrement dans les zones de plateaux, où le lit du cours d'eau ne se distingue pas des berges (Figure 2).

¹ La BD ALTI V2 est une version sous-échantillonnée du RGE ALTI. Des sources de données de la BD ALTI V1 ont été employées pour le RGE et donc pour la BD ALTI V2, mais uniquement en cas d'absence de données

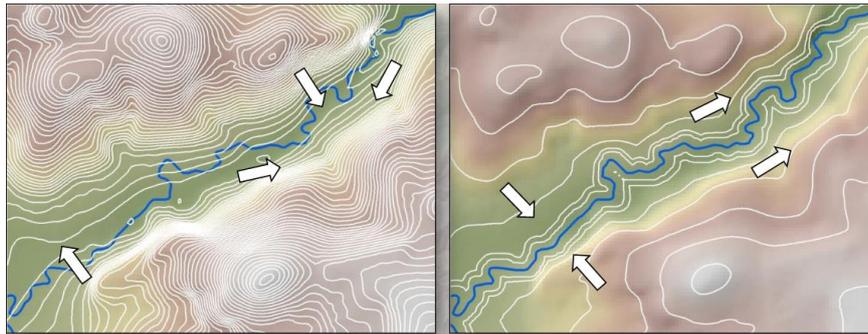


Figure 2: Représentation du traitement consistant à forcer le MNT à suivre le réseau hydrographique (source : Nagel et al. 2011)

Le MNT permet de générer les bassins versants et calculer la longueur hydraulique des bassins, des informations primordiales pour modéliser les débits. Le MNT a été intégré de manière tuilée et pyramidée dans la base de données SIMFEN.

2.5 MNTSurf

MNTSurf est un logiciel, dédié aux traitements des MNT et à la modélisation hydrologique (Aurousseau and Squiquidant 1996). Étant développé au sein de l'UMR SAS, il est aisé d'apporter des évolutions à cet outil selon les besoins du projet SIMFEN, tout en rendant accessibles ces évolutions à tous, étant donné qu'il est accessible via un service web.

MNTSurf va permettre de calculer:

- le réseau hydrographique et la direction d'écoulement,
- le contour du bassin versant à partir d'un point sélectionné,
- la longueur hydraulique.

2.6 PyWPS

Le standard OGC ®Web Processing Service (WPS) permet de définir les règles d'appels et réponses entre un client et un serveur pour les traitements de données géographiques. Pour comprendre et utiliser ce standard, il est nécessaire de posséder les outils pouvant dialoguer avec celui-ci. C'est le cas de la librairie PyWPS (Čepický and De Sousa 2016), écrite en Python, qui permet de produire des process avec ce langage tout en permettant d'utiliser les capacités de ce langage pour le traitement des données.

La version PyWPS installée correspond à la version 4.2.1 disponible sur GitHub. La configuration de cette librairie passe par plusieurs étapes qui sont décrites dans la documentation de celle-ci. Elle permet de développer un service OGC ®WPS avec efficacité. Cependant, la documentation n'est pas exhaustive et cette technologie, même si elle existe depuis longtemps, n'est pas répandue. De ce fait, la recherche d'informations en cas de difficulté n'est pas aisée et un travail d'analyse des codes de cette librairie et de tests ont été réalisés. Grâce à cette expérience, l'UMR SAS dispose d'une expérience accrue dans ce domaine.

2.7 Interface web et MViewer

Dans le cadre de ce projet, une interface web ergonomique, accessible et spécifiquement conçue pour ce projet a été réalisée. L'interface web se base sur le MViewer qui est un visualiseur cartographique développé par GéoBretagne et basé sur OpenLayers 5.3.0 et Bootstrap 3.3.6. Ce visualiseur est déjà

employé par l'UMR SAS dans le cadre d'autres projets. De ce fait, les fonctions et outils développés² pour ce projet ont été ajoutés au visualiseur existant.

Le fonctionnement de ce visualiseur a été adapté pour pouvoir intégrer des formulaires permettant aux utilisateurs de renseigner des informations. Des développements spécifiques ont été produits pour envoyer des informations au serveur WPS, suivre l'avancement d'un traitement, récupérer les résultats et les rendre accessibles au téléchargement et à la visualisation.

Un ensemble de données sont disponibles à l'affichage pour permettre à l'utilisateur de se repérer spatialement. Une documentation est également accessible directement dans l'interface décrivant le contexte du projet, le fonctionnement des outils, les références bibliographiques et les crédits concernant les données, outils et financements. Cette interface web se veut complète et intuitive, tout en ayant une partie experte pour les utilisateurs qui possèdent les compétences pour se passer du mode simplifié.

3. Méthodologie

Cette partie regroupe les traitements qui ont été développés et effectués dans le cadre du projet SIMFEN. Cela va du téléchargement des données à la réalisation de l'interface web. L'objectif de ce service web étant de simplifier ce traitement pour l'utilisateur, plusieurs informations ont été pré-configurées dans un fichier. Cette méthode de travail permet également de faciliter l'installation de ce service sur un autre serveur, pour employer de nouveaux paramètres ou modifier ceux-ci simplement lorsqu'ils sont utilisés dans plusieurs scripts. Ces paramètres vont être utilisés pour l'ensemble des traitements qui vont suivre.

3.1 Correction hydrologique du MNT

La correction d'un MNT pour une utilisation en hydrologie nécessite de corriger tous les dépressions et pics produits lors de la génération du MNT. Le besoin de corriger ces anomalies provient du fait qu'elles vont modifier l'écoulement de l'eau au sein d'un bassin, mais aussi le réseau hydrographique modélisé. La principale méthode encore employée aujourd'hui au sein des logiciels ArcGIS et Grass GIS date de 1988 (Jenson and Domingue 1988). Cette méthode consiste à utiliser un MNT, identifier une direction d'écoulement unique et si un pixel n'en possède pas, la méthode va modifier l'altitude selon celle des pixels voisins. Le résultat final est donc un MNT sans dépression avec une direction d'écoulement pour chaque pixel.

Cependant, même si cette méthode est celle qui est la plus utilisée, elle est très lente avec la résolution spatiale des MNT d'aujourd'hui (Planchon and Darboux 2002). De plus, elle nécessite d'être effectuée plusieurs fois de manière consécutive afin de traiter l'ensemble des anomalies. Elle génère également des zones plane empêchant de déterminer une direction d'écoulement. C'est pour cela qu'un nouvel algorithme a été produit pour corriger plus rapidement un MNT, tout en produisant une légère pente (au besoin) pour éviter la création de plateaux (Planchon and Darboux 2002).

Puis, la résolution spatiale des MNT étant de plus en plus petite, des algorithmes permettant de corriger ceux-ci de manière plus rapide et peu coûteuse en ressources ont été développés. Tout d'abord, l'algorithme "Priority Flood", avec l'utilisation d'une file d'attente prioritaire (Barnes *et al.* 2014), qui est plus performant que l'algorithme de Planchon-Darboux tout en permettant également de produire une légère pente pour éviter les zones plane. Cet algorithme correspond à la combinaison des différentes méthodes de prétraitement produites et améliorées depuis plusieurs décennies.

Une variante de la méthode "Priority Flood" est proposée deux ans plus tard pour améliorer celle-ci en limitant de nombre de pixels traités (Zhou *et al.* 2016). Cette méthode permet d'améliorer

² Une forge GitHub a été réalisée pour l'add-on SIMFEN au MViewer et est accessible à cette adresse <https://github.com/geos/mviewer-simfen>.

drastiquement le temps de prétraitement d'un MNT. Ces deux derniers algorithmes ont été intégrés dans la bibliothèque "RichDEM" pour effectuer les corrections d'un MNT.

Cependant, la correction du MNT modifie drastiquement celui-ci, étant donné qu'il modifie les altitudes sur une certaine distance et profondeurs de part et d'autre du réseau, limitant son utilisation conjointe pour des calculs hydrologiques et géomorphologiques (Callow *et al.* 2007).

Ensuite, la modification du MNT pour une utilisation hydrologique peut se traduire par le surcreusement de celui-ci à partir d'un référentiel du réseau hydrographique. Cependant, cela peut provoquer des conflits entre des cours d'eau très proches faisant que le creusement de l'un impacte l'autre et crée des connexions qui n'existent pas (Nagel *et al.* 2011, Lindsay 2016). La résolution du MNT et le réseau hydrographique simplifié et corrigé permet de limiter ce phénomène. La méthode retenue actuellement se base sur une pondération inverse à la distance et se nomme IDDEA (Nagel *et al.* 2011). Un script Python a été produit pour effectuer ce traitement et potentiellement en faire un outil accessible sur le service web.

Le MNT hydrologiquement corrigé en utilisant le RHE avec la méthode IDDEA et l'algorithme "Priority Flood" (Barnes *et al.* 2014) est intégré à la base de données.

3.2 Calcul des informations des bassins versants sources

Dans le cadre de la modélisation des flux d'eau, les mesures effectuées à chacune des stations vont être employées afin d'estimer la pluie nette du bassin source. Ainsi, il est nécessaire de connaître l'emprise de celui-ci, mais aussi sa longueur hydraulique. Ces informations n'évoluant pas dans le temps ni selon les requêtes de l'utilisateur, il est possible de pré-calculer ces données afin d'accélérer les temps de traitements. De cette manière, il sera possible de faire des requêtes spatiales ou de charger ces données directement à partir de la base de données, sans avoir besoin de les calculer à chaque fois.

Pour effectuer cette étape, il est nécessaire de récupérer les coordonnées spatiales de l'ensemble des stations hydrométriques qui vont être employées. Dans le cas présent, une requête WFS est effectuée sur le service web de GéoBretagne pour récupérer un fichier GML contenant celles-ci. Ensuite, la coordonnée spatiale de chaque station est récupérée puis corrigée au besoin. En effet, les stations ne se superposent pas obligatoirement sur le réseau hydrographique. La modélisation du bassin versant requiert que la station soit présente sur les pixels du MNT correspondants au réseau hydrographique. Cette étape a été automatisée par l'utilisation de la base de données PostgreSQL avec l'extension PostGIS et le RHE qui est stocké dans la base de données et qui a été employé pour contraindre le MNT.

Pour cela, la fonction "ST_ClosestPoint" de l'extension PostGIS est employée. Cela permet d'utiliser la coordonnée de la station pour rechercher la coordonnée du point sur le réseau selon une distance euclidienne. Ainsi, cette nouvelle coordonnée correspondra à celle employée pour calculer le bassin versant. Une amélioration a été apportée à cette fonction pour permettre de se placer exactement au centre d'un pixel d'un MNT dans le cas où le MNT employé n'est pas sur-creusé ou bien si celui-ci possède un décalage spatial vis-à-vis du réseau hydrographique. En ne prenant pas en compte ce cas, il est possible que la coordonnée déterminée se situe entre deux pixels faisant qu'elle ne sera pas sur le réseau hydrographique, mais sur la terre.

Le script permettant de placer une coordonnée a été ajouté en tant que process disponible sur le service web. Celui-ci, en plus d'être employé pour corriger la localisation des stations sources, va être employé pour s'assurer que lorsque l'utilisateur indique où il souhaite simuler un débit, il soit certain d'être placé sur le réseau hydrographique.

Une seconde donnée a été identifiée comme pouvant être calculée une seule fois et non pas à chacune des requêtes des utilisateurs, il s'agit de l'inversion des débits mesurés aux stations pour estimer la pluie nette.

3.3 Calcul et stockage de l'inversion

La simulation des débits s'effectue en deux temps : l'inversion et la convolution. L'inversion s'effectue pour chacun des bassins sources et la convolution pour le bassin cible. Les bassins sources ne changent pas, d'où le pré calcul de ceux-ci, au contraire du bassin cible qui dépend du choix de l'utilisateur.

De ce fait, il est possible de calculer et stocker le résultat de l'inversion pour chacun des bassins sources. Cela a pour avantage d'accélérer drastiquement les temps de traitements, car cette étape est la plus coûteuse en temps et en ressources informatiques. En effet, plusieurs cas se sont présentés avant de faire ce choix :

- Calculer un par un chacune des inversions sachant que la simulation peut prendre jusqu'à 5 bassins sources à la fois. Ainsi, si chaque bassin nécessite 2 minutes pour effectuer l'inversion, il faut donc 10 minutes,
- Au lieu de faire cette étape en série, il a été décidé de la faire en parallèle, c'est-à-dire au lieu d'utiliser un processeur pour calculer chaque inversion à la fois, on utilise 5 processeurs pour les calculer toutes en même temps,
- Étant donné que plusieurs utilisateurs peuvent employer les mêmes stations pour leur simulation et compte tenu du coût en ressources de calcul de la méthode parallélisée, la méthode la plus intéressante en ressources et en gain de traitement correspond au pré calcul des inversions et à leur stockage dans une base de données. Le coût de stockage est très faible face à la quantité de données et leur utilisation est fortement facilitée grâce au langage SQL.

Ainsi, pour chaque bassin versant enregistré dans la base de données, le code de sa station hydrométrique est récupéré et utilisé pour effectuer une requête sur le service web de GéoBretagne pour récupérer les débits de cette station (selon les données disponibles sur le service). Ces débits sont alors téléchargés et utilisés pour effectuer l'inversion. Étant donné que le modèle permet de simuler des débits au pas de temps journalier et horaire, l'inversion est effectuée au pas de temps le plus fin puisqu'il sera parfaitement possible de recréer l'information journalière à partir de celles-ci. Dans la base de données, une pluie nette issue de l'inversion est identifiée selon le code de sa station/bassin, la date correspondant à celle-ci et sa valeur.

Le script effectuant ce traitement peut être automatisé pour s'effectuer, par exemple, toutes les semaines pour mettre à jour les inversions en ajoutant continuellement des nouvelles données issues de nouvelles mesures sans nécessiter d'interventions humaines. L'automatisation peut être effectuée à partir d'un serveur Jenkins ou bien Cron. Ces outils sont également capables d'envoyer des mails pour indiquer si les mises à jour se passent correctement ou non.

3.4 Service WPS

Le service web mis en place dans le cadre du projet SIMFEN a pour objectif de permettre à toute personne, même sans compétence informatique, d'effectuer une transposition d'hydrogramme à base géomorphologique sur le réseau hydrographique breton. D'autres outils seront ajoutés au fur et à mesure pour l'exploitation, l'analyse et le monitoring des données simulées. Les étapes de configuration du service et de la création d'un outil sont disponibles en Annexe 1.

3.5 Modélisation hydrologique

Initiée dans les années 2000 (Cudennec 2000, Boudhraâ *et al.* 2006, 2009, Boudhraâ 2007), la modélisation à base géomorphologique a été particulièrement développée avec la thèse d'A. de Lavenne (2013) financée par la Région Bretagne et par l'INRA. Cette modélisation s'appuie sur la description mathématique du réseau hydrographique, puis la déduction d'une fonction de transfert parcimonieuse de l'eau à base géomorphologique. L'inversion de cette fonction de transfert permet de déconvoluer les flux hydrologiques observés aux exutoires jaugés pour quantifier les échanges à l'interface entre

versants et cours d'eau, compte tenu des zones humides le cas échéant. Cette quantification permet ensuite de simuler les flux pour d'autres points du réseau hydrographique, par transposition vers des bassins emboîtés, voisins ou similaires. La méthode a été testée et validée autour du bassin versant de Naizin (ORE AgrHys), puis sur l'ensemble de la Bretagne.

La modélisation des flux d'eau s'effectue à partir de script R produit durant la thèse. La première étape a été de reprendre ses scripts afin de réaliser un package R permettant à chacun d'effectuer la modélisation sur son ordinateur, mais aussi pour employer ce package avec le service web (Annexe 2).

3.6 Simulation d'un débit

La simulation du débit est la fonction principale du service web SIMFEN. Elle fonctionne de la façon suivante :

1. Récupération des coordonnées spatiales de l'exutoire (point "cible" choisi par l'utilisateur) où simuler le débit et la période à calculer,
2. Lecture du fichier de configuration du process,
3. Initialisation de GRASS GIS (migration vers MNTSurf à réaliser),
4. Pré calcul de la forme du bassin versant "cible" avec MNTSurf (xy2watershed),
5. Génère le MNT nécessaire pour produire le bassin versant cible,
6. Calcule sa longueur hydraulique et son contour avec GRASS GIS,
7. Recherche les stations de mesures dans un rayon de 50km et ayant des mesures sur la période de simulation,
8. Produit un fichier vectoriel contenant l'emprise de tous ces bassins "sources" sélectionnés,
9. Calcule la distance de Ghosh de tous ces bassins pour ne conserver que les 5 bassins ayant la plus courte distance par rapport au bassin "cible",
10. Pour ces 5 bassins "sources", calcule leur "poids" pour pondérer la pluie nette simulée obtenue par la fonction inversion du package R,
11. Effectue une requête SQL sur la base de données pour récupérer la somme pondérée des pluies nettes des bassins sources et au pas de temps indiqué par l'utilisateur,
12. Convolue cette pluie nette sur le bassin "cible" pour estimer le débit à l'exutoire simulé,
13. Sauvegarde le résultat dans un fichier qui va être lu par le process pour générer le fichier XML de réponse.

3.7 Développement web

Le MViewer est un visualiseur possédant un fonctionnement et une interface qui s'inscrit dans la démarche empruntée par le projet SIMFEN. Ce visualiseur n'intégrant pas les outils nécessaires pour interagir avec un service WPS, ceux-ci ont été développés. Étant un outil open source, il est possible de partager ces travaux avec la communauté qui emploie ce visualiseur.

La première étape de ce développement a été de produire le formulaire où l'utilisateur va renseigner la période pour laquelle il souhaite simuler le débit. Ce formulaire va également posséder des paramètres optionnels orientés experts.

Pour produire celui-ci, il faut créer et modifier plusieurs fichiers dans plusieurs répertoires :

- `customlayers` : il faut créer un fichier dans lequel on va déclarer la couche correspondant au formulaire :

```
{
  mviewer.customLayers.waterFlowSimulation = {};
  mviewer.customLayers.waterFlowSimulation.layer = new ol.layer.Vector({
    source: new ol.source.Vector()
  });
```

```

    mviewer.customLayers.waterFlowSimulation.handle = false;
}

```

- customcontrols : un fichier JAVASCRIPT contenant tout le code de cet outil, c'est-à-dire permettant d'acquérir les données de l'utilisateur, envoyer la requête, suivre l'évolution du process, récupérer les résultats, afficher des données est produit. Cependant, les variables et fonctions présentes dans ce fichier sont cloisonnées à ce fichier. Ainsi, il peut être nécessaire d'ajouter une fonction que tous les outils peuvent employer ou alors, une modification de l'interface par défaut du MViewer (qui est partagé entre différents projets, donc impossible de la modifier directement). De ce fait, un customcontrols d'initialisation a été développé pour éviter de répéter des portions de codes entre les différents outils. De par le fonctionnement du MViewer, un layer serait obligatoirement affiché, gênant la lisibilité de l'interface web. C'est pour cette raison que ce fichier d'initialisation "s'auto supprime" après avoir exécuté son code. Dans ce même répertoire, un fichier HTML est produit, avec le même nom que le fichier JAVASCRIPT et qui va contenir les boîtes de dialogues et boutons avec lesquels l'utilisateur interagira.
- config.xml : pour que le visualiseur trouve les fichiers créés, il faut que ceux-ci soient référencés dans le fichier de configuration de celui-ci en tant que layer. De plus, il est impératif que l'id du layer et le nom des fichiers soient les mêmes pour que le visualiseur soit capable de les trouver.

Voici un résumé de la configuration du MViewer (Figure 3):

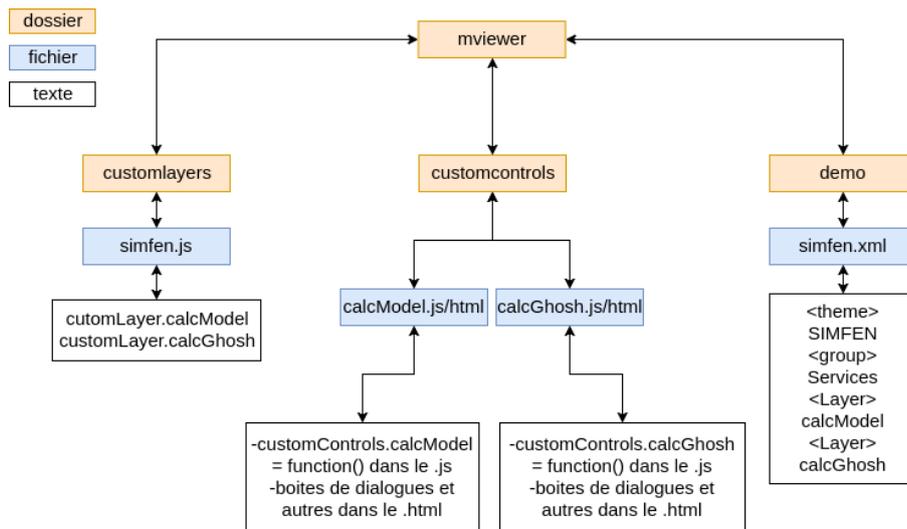


Figure 3: Organisation du MViewer

Le suivi de la progression se fait à partir d'une écoute du fichier XML de réponse avec la bibliothèque XMLHttpRequest. De cette manière, une lecture continue de ce fichier est effectuée pour lire l'évolution du statut puis du résultat. Ainsi, voici un organigramme permettant d'avoir une idée globale de l'outil web permettant de simuler un débit (Figure 4):

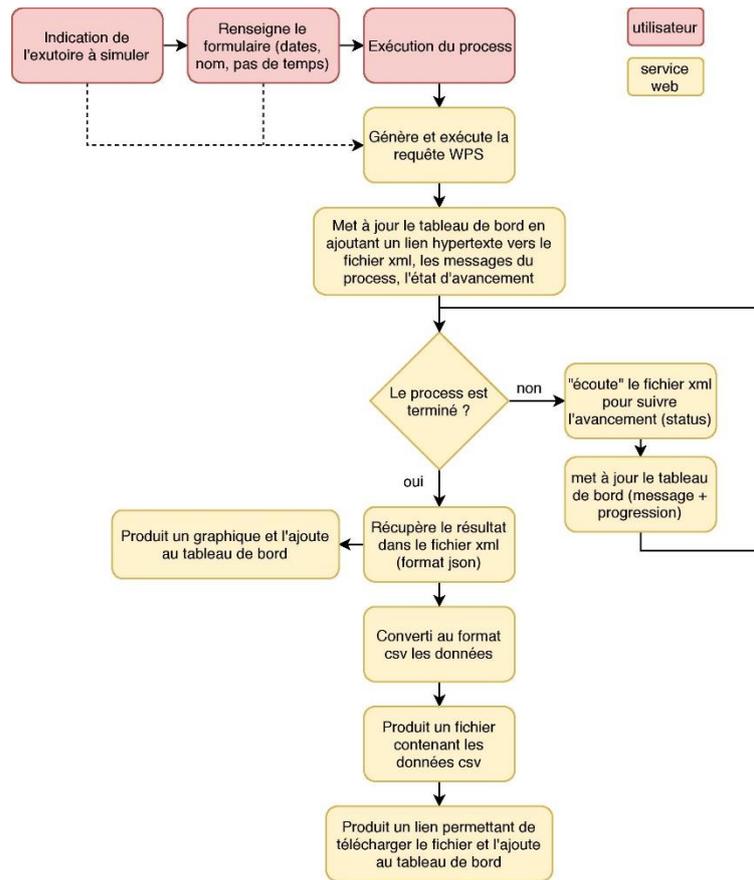


Figure 4: Méthode pour simuler un débit à partir de l'interface web

Ainsi, la partie la plus importante et complexe à développer a été le fichier présent dans le customcontrols. Les scripts commentés et la documentation de l'add-on SIMFEN sont disponibles à cette adresse <https://github.com/geosas/mviewer-simfen>. De plus, rendre compatible l'add-on avec les principaux navigateurs du marché (Firefox, Chrome, Internet Explorer, Edge, Safari) a nécessité d'effectuer de nombreux tests.

4. Utilisation du service WPS SIMFEN : interface web

De par l'interopérabilité du service, il est possible d'accéder à celui-ci à partir d'internet, d'un logiciel compatible avec le standard OGC WPS tel QGIS ou encore un script (28Annexe 3). Pour ce projet, une interface web a été développée spécifiquement pour cet outil. Celle-ci a pour objectif de collecter les informations nécessaires à l'exécution du modèle, mais aussi d'afficher les résultats de la simulation. Elle a été développée pour être la plus intuitive possible en limitant les étapes nécessaires pour exécuter le modèle.

De plus, deux modes d'utilisation sont mis à disposition, c'est-à-dire un mode simplifié où l'exécution du modèle se résume à l'indication de la période de simulation et l'emplacement de la station à simuler, et un mode expert permettant d'influer sur des paramètres du modèle, par exemple la sélection manuelle des stations sources.

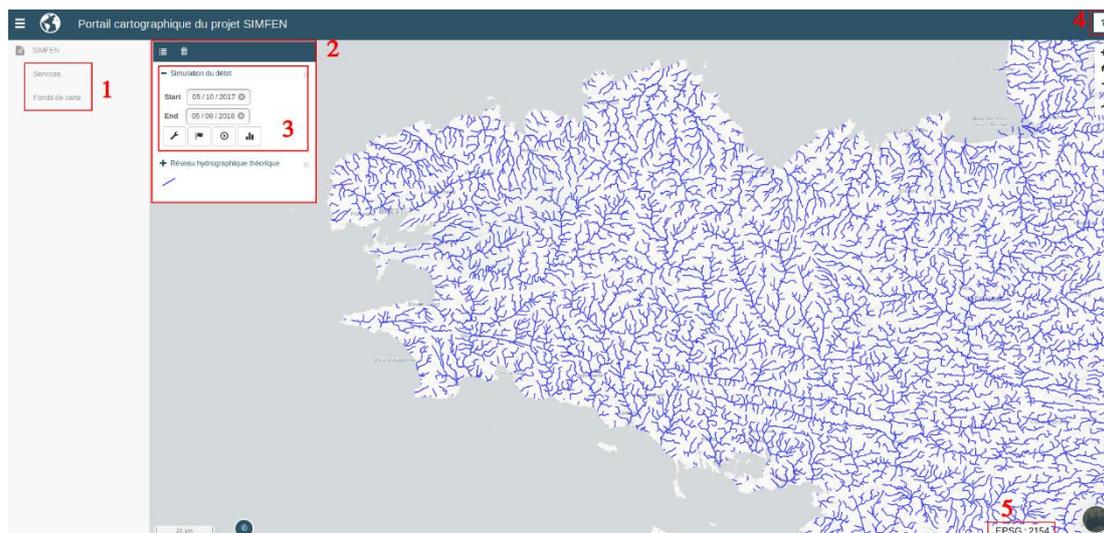


Figure 5: Interface web en mode simplifié du projet SIMFEN

1. Liste déroulante permettant d'afficher tous les services disponibles ou tous les fonds de carte.
2. Fenêtre regroupant les services (formulaire) et les couches affichées.
3. Boite de dialogue correspondant à la simulation des débits. Elle permet d'indiquer la période de simulation, mais aussi d'afficher des options expertes en appuyant sur la clé à molette, de localiser l'endroit où on souhaite simuler le débit via le drapeau, de lancer la simulation en cliquant sur le bouton play et d'afficher la fenêtre contenant les résultats avec l'histogramme.
4. Permet d'afficher la documentation du visualiseur.
5. Permet de connaître la coordonnée spatiale de la souris lorsqu'elle survole la carte.

Une fois la simulation terminée, des fichiers à télécharger sont proposés à l'utilisateur et correspondent à 1) la simulation des débits, 2) la licence d'utilisation des données et 3) aux données employées pour effectuer le calcul (métadonnées). Un graphique est généré dans un volet de l'interface pour visualiser le débit simulé, mais aussi pour afficher les débits des stations sources pour contrôler et comprendre la simulation. De plus, sur la carte sont affichés les différents bassins versants (des stations sources et cible) avec leur surface en km².

5. Conclusion et perspectives

Ce rapport permet de comprendre les travaux qui ont été réalisés durant les deux premières années du projet. Ces travaux s'appuient sur une veille scientifique et technologique en hydrologie, service web, télédétection et en développements informatiques pour la production du service interopérable SIMFEN.

5.1 Bilan des deux premières années du projet

Ce document a permis de contextualiser le projet par rapport aux développements hydro-informatiques actuels. Ceux-ci passent par la modélisation hydrologique, mais aussi par l'emploi des services web pour rendre accessible à tous des outils complexes. La diffusion, l'utilisation et la valorisation de ces outils deviennent alors possibles et très efficaces, que ce soit avec le grand public, des professionnels publics ou privés, des décideurs ou des chercheurs.

Ce projet a exploité l'ensemble des connaissances acquises grâce à l'état de l'art comme ajouter des services web dans une chaîne de traitements ou utiliser ceux-ci pour charger et diffuser de l'information à la volée.

Plusieurs choix de développement ont été effectués pour assurer une efficacité et une rapidité d'exécution des traitements pour s'assurer de leur utilisation. De nombreuses données ont été employées

pour réaliser ce projet, qui ont pour la plupart eu besoin d'être corrigées pour une application hydrologique.

L'interface web a été réalisée pour être la plus simple et puissante possible en utilisant des technologies éprouvées par l'UMR SAS. Enfin, le service WPS est utilisable de plusieurs manières en respect de l'interopérabilité annoncée au début du projet.

A la fin des 2 premières années du projet (juillet 2019), il sera ainsi possible de simuler des débits en tout point du réseau hydrographique breton sans nécessiter de compétences hydro-informatiques. La seule limite à dénoter actuellement et potentiellement d'ici la fin de la seconde année est l'emprise temporelle des données car nous sommes actuellement limités à la dernière année hydrologique disponible sur un service web de GéoBretagne. Suite à des échanges avec la DREAL, il a été acté que des chroniques beaucoup plus longues seront mises en lignes sur ce service.

Le service WPS a été produit pour répondre à la demande minimale qui est de simuler un débit en tout point du réseau breton. Une séance de travail est programmée le 26 mars 2019 avec une quinzaine d'utilisateurs potentiels (animateurs de BV et SAGE, gestionnaires, collectivités, instances publiques ...) qui auraient besoin de ce type de données pour calculer des flux d'eau ou de nutriments à différentes fins (suivi qualité eau, gestion quantitative, restauration des milieux aquatiques...). La séance permettra de tester-évaluer le prototype tant sur le plan technique qu'ergonomique, et de voir si les fonctionnalités développées répondent aux attentes des utilisateurs. Selon les retours des utilisateurs lors de cette séance, d'autres outils ou fonctionnalités pourront venir intégrer le service web SIMFEN d'ici fin juillet 2019.

Ce service est déjà en cours d'utilisation dans le cadre du projet ADAM (Analyse des données de qualité de l'eau et proposition d'Amélioration pour le Monitoring en Bretagne) pour apporter des simulations de débits, mais aussi effectuer un travail de comparaison par rapport aux données de débits simulés qu'ils utilisent, obtenus à partir du modèle GR4J (Génie Rural à 4 paramètres Journalier) développé par l'Irstea Antony. Ainsi, cette comparaison des débits simulés va être effectuée pour ensuite calculer des indices hydrologiques. L'influence des simulations de débits sur ces indices sera également étudiée. De cette manière, des méthodes d'évaluation de l'incertitude pourront être déterminées par la suite.

5.2 Propositions dans le cadre de la troisième année

Le projet présenté à l'AMI Eau (fin 2016) faisait état d'un travail sur 3 ans pour aboutir à un projet finalisé. Le projet a démarré en août 2017 et le prévisionnel des 2 premières années sera en grande partie atteint en juillet 2019. Nous proposons de mettre en œuvre le programme de travaux de la 3^{ème} année, adaptés aux contraintes rencontrées et aux développements entrepris ces 2 premières années.

Le service fonctionne actuellement avec des données et services qui sont aujourd'hui disponibles (RHE, débits disponibles sous GéoBretagne), mais dont la relève est prévue à court terme (2020 ?), avec **la BD TOPAGE et le service Hub'Eau**. Le service a été réalisé dans cette perspective, mais **des développements supplémentaires seront nécessaires pour s'adapter à ces données**, car nous ne connaissons pas à ce stade exactement la forme que celles-ci prendront.

Grâce au retour des utilisateurs, le dernier objectif est de répondre à leurs demandes concernant les outils et l'interface web, mais aussi de leur permettre plus d'interactions, comme importer leurs propres données. **Au cours de la troisième année, l'outil étant disponible et utilisable, certaines améliorations et modifications seront potentiellement nécessaires.** Des séances de "formation - prise en main" pourront être organisées avec le partenariat du Creseb en tant que plateforme d'échange entre scientifiques et gestionnaires de bassins versants et SAGE. Y seront associées également la Dreal et l'OEB en tant que producteurs/gestionnaires de données et en charge de calculer des indicateurs de suivi de la qualité de l'eau.

Un des points qu'il reste à développer est **le calcul des incertitudes sur les flux d'eau simulés** par SIMFEN et leur mise en forme à l'intention des utilisateurs. Actuellement, la seule information mise à disposition de l'utilisateur est la visualisation des débits mesurés qui ont été employés pour effectuer la simulation. De cette manière, si l'utilisateur émet un doute sur une simulation, celle-ci pourra être vérifiée à partir de ces données. Les activités de recherche de l'équipe permettent d'apprécier les incertitudes. Leur traduction et leur mise en forme pour l'utilisateur du service est un objectif épistémologique pour la 3^{ème} année du projet SIMFEN.

L'ambition de SIMFEN à long terme est de permettre de simuler des flux de nutriments associés à l'eau sur l'ensemble de la Bretagne. A l'échelle de la 3^{ème} année de ce projet, nous proposons **d'intégrer une fonction de calcul des flux d'azote**, utilisable lorsqu'il y a des concentrations de mesure des nitrates. Aujourd'hui, les acteurs en charge du suivi de la qualité de l'eau utilisent souvent le logiciel Macroflux développé sous Excel. Lorsqu'il n'y a pas de données de débit au point de suivi des concentrations en nitrate, Macroflux fait une extrapolation des débits de la station hydrométrique la plus proche sur le même bassin versant (en amont ou en aval) au prorata de la lame d'eau écoulée. Avec SIMFEN, cette extrapolation ne sera donc plus nécessaire et une version en ligne simplifiée du logiciel Macroflux pourrait être développée pour produire des indicateurs de flux d'azote au niveau des stations de suivi de la qualité de l'eau. Dans un premier temps, cette fonction de calcul sera actionnable par l'utilisateur internaute qui importera les coordonnées de sa (ses) station(s) et ses données de concentration. La fonction de calcul produira sous forme de graphique et dans un fichier à télécharger les résultats des calculs des indicateurs de flux utilisés habituellement (flux moyen annuel, flux spécifiques, flux pondéré par l'hydraulicité). Ce développement nécessite d'intégrer toutes les règles de calcul (formules, conditions, paramètres) dans SIMFEN. A moyen terme, il serait envisageable d'effectuer ses opérations de calculs en ligne en reliant directement SIMFEN aux bases de données de concentration telles que OSUR et HYDRE-BEA, à condition que leurs données soient accessibles par un Service web interopérable.

Concernant l'emprise géographique de SIMFEN, la simulation des débits s'effectue actuellement uniquement sur le territoire breton. La raison provient du service web de GéoBretagne qui est employé pour localiser les stations et télécharger leurs débits mesurés actuellement. Un service du même genre que celui-ci n'existe pas actuellement sur l'ensemble du bassin de La Loire. Cependant, le service Hub'Eau qui doit remplacer la Banque HYDRO en 2020 permettrait à terme de développer SIMFEN sur l'ensemble du Bassin Loire-Bretagne. Cette faisabilité sera étudiée.

Pour résumer, une troisième année permettrait de :

- améliorer SIMFEN pour répondre aux demandes des utilisateurs suite à la mise en production et à disposition publique de l'outil,
- produire les outils nécessaires pour évaluer l'incertitude des simulations de débits,
- assurer la pérennité de l'outil en utilisant les produits mis à disposition au cours de l'année 2020 (BD TOPAGE, Hub'Eau),
- intégrer une fonction de calcul de flux d'azote à partir d'un fichier de données de concentration NO3 importé directement dans le service SIMFEN par l'utilisateur internaute.
- étudier la faisabilité de l'étendue de ce service au Bassin Loire-Bretagne

Un planning prévisionnel avait été présenté au démarrage du projet. Il est mis à jour avec les tâches réalisées et à venir dans le tableau ci-dessous :

Planning

Année 1	Année 2	Année 3
---------	---------	---------

Déroulement - Tâches	Modèle	Mise à jour des fonctions de calcul R ; Développement d'un package R .	Ajout de fonctionnalités ; Simplification et optimisation des codes ; Pré-calculs et stockage des résultats pour accélérer les temps de traitements.	Etudier la possibilité d'étendre le modèle au Bassin Loire-Bretagne ; Développements pour calculer l'incertitude des simulations ; Ajout de la simulation des flux d'azote.
	WPS	Mise en place du service OGC WPS (PyWPS) ; Création des outils permettant d'alimenter le modèle hydrologique; Création des services mis à disposition sur le service web .	Développement de l'interface web sous le Mviewer (GéoBretagne); Implication de porteurs d'enjeux bêta-testeurs pour la mise au point (demi-journée "test-évaluation" 26 mars 2019) et la validation de l'outil SIMFEN ; Développement d'outils de visualisation et d'acquisition d'informations via l'interface web.	Répondre aux demandes des utilisateurs suite à la mise en service ; Résolution des bugs pouvant être rencontrés par les utilisateurs ; Ajout des fonctions de visualisation et de traitements sur l'interface web ; Permettre aux utilisateurs d'employer leurs propres données.
	Données	Acquisition des mesures de débits de manière automatique sur GéoBretagne (uniquement 1 an disponible) ; Création d'une base de données (PostgreSQL) pour stocker les données ; Acquisition et prétraitement de données nécessaires pour le modèle et le service web (MNT, réseau hydrographique, etc...).	Préparation de l'avenir de l'outil en commençant à étudier la BD TOPAGE et le service Hub'Eau ; Simulation de débit pour le projet ADAM pour comparer les simulations avec un autre modèle hydrologique (GR4J); Affinage des méthodes de prétraitements du MNT.	Mise en production de la BD TOPAGE et du service Hub'eau (d'après les dates indiquées) ; Automatisation des prétraitements ; Développement d'un script pour installer le service SIMFEN (prétraitements, acquisition des données, téléchargement des outils, etc...) dans le cas d'une migration du service dans le temps.

3^{eme} année :

Prolongation d'un an du contrat CDD de Donatien Dallery, ingénieur d'étude, encadré de personnels titulaires (C. Cudennec, 8j professeur = 4790 € et Hervé Squividant, 14j ingénieur de recherche = 6380 €).

Coût du projet

Le coût prévisionnel de la 3eme année du projet est estimé à 55 170 € et se répartit comme suit :

Salaire Ingénieur d'étude (1 an CDD temps plein)	* 41 000	€
Frais de fonctionnement	* 1 000	€
Coût "personnels titulaires"	11 170	€
Frais de gestion (5% plafonné à 2000€, conditions du Conseil régional de Bretagne) sur dépenses comptables *	2 000	€
Total	55 170	€

Plan de financement

Subventions sollicitées (80%) :

Conseil régional de Bretagne (50%)	27 500	€
Agence de l'Eau Loire-Bretagne (30 %)	16 500	€
Autofinancement (20%)	11 170	€

Bibliographie

- Aourousseau, P. and Squividant, H., 1996. Use of tree and graph structures for computation and modelling of derived variables in Digital Elevation Model software [online]. Available from: http://viviane.roazhon.inra.fr/spanum/publica/ing_vie/dem2.htm.
- Barnes, R., Lehman, C., and Mulla, D., 2014. Priority-flood: An optimal depression-filling and watershed-labeling algorithm for digital elevation models. *Computers & Geosciences*, 62, 117–127.
- Bera, R., Squividant, H., Le Henaff, G., Pichelin, P., Ruiz, L., Launay, J., Vanhouteghem, J., Aourousseau, P., and Cudennec, C., 2015. GéoSAS: A modular and interoperable Open Source Spatial Data infrastructure for research. *International Association of Hydrological Sciences*, 368, 9–14.
- Beven, K. and Wood, E.F., 1993. Flow routing and the hydrological response of channel networks. In: K.J. Beven and M.J. Kirkby, eds. *Channel Network Hydrology*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 99–128.
- Blöschl, G., Sivapalan, M., Wagener, T., Viglione, A., and Savenije, H., 2011. Runoff prediction in ungauged basins: Synthesis across processes, places and scales. *Runoff Prediction in Ungauged Basins: Synthesis Across Processes, Places and Scales*, 1–465.
- Boudhraâ, H., 2007. Modélisation pluie-débit à base géomorphologique en milieu semi-aride rural tunisien : association d’approches directes et inverses. Institut National Agronomique de Tunisie.
- Boudhraâ, H., Cudennec, C., Andrieu, H., and Slimani, M., 2018. Net rainfall estimation by the inversion of a geomorphology-based transfer function and discharge deconvolution. *Hydrological Sciences Journal*, 63 (2), 285–301.
- Boudhraâ, H., Cudennec, C., Slimani, M., and Andrieu, H., 2006. Inversion d’une modélisation de type hydrogramme unitaire à base géomorphologique : interprétation physique et première mise en œuvre. In: *Predictions in ungauged basins : promise and progress*. Oxford (UK): International Association of Hydrological Sciences, 391–399.
- Boudhraâ, H., Cudennec, C., Slimani, M., and Andrieu, H., 2009. Hydrograph transposition between basins through a geomorphology-based deconvolution – reconvolution approach. In: *New Approaches to Hydrological Prediction in Data-sparse Regions*. IAHS Press, CEH Wallingford (UK), 76–83.
- Callow, J.N., Van Niel, K.P., and Boggs, G.S., 2007. How does modifying a DEM to reflect known hydrology affect subsequent terrain analysis? *Journal of Hydrology*, 332 (1–2), 30–39.
- Castronova, A.M., Goodall, J.L., and Elag, M.M., 2013. Models as web services using the Open Geospatial Consortium (OGC) Web Processing Service (WPS) standard. *Environmental Modelling and Software*, 41, 72–83.
- Čepický, J. and De Sousa, L.M., 2016. New implementation of OGC Web Processing Service in Python programming language. PyWPS-4 and issues we are facing with processing of large raster data using OGC WPS. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Prague, Czech Republic: Copernicus, 927–930.
- Chinnici, R., Moreau, J., Ryman, A., and Weerawarana, S., eds., 2007. Web Services Description Language (WSDL) Version 2.0 Part 1: Core Language. *W3C recommandation*.
- Cudennec, C., 2000. Description mathématique de l’organisation du réseau hydrographique et modélisation hydrologique. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes.
- Curbera, F., Duftler, M., Khalaf, R., Nagy, W., Mukhi, N., and Weerawarana, S., 2002. Unraveling the Web services Web: An introduction to SOAP, WSDL, and UDDI. *IEEE Internet Computing*, 6

(2), 86–93.

- Dooge, J.C.I., 1959. A general theory of the unit hydrograph. *Journal of Geophysical Research*, 64 (2), 241–256.
- Goodall, J.L., Horsburgh, J.S., Whiteaker, T.L., Maidment, D.R., and Zaslavsky, I., 2008. A first approach to web services for the National Water Information System. *Environmental Modelling and Software*, 23 (4), 404–411.
- Goodall, J.L., Saint, K.D., Ercan, M.B., Briley, L.J., Murphy, S., You, H., DeLuca, C., and Rood, R.B., 2013. Coupling climate and hydrological models: Interoperability through Web Services. *Environmental Modelling and Software*, 46, 250–259.
- Granell, C., Díaz, L., and Gould, M., 2010. Service-oriented applications for environmental models: Reusable geospatial services. *Environmental Modelling and Software*, 25 (2), 182–198.
- Gupta, V.K., Waymire, E., and Wang, C.T., 1980. A representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology. *Water Resources Research*, 16 (5), 855–862.
- He, Y., Bárdossy, A., and Zehe, E., 2011. A review of regionalisation for continuous streamflow simulation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15 (11), 3539–3553.
- Hrachowitz, M., Savenije, H.H.G., Blöschl, G., McDonnell, J.J., Sivapalan, M., Pomeroy, J.W., Arheimer, B., Blume, T., Clark, M.P., Ehret, U., Fenicia, F., Freer, J.E., Gelfan, A., Gupta, H. V., Hughes, D.A., Hut, R.W., Montanari, A., Pande, S., Tetzlaff, D., Troch, P.A., Uhlenbrook, S., Wagener, T., Winsemius, H.C., Woods, R.A., Zehe, E., and Cudennec, C., 2013. A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB)-a review. *Hydrological Sciences Journal*, 58 (6), 1198–1255.
- Jenson, S.K. and Domingue, J.O., 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information-system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54 (11), 1593–1600.
- Kadlec, J. and Ames, D.P., 2011. Design and development of web services for accessing free hydrological data from the Czech Republic. In: *International Symposium on Environmental Software Systems (2011)*. Berlin: Springer, 581–588.
- Lindsay, J.B., 2016. The practice of DEM stream burning revisited. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41 (5), 658–668.
- Mitra, N. and Lafon, Y., 2007. SOAP Version 1.2 Part 0: Primer (Second Edition).
- Nagel, D., Buffington, J.M., and Luce, C., 2011. A Simple Drainage Enforcement Procedure for Estimating Catchment Area Using DEM Data. *U.S. Forest Service, Rocky Mountain Research Station Boise Aquatic Sciences Lab Boise*.
- Pella, H., Snelder, T., Lamouroux, N., Vanderbecq, A., Shankar, U., and Rogers, C., 2008. Réseau hydrographique naturel étendu (RHE) construit à partir de la BD Carthage®. *Ingénieries*, 55–56, 15–28.
- Planchon, O. and Darboux, F., 2002. A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models. *CATENA*, 46 (2), 159–176.
- Pomeroy, J.W., Fang, X., Shook, K., and Whitfield, P.H., 2014. Predicting in ungauged basins using physical principles obtained using the deductive, inductive, and abductive reasoning approach. *Putting prediction in ungauged basins into practice*, 41–62.
- Portele, C., ed., 2007. OpenGIS® Geography Markup Language (GML) Encoding Standard.
- Rodríguez-Iturbe, I. and Valdés, J.B., 1979. The Geomorphologic Structure of Hydrologic Response. *Water Resources Research*, 15 (6), 1409–1420.

- Rosatti, G., Zorzi, N., Zugliani, D., Piffer, S., and Rizzi, A., 2018. A Web Service ecosystem for high-quality, cost-effective debris-flow hazard assessment. *Environmental Modelling and Software*, 100, 33–47.
- Squidiant, H., Bera, R., Arousseau, P., and Cudennec, C., 2015. Online watershed boundary delineation: Sharing models through Spatial Data Infrastructures. *International Association of Hydrological Sciences*, 368, 144–149.
- Surkan, A.J., 1969. Synthetic Hydrographs: Effects of Network Geometry. *Water Resources Research*, 5 (1), 112–128.
- Taylor, P., ed., 2011. OGC WaterML 2.0: Part 1- Timeseries.
- Turuncoglu, U.U., Dalfes, N., Murphy, S., and DeLuca, C., 2013. Toward self-describing and workflow integrated Earth system models: A coupled atmosphere-ocean modeling system application. *Environmental Modelling and Software*, 39, 247–262.
- Zhou, G., Sun, Z., and Fu, S., 2016. An efficient variant of the Priority-Flood algorithm for filling depressions in raster digital elevation models. *Computers & Geosciences*, 90, 87–96.

Annexes

1. Annexe 1

1.1. Configuration du WPS

Le service WPS repose sur un serveur sur lequel a été installée la bibliothèque PyWPS (version 4.2.1). Elle permet d'effectuer des requêtes OGC WPS à partir de scripts Python nommés "process" et facilite la mise en place et l'usage d'un WPS. Elle intègre des outils de suivis, de gestion et de stockage des "process" et de leurs résultats.

La configuration du WPS passe par un fichier de configuration (.cfg) et un fichier permettant au serveur python d'interagir avec les "process" (.wsgi). La documentation officielle de PyWPS possède les informations nécessaires pour configurer ces fichiers et est accessible à cette adresse <https://pywps.readthedocs.io/en/master/>.

PyWPS intègre une base de données SQLite pour gérer les "process". Ce type de base de données a l'avantage d'être contenue dans un seul fichier et ne nécessite pas d'installation particulière au niveau du système, au contraire de PostgreSQL. Cependant, dans le cadre d'une mise à disposition à tous du service web SIMFEN, il est conseillé de passer à cette seconde base de données dans un but de robustesse. Ainsi, dans le fichier de configuration du WPS, il faut remplacer la ligne :

```
database=sqlite:///usr/local/logs/simfen-wps.sqlite3
```

par

```
database=postgresql://user:pswd@psndb.agrocampus-ouest.fr:5432/simfen
```

Ensuite, durant le développement du service web, un état stable et utilisable a été atteint durant le développement. Un second service web a donc été déployé pour avoir à la fois un serveur de développement et un serveur considéré en production, c'est à dire stable. De cette manière, il est possible de communiquer sur le service tout en évitant que celui-ci ne soit modifié en permanence.

Grâce à la forge GitLab, il est aisé de mettre à jour cette version en production lorsque la version de développement atteint un nouvel état stable. Cependant, pour éviter toute manipulation de l'utilisateur lors de cette mise à jour, il est nécessaire de modifier quelques scripts. En effet, la version de développement va pointer vers un répertoire différent de la version production. Dans les scripts, les chemins d'accès à ces répertoires sont explicitement décrits, il faut donc les rendre variables. Pour cela, un script python nommé "configFile.py" a été placé dans chacun des répertoires avec ce code inscrit dedans :

```
class configPath :  
    path = "/usr/local/simfen/"
```

La valeur de la variable "path" est à adapter selon le chemin du service. Ensuite, pour éviter que ce fichier soit transféré d'un répertoire à l'autre, il faut référencer celui-ci dans le fichier ".gitignore" pour éviter que Git prenne celui-ci en compte lors des mises à jour, de même que le fichier ".cfg" qui est également lié à la version du WPS. Ensuite, dans le fichier ".wsgi" et dans les scripts "process", il faut importer ce script et utiliser la valeur de "path" pour pointer vers le fichier de configuration de la version du WPS.

La liste des "process" accessibles sur le WPS s'obtient à partir d'une requête "getCapabilities" et la description d'un "process" particulier nécessite une requête "describeProcess".

1.2. Configuration du serveur Apache2

La configuration du serveur Apache suit la documentation disponible sur le site de PyWPS. Pour résumer, voici la configuration des instances de production et de développement :

Développement :

```
WSGIDaemonProcess simfen-dev home=/usr/local/simfen-dev user=www-data group=www-data
processes=4 threads=5
WSGIScriptAlias /simfen-dev-wps /usr/local/simfen-dev/simfen-wps.wsgi process-group=simfen-dev
<Directory /usr/local/simfen-dev/>
```

```
WSGIScriptReloading On
```

```
WSGIProcessGroup simfen-dev
```

```
WSGIApplicationGroup %{GLOBAL}
```

```
Require all granted
```

```
</Directory>
```

Production

```
WSGIDaemonProcess simfen home=/usr/local/simfen user=www-data group=www-data processes=4
threads=5
```

```
WSGIScriptAlias /simfen-wps /usr/local/simfen/simfen-wps.wsgi process-group=simfen
```

```
<Directory /usr/local/simfen/>
```

```
WSGIScriptReloading On
```

```
WSGIProcessGroup simfen
```

```
WSGIApplicationGroup %{GLOBAL}
```

```
Require all granted
```

```
</Directory>
```

Dans ces fichiers, il est important de respecter deux règles pour le bon fonctionnement des services :

- il est important que les noms des WSGIDaemonProcess et les process-group soient impérativement différents (simfen, simfen-dev) comme indiqué dans la documentation disponible à cette adresse : <https://modwsgi.readthedocs.io/en/develop/configuration-directives/WSGIDaemonProcess.html>. Sinon, lorsqu'une requête est envoyée sur l'une des instances, il est possible qu'elle soit exécutée sur l'autre instance causant d'importantes erreurs et une instabilité.
- il faut faire attention aux chemins référencés pour qu'ils pointent correctement vers les répertoires des services.

1.3. Création d'un process

La création d'un process nécessite dans un premier temps d'importer la bibliothèque PyWPS et plusieurs fonctions. Ensuite, le process prend la forme d'une classe permettant l'initialisation du process et son exécution.

L'initialisation du process se distingue en 3 parties :

- la définition des paramètres en entrée que l'utilisateur doit renseigner. Ces paramètres peuvent être du texte ou bien des données spatiales. Chaque paramètre comporte une brève description de celui-ci, son type de données et une valeur par défaut (au besoin);
- la définition des sorties du process, avec une description de ceux-ci et leur format;

- la description du process, que c' est son identifiant, son résumé et quelques paramètres de fonctionnement.

Ensuite se trouve le code du process à effectuer, et il y a deux manières de l'écrire. Soit le code est directement intégré dans le script du process, soit le process sert uniquement de lanceur et le code est rédigé dans un autre fichier qui sera exécuté à partir d'une commande system (privilégier la bibliothèque subprocess) inscrite dans le process. Le choix a été de prendre cette seconde option, permettant de conserver l'indépendance du script pour l'exécuter à partir du WPS ou directement dans le terminal de commande, mais aussi d'éviter de redémarrer le serveur web en cas de mise à jour des codes.

De plus, cette seconde option n'est pas limitante, car à partir de la bibliothèque subprocess et de la fonction Popen, il est possible de récupérer les messages du script. De cette manière, il est possible de suivre l'exécution de celui-ci et de la reporter dans le document xml de réponse à partir de la fonction "update_status" de PyWPS. Pour faire fonctionner cette commande, il est impératif d'associer le message avec un pourcentage d'avancement étant une fonction à deux arguments. S'il manque l'un des deux, la mise à jour du statut ne sera pas effectuée.

Enfin, pour terminer la création du process, il est nécessaire de définir la réponse de celui-ci. Cela passe par la définition du format que va prendre le résultat, mais aussi d'indiquer les données à retourner. Cependant, le WPS ne peut pas retourner un fichier, il retourne uniquement un fichier XML qui va contenir les informations. Il est possible de retourner une URL pour récupérer les fichiers créés, mais le service fonctionne avec des répertoires temporaires, faisant que les fichiers sont supprimés après la fin du process. Il est tout à fait possible de stocker les fichiers, mais étant donné que cela représente un coût de stockage, cela n'a pas été retenu. Dans l'interface web, une fonction a été produite pour générer un fichier à partir des données présentes dans le fichier XML.

Une fois le process créé, il faut le référencer dans le fichier .wsgi et redémarrer le serveur web afin qu'il soit mis à disposition sur le service web.

2. Annexe 2

2.1. Création du package R

La réalisation d'un package R est soumise à plusieurs [règles](#), que ce soit la syntaxe, la mise en forme et la documentation. Tout d'abord, deux outils ont été installés pour générer le package, mais aussi sa documentation par la suite :

- devtools pour le développement du package R,
- roxygen2 pour la production de la documentation.

L'outil devtools permet de générer un répertoire dans lequel se trouve :

- un fichier DESCRIPTION contenant des informations relatives au package,
- un fichier NAMESPACE contenant l'ensemble des fonctions et packages à charger pour l'exécution du package,
- un répertoire R contenant tous les fichiers correspondants aux fonctions du package,
- un répertoire man contenant les fichiers de description des fonctions.

Suite à cette initialisation, l'ensemble des fonctions du package vont être placées dans le répertoire R. Il est conseillé de réaliser un script par fonction. Pour générer la documentation de chacune de ces fonctions, via roxygen2, il est nécessaire de commenter chacun des scripts en respectant une syntaxe interprétable par cet outil. Pour cela, il est nécessaire de préfixer les commentaires roxygen2 par "#" et d'employer les balises suivantes :

- @title : titre de la fonction
- @description : description de la fonction
- @keywords : mot clé permettant d'activer des fonctions de roxygen2
- @param : paramètre de la fonction
- @export : ajoute la fonction dans le fichier NAMESPACE
- @note : commentaire concernant la fonction
- @import : indique les bibliothèques nécessaires à l'utilisation de la fonction et les ajoute dans le NAMESPACE
- @return : valeur retournée par la fonction
- @examples : exemple d'utilisation de la fonction

Une fois la documentation écrite, il est possible de produire le package et de l'installer. La dernière étape, avant la diffusion du package, consiste à vérifier celui-ci selon les critères du CRAN. Cette vérification permet de mettre en avant des erreurs de documentation, de code et de structure. Un répertoire contenant divers documents et informations sur le package est alors produit.

Les lignes de commande nécessaire pour créer le package sont les suivantes :

1. `install.packages("devtools")`
2. `devtools::install_github("klutometis/roxygen")`
3. `devtools::create("TransfR")`
4. `devtools::document("TransfR")`
5. `R CMD build TransfR`
6. `CMD INSTALL TransfR.tar.gz`
7. `R CMD check --no-examples --as-cran TransfR`

2.2. Package R

Le package contient les codes réalisés par A. de Lavenne et qui ont été remaniés. Il est composé de deux fonctions correspondants à l'inversion et à la convolution. Une troisième fonction principale est disponible, mais optionnelle, pour calculer la distance inter-bassin et déduire le poids des bassins sources

par rapport au bassin cible pour pondérer la pluie nette de ceux-ci. Ensuite, plusieurs fonctions sont également disponibles, par exemple pour calculer la vitesse d'écoulement moyenne dans le réseau.

Pour simuler le débit à l'exutoire du bassin simulé, il est nécessaire de posséder la longueur hydraulique des bassins sources et cible ainsi que les mesures de débit à l'exutoire des bassins sources. Les fonctions ont été produites de manière à ce qu'elles soient simples d'utilisation et génériques au maximum. Par exemple, le fait de ne pas intégrer le calcul des longueurs hydraulique dedans provient du fait que les personnes qui vont utiliser directement le package ont leurs propres données. Pour ceux passant par le service web, une fonction réalise cette étape pour eux.

De même, l'utilisation de ce package est totalement automatisée. De ce fait, l'utilisateur n'a pas besoin d'avoir de connaissance envers ce langage.

3. Annexe 3

3.1. Logiciel SIG : cas de QGIS pour l'utilisation du service WPS

Pour utiliser un service WPS dans QGIS, il est nécessaire d'installer une extension : WPS Client. Cependant, elle n'est plus mise à jour depuis plus d'un an et depuis, la version 3 de QGIS est sortie. De ce fait, la méthode présentée ci-dessous ne fonctionne qu'avec QGIS 2.x.

Une fois installée, il faut cliquer sur le bouton "connect" de l'outil, puis sur "new". Dans la fenêtre qui s'ouvre, on indique un nom pour enregistrer la connexion et l'URL du service qui est <http://wps.geosas.fr/simfen>. Puis, il faut cliquer sur "Connect" pour obtenir la liste des services (getCapabilities).

En sélectionnant un service, une fenêtre s'ouvre pour permettre à l'utilisateur de renseigner les arguments pour ensuite lancer le process. Une fois celui-ci terminé, des fenêtres de dialogues s'ouvrent pour ajouter les informations calculées.

Cependant, cette extension peut rencontrer des soucis pour ajouter deux sources de données à la fois. Ainsi, il faut aller dans le répertoire temporaire où sont stockés les fichiers qui ont été générés. Il est alors possible d'ajouter ceux-ci dans QGIS sans difficulté. Concernant le résultat de simulation des débits, le fichier généré n'est pas interprétable par QGIS, il faut donc employer un outil adapté pour exploiter ce fichier écrit en WaterML.

3.2. Script : cas de Python pour l'utilisation du service WPS

Il existe de nombreuses façons pour interagir avec un service web, faisant appel à des outils system ou bien à des bibliothèques particulières. Deux méthodes vont être décrites, l'une effectuant une requête via une URL (qui peut s'effectuer dans un navigateur) et une requête POST. La méthode employant la bibliothèque OWSLib qui a été spécifiquement développée pour interagir avec les standards OGC® n'est pas abordée étant donné qu'elle nécessite d'installer un package.

La première méthode nécessite d'écrire une URL contenant l'ensemble des paramètres nécessaires pour l'exécution de celle-ci et qui sera exécutée par une commande système utilisant la commande "wget".

La portion de code à employer est la suivante, elle contient l'URL de la requête qui peut être employée directement dans un navigateur et le code nécessaire pour l'exécuter avec une commande subprocess.call.

```
url_wfs =
"http://wps.geosas.fr/simfen?service=wps&version=1.0.0&request=Execute&identifieur=waterFlowSimulation&datainputs=X=270000;Y=6839202;Start=2017-10-05;End=2017-12-05;DeltaT=60"
command = shlex.split('wget -O /tmp/debit_simule.xml')
subprocess.call(command)
```

La seconde méthode faisant appel à une requête POST est plus complète et permet d'ajouter de nombreuses informations et surtout avec des caractères accentués et des espaces. La méthode nécessite de produire un document XML qui va contenir la requête avec des balises interprétables par le service WPS. De cette manière, celui-ci peut lancer le process et retourner le résultat.

```
xml = '''
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<wps:Execute xmlns:wps="http://www.opengis.net/wps/1.0.0"
xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance" version="1.0.0" service="WPS"
xsi:schemaLocation="http://www.opengis.net/wps/1.0.0
http://schemas.opengis.net/wps/1.0.0/wpsAll.xsd>
```

```

<ows:Identifier
xmlns:ows="http://www.opengis.net/ows/1.1">waterFlowSimulation</ows:Identifier>
<wps:DataInputs>
  <wps:Input>
    <ows:Identifier xmlns:ows="http://www.opengis.net/ows/1.1">X</ows:Identifier>
    <wps:Data>
      <wps:LiteralData>270000</wps:LiteralData>
    </wps:Data>
  </wps:Input>
  <wps:Input>
    <ows:Identifier xmlns:ows="http://www.opengis.net/ows/1.1">Y</ows:Identifier>
    <wps:Data>
      <wps:LiteralData>6839202</wps:LiteralData>
    </wps:Data>
  </wps:Input>
  <wps:Input>
    <ows:Identifier xmlns:ows="http://www.opengis.net/ows/1.1">Start</ows:Identifier>
    <wps:Data>
      <wps:LiteralData>2017-10-05</wps:LiteralData>
    </wps:Data>
  </wps:Input>
  <wps:Input>
    <ows:Identifier xmlns:ows="http://www.opengis.net/ows/1.1">End</ows:Identifier>
    <wps:Data>
      <wps:LiteralData>2017-12-05</wps:LiteralData>
    </wps:Data>
  </wps:Input>
  <wps:Input>
    <ows:Identifier xmlns:ows="http://www.opengis.net/ows/1.1">DeltaT</ows:Identifier>
    <wps:Data>
      <wps:LiteralData>60</wps:LiteralData>
    </wps:Data>
  </wps:Input>
</wps:DataInputs>
<wps:ResponseForm>
  <wps:ResponseDocument storeExecuteResponse="true" lineage="false" status="false">
    <wps:Output asReference="false">
      <ows:Identifier
xmlns:ows="http://www.opengis.net/ows/1.1">StationsSelected</ows:Identifier>
      <ows:Title xmlns:ows="http://www.opengis.net/ows/1.1" />
      <ows:Abstract xmlns:ows="http://www.opengis.net/ows/1.1" />
    </wps:Output>
    <wps:Output asReference="false">
      <ows:Identifier
xmlns:ows="http://www.opengis.net/ows/1.1">SimulatedFlow</ows:Identifier>
      <ows:Title xmlns:ows="http://www.opengis.net/ows/1.1" />
      <ows:Abstract xmlns:ows="http://www.opengis.net/ows/1.1" />
    </wps:Output>
  </wps:ResponseDocument>
</wps:ResponseForm>

```

```
</wps:Execute>
'''
r = requests.post("http://wps.geosas.fr/simfen", data = xml)
with open("/tmp/debit_simule.xml", "wb") as f:
    f.write(r.content)
```

L'écriture de la requête peut être optimisée en effectuant une boucle pour remplir les inputs ou bien en employant un générateur de document XML. Pour l'exemple, la méthode la plus "verbeuse" a été choisie.

4. Annexe 4



Formulaire de demande d'intention
Appel à Manifestation d'Intérêt EAU
pour l'acquisition et le partage de connaissances
dans le domaine de la gestion intégrée de l'eau
Date de clôture : 1^{er} juillet 2016

Le dossier est à adresser par mail à l'attention de : florence.massa@bretagne.bzh

Date d'envoi par le porteur	1 ^{er} juillet 2016
Date de réception à la Région	

1- Titre du projet

Service Interopérable de Modélisation des Flux d'Eau et de Nitrate dans les bassins versants de Bretagne (SIMFEN)

A moyen terme, le service pourra être élargi à d'autres Nutriments (voir perspectives). Le nom pourrait alors évoluer avec remplacement de « Nitrate » par « Nutriments », sans remettre en cause l'acronyme et l'appropriation associée par les publics cibles.

2- Nom du porteur (Chef de file si partenariat)

Structure : UMR SAS Agrocampus Ouest-INRA, Rennes, <http://www6.rennes.inra.fr/umrsas/>

Coordonnées de la personne référente sur le projet :

Christophe Cudennec, Professeur Agrocampus Ouest

Mail : cudennec@agrocampus-ouest.fr

Tel : 02 23 48 55 58

Collègues impliqués principalement :

Hervé Squidant, Ingénieur de recherche Agrocampus Ouest

Josette Launay, Ingénieur d'étude Agrocampus Ouest en lien avec la Région Bretagne

3- Partenaires éventuels, envisagés ou déjà identifiés

Objectif de la collaboration : *Modélisation hydrologique à base géomorphologique.*

Structure : *IRSTEA Antony*

Coordonnées de la personne référente sur le projet : *Alban de Lavenne*

Mail : alban.de-lavenne@irstea.fr

Objectif de la collaboration : *Interopérabilité avec les plateformes d'information géographique existantes en conformité avec la directive INSPIRE.*

Structure : *GéoBretagne*

Coordonnées de la personne référente sur le projet : *Fabrice Phung (DREAL)*

Mail : fabrice.phung@developpement-durable.gouv.fr

Objectif de la collaboration : *Mise au point et échange de données (débits, concentrations en nitrate, caractéristiques des stations de suivis existantes)*

Structure : *Pole métier « Eau » de GeoBretagne et Observatoire de l'eau en Bretagne (OEB, GIP Bretagne environnement)*

Coordonnées de la personne référente sur le projet : *Elodie Bardon (GIP BE)*

Mail : elodie.bardon@bretagne-environnement.org

4- Courte description du projet (objectifs et enjeux, thématiques abordées, périmètre géographique)

4.1 - Philosophie

L'objectif est de développer et de déployer en trois ans un service web interopérable de modélisation permettant le calcul des flux d'eau et de nitrate en tout point d'intérêt du réseau hydrographique sur l'ensemble de la Bretagne.

L'enjeu majeur est de mettre à disposition des gestionnaires et du public des outils web qui d'une part concrétisent des méthodes très récentes de modélisation hydrologique, et d'autre part s'appuient sur des développements hydro-informatiques innovants. Cela permettra d'avoir des chroniques de débit en tout site d'intérêt pour l'utilisateur mais non jaugé actuellement, en transposant les informations acquises aux stations hydrométriques existantes. Les sites d'intérêt peuvent correspondre à des lieux de diagnostic ou de gestion de la qualité de l'eau et des milieux aquatiques: lieu de prise d'eau, ouvrage hydraulique, plan d'eau, zone vulnérable, site d'observation d'autres variables, embouchure.

La prise en compte des différents exutoires des cours d'eau entrant dans une masse d'eau, typiquement des fleuves côtiers alimentant une baie, permet en outre d'aborder des thématiques d'interface terre-étang/lac ou terre-mer.

La généralisation à d'autres flux associés à l'eau, au-delà des nitrates, est envisagée ensuite à moyen terme. De même, l'élargissement au-delà de la Bretagne est envisagé, en particulier dans le bassin de la Loire.

Le projet s'appuie sur les bases suivantes, étayées par les références bibliographiques fournies en rubrique 7 :

- 1) des réalisations opérationnelles dans le domaine des services web interopérables appliqués à la modélisation hydrologique, et à la cartographie pédologique et géomorphologique ;
- 2) une expérience reconnue dans le domaine des Infrastructures de Données Spatiales (IDS) ;
- 3) des développements conceptuels récents de modélisation des flux d'eau (débits) dans les bassins versants non-jaugés ;
- 4) des travaux de référence dans la modélisation des flux de nitrate en Bretagne.

4.2 – Logique de service web

Les développements de l'équipe en matière de mise à disposition de résultats de recherche, d'IDS et de web services interopérables ont été importants ces dernières années (<http://geowww.agrocampus-ouest.fr/web/>) avec non seulement le développement du géoserveur GéoSAS, et la mise à disposition ouverte de données cartographiques et temporelles, mais aussi la mise à disposition de services web (WPS) permettant

- à tout utilisateur d'activer des outils et modèles informatiques,
- depuis l'interface proposée sous GéoSAS ou d'une autre interface via l'interopérabilité et des extensions (Addon) dédiées,
- avec des données proposées, personnelles ou tierces en accès libre.

Les Figures 1 et 2 illustrent ces fonctionnalités pour l'exemple du WPS bassin versant d'analyse hydrographique des Modèles Numériques de Terrain. La Figure 3 illustre le wps Macroflux de calcul des flux de Nitrate dans les bassins versants du programme GP5.

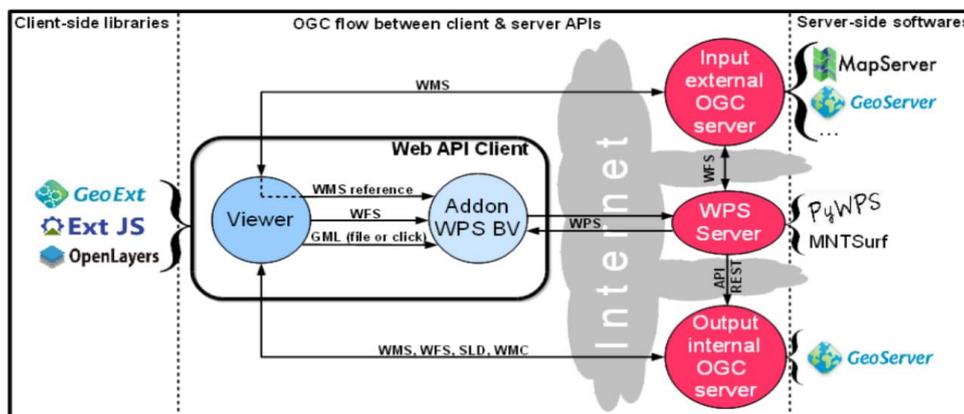


Figure 1 : Schéma fonctionnel de l'architecture informatique du service de calcul de bassin versant.

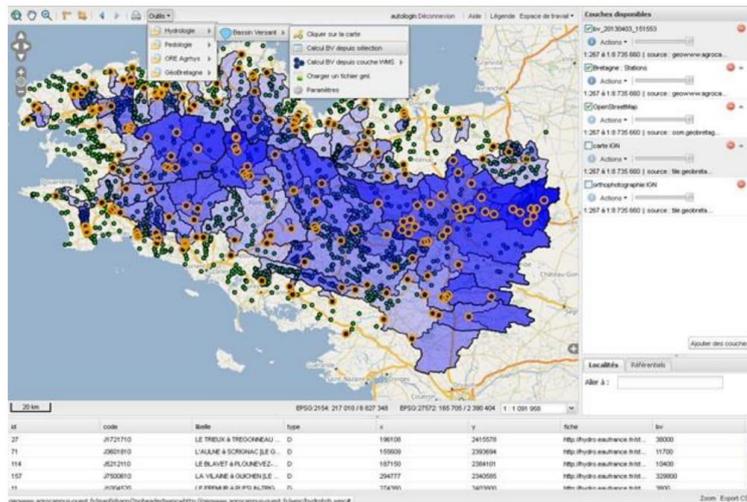


Figure 2 : Exemple de calcul de bassin versant directement sur le web à partir du visualiseur cartographique de GéoBretagne ou de GéoSAS.



Figure 3 : Portail web permettant de générer et visualiser des graphes relatifs à l'évolution des concentrations et flux d'azote par bassin versant en Bretagne (UMR SAS, CSEB)

Le portail web cartographique (Figure 3) a été réalisé par les geomaticiens de l'UMR SAS afin de répondre aux standards OGC (Open Geospatial Consortium) et d'être ainsi référencé à différents niveaux (Inspire Geoportal, Géocatalogue, data.gouv.fr, GéoBretagne, etc). Pour une cinquantaine de bassins versants bretons caractérisés par une station de suivi Qualité et une station Débit, ce portail permet de générer automatiquement les graphes de concentration et de flux d'azote calculés avec le logiciel Macroflux (outil développé à l'origine sous Excel et transformé ici en fonction de calcul interrogeant directement une base de données). A la couche spatiale des bassins versants bretons, est donc intégré un outil de visualisation dynamique de graphes représentant différents indicateurs (hydraulicité, concentration journalière, concentration annuelle, flux annuel, flux spécifique, flux pondéré par l'hydraulicité).

Une mise à jour est prévue en 2016 dans le cadre d'une collaboration avec l'Observatoire régional de l'eau (OEB) missionné pour réaliser la synthèse régionale de la qualité de l'eau des bassins versants bretons. La procédure d'échanges de données entre l'OEB et l'UMR SAS a été mise au point et il reste à développer l'interface permettant d'automatiser la mise à jour régulière des graphiques de concentration et flux d'azote sur ce Geoportail : http://geowww.agrocampus-ouest.fr/web/?page_id=1628

Ces développements suivent la philosophie INSPIRE et sont conformes aux principes d'interopérabilité des différentes plateformes d'information géographique existantes comme GéoBretagne ou le réseau national des zones humides (<http://sig.reseau-zones-humides.org/>)

Ils permettent aujourd'hui aux gestionnaires de trouver, de consulter et de télécharger des données spatiales produites à l'UMR SAS comme les « Référentiels régionaux pédologiques de Bretagne » ou des sorties de la modélisation hydrologique comme « les Milieux potentiellement humides de France ». Ils permettent également d'accéder à différents types de données temporelles provenant d'observatoires (ex : ORE AgrHys) ou produits de la modélisation (ex : Macroflux / CSEB ; Figure 3). Ils permettent enfin la diffusion d'outils d'analyse spatiale ou de fonction de modélisation en temps réel comme le « WPS Bassin Versant » (Figure 2) disponible simultanément sur les plateformes GéoBretagne et GéoSAS via une extension (Addon) au visualiseur cartographique développé par nos soins (Figure 1).

Ces développements et l'expérience acquise font l'objet de communications scientifiques (Travaux de Squidant, Béra, Launay *et al.*). Ils sont également au cœur d'enseignements d'ingénieur et de master à Agrocampus Ouest et à l'Université Rennes 2. Le savoir-faire en matière d'IDS vient en outre d'être formalisé au sein d'un module de formation en ligne dans le cadre du projet national de pédagogie numérique en accès libre en géomatique UTOP (www.iwds.agrocampus-ouest.fr).

4.3 – Logique de modélisation hydrologique

En s'appuyant sur ces acquis et compétences informatiques, le projet SIMFEN va permettre de développer un nouveau service que nous pensons judicieux pour les acteurs bretons, en valorisant une approche qui s'inscrit dans le front de science actuel de la modélisation hydrologique en bassins versants non jaugés (Hrachowitz *et al.*, 2013 ; Perrin *et al.*, 2015).

Initiée dans les années 2000 (travaux de Cudennec, Boudhraâ *et al.*) la modélisation à base géomorphologique a été particulièrement développée avec la thèse de de Lavenne (2010-2013) financée par la Région Bretagne et par l'INRA. Cette modélisation (Figure 4) s'appuie sur la description mathématique du réseau hydrographique, puis la déduction d'une fonction de transfert parcimonieuse de l'eau à base géomorphologique. L'inversion de cette fonction de transfert permet de déconvoluer les flux hydrologiques observés aux exutoires jaugés pour quantifier les échanges à l'interface entre versants et cours d'eau, compte tenu des zones humides le cas échéant. Cette quantification permet ensuite de simuler les flux pour d'autres points du réseau hydrographique, par transposition vers des bassins emboîtés, voisins ou similaires.

La méthode a été testée et validée autour du bassin versant de Naizin (ORE AgrHys ; Figure 5), puis pour l'ensemble de la Bretagne (travaux de de Lavenne, Cudennec *et al.*). La figure 6 présente l'exemple de la mise en œuvre pour simuler la totalité des flux d'eau douce fournis par les fleuves côtiers de la baie de Saint Brieuc, en valorisant au mieux par simulation d'ensemble les stations hydrométriques disponibles. La généralisation au bassin de la Loire vient d'être réalisée (de Lavenne *et al.*, 2016). La convergence avec les méthodes de calcul de flux de nitrate est en cours, à commencer par l'approche Macroflux, ainsi que l'exploration plus générale de la modélisation hydrochimique à base géomorphologique (thèse de S. Ecrepont en cours, 2015-2018), qui valorise les connaissances récemment acquises par l'UMR SAS pour d'autres flux associés à l'eau (voir <http://www6.rennes.inra.fr/umrsas/Decouvrez-nous/Equipes/Agrohydrologie>).

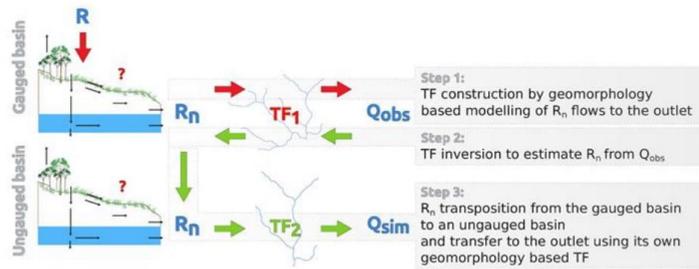


Figure 4 : Principe de transposition des chroniques par modélisation hydrologique directe et inverse à base géomorphologique.

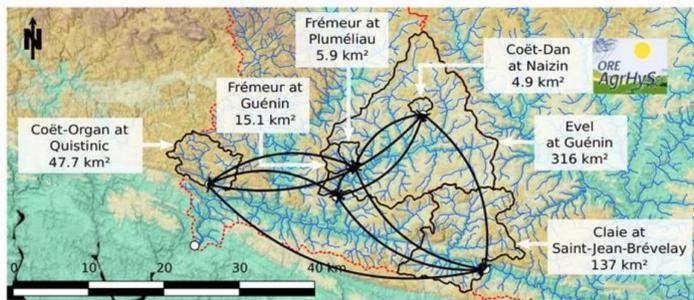


Figure 5 : Jeu de bassins versants jaugés autour du bassin de Naizin de l'ORE AgrHys ayant servi de support aux développements de la thèse de de Lavenne (2013).

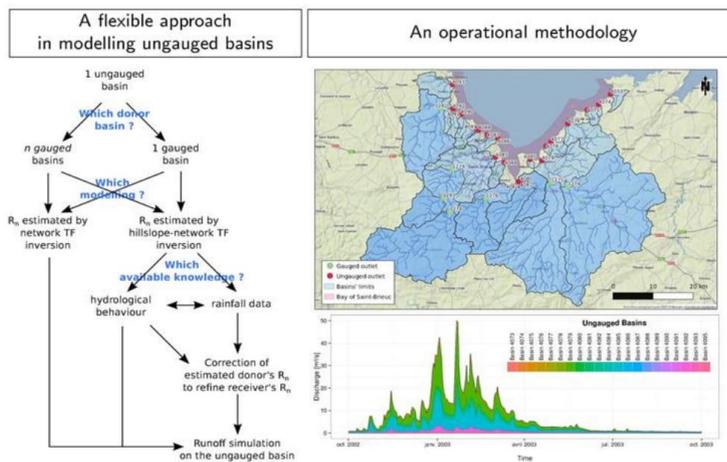


Figure 6 : Modélisation des flux d'eaux entrant dans une baie littorale. Exemple des bassins versants côtiers alimentant la baie de Saint Brieuc, à partir des cinq stations hydrométriques disponibles à l'amont (de Lavenne, 2013 ; de Lavenne & Cudennec, 2014).

5- Précisions sur le projet (à apporter dans la mesure du possible, selon l'état de la réflexion sur le montage du projet) :

5.1- les questions scientifiques et techniques qui se posent pour les porteurs :

Nous avons désormais pour objectif de développer et d'opérationnaliser le service web interopérable qui permettra aux usagers de simuler les chroniques de flux d'eau, et de nitrates associés, en tout point d'intérêt.

Questions scientifiques :

- Vulgarisation de la logique de modélisation hydrologique et des incertitudes associées, en particulier dans l'ergonomie et la métadonnée du service
- Convergence entre l'approche de modélisation des débits et l'approche Macroflux
- Quantification des effets de taille de bassin versant dans le moyennage du signal de concentration en nitrates (Thèse S. Ecrepont en cours)

Questions techniques :

- Accès direct aux bases de données des stations de mesure référentielles : débits instantanés de la Banque Hydro (pas de temps infra-horaire), données nitrates des bases de données Osur nationale et Hydre régionale (Dreal Bretagne)
- Robustesse et optimisation (rapidité) des algorithmes de calcul
- Interopérabilité réelle permettant l'accès au service via différentes plateformes (GéoSAS, GéoBretagne, Pole Inside Onema) ou logiciels (SIG desktop, autres modèles)

5.2- Les enjeux méthodologiques associés

5.3- le type de sites sur lequel le projet pourrait être mené et l'emprise géographique projetée

Ensemble de la Bretagne et de l'hydrographie connexe (amont limitrophe de la Vilaine et de ses affluents, affluents normands de la Baie du Mont Saint Michel).

5.4- déroulé, méthode de travail, expérience sur le sujet, durée envisagée

La durée envisagée du projet est de trois ans. Il s'appuie sur l'expérience décrite ci-dessus (et étayée dans la liste bibliographique ci-dessous) dans différents domaines convergents. Son déroulement passe par les grandes étapes suivantes.

- 1) Accès certains au flux, ou bancarisation, des données de référence des stations de mesure
- 2) Mise au point des fonctions de modélisation + validation

- 3) Développement du service WPS
- 4) Développement de l'interface sous la forme d'un Addon au visualiseur cartographique sur GéoSAS + validation
- 5) Portage sous GéoBretagne

L'ensemble du projet demande l'acquisition d'un serveur informatique. Un ingénieur contractuel est nécessaire sur toute la durée, en particulier pour les points 1, 2 et 4.

5.5- le type de livrables prévus :

Etapas et livrables des années 1 et 2 :

- 1) Mise au point d'un protocole d'accès aux données de référence des stations de mesure (ou bancarisation si problème)
- 2) Mise au point des fonctions de calcul (R + MNTSurf)
- 3) Déploiement d'un service WPS de test de modélisation interopérable au standard OGC WPS proposant différentes fonctions de calcul comme (XY2fluxEAUJour ou XY2fluxNJour, ...) ainsi que la métadonnée de service
- 4) Maquette de l'Addon au visualiseur de geOrchestra
- 5) Implication de porteurs d'enjeux bêta-testeurs pour la mise au point et la validation de l'outil SIMFEN

Livrables au bout de 3 ans :

- 6) Calcul : Déploiement du service de modélisation SIMFEN sur un serveur en production avec toutes les garanties associées comme le minimum de 99% de disponibilité du service imposé par la directive Inspire
- 7) Interface web : Finalisation du développement et test de l'Addon au visualiseur de geOrchestra sur GéoSAS. Déploiement de l'Addon SIMFEN sur la plateforme GéoBretagne

Les suites envisagées à moyen terme, au-delà de ces trois ans, relèvent en particulier des pistes suivantes :

- L'ouverture à d'autres nutriments (les travaux de l'UMR SAS et de l'OSUR permettent d'envisager des traductions opérationnelles dans les années à venir ; la thèse de doctorat de S. Ecrepont en cours 2015-2018 explore précisément la modélisation hydrochimique à base géomorphologique).
- Le déploiement au-delà de la Bretagne, en particulier dans le bassin de la Loire (Cf. de Lavenne *et al.*, 2016).

- Le développement d'un tableau de bord de modélisation qui permettrait à tout usager de personnaliser une interface d'activation et de visualisation de services web (dont SIMFEN et les autres WPS développés par la communauté hydro-informatique - Figure 7).

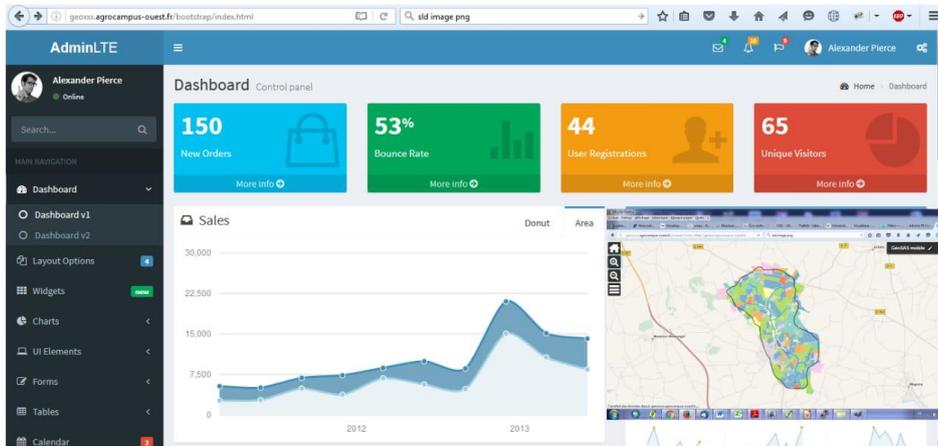


Figure 7 : Perspective schématique d'un tableau de bord personnalisable pour l'activation et la visualisation de services web.

6- Le budget estimé, les financements déjà acquis

Financement acquis : Ressources humaines des scientifiques participant au projet.

Budget estimé :

- Achat de serveur de calcul en début de projet : 10 k€
- 1 ingénieur sur toute la durée : environ 42 k€ / an pendant 3 ans

[devis 2015

IE - 2ème classe, échelon 2 (INM 386) = 3400 € / mois (2550 € les 6 premiers mois car pas de prime)

IR - 2ème classe, échelon 1 (INM 412) = 3600 €/mois (2750 € les 6 premiers mois car pas de prime)]

7- Références bibliographiques de l'équipe en lien avec le projet

de Lavenne A., Skøien J.O., Cudennec C., Curie F., Moatar F., 2016. *Transferring measured discharge time-series: large-scale comparison of Top-kriging to geomorphology-based inverse modeling*. Water Resources Research, 52, <http://dx.doi.org/10.1002/2016WR018716>.

Koutsoyiannis D., Blöschl G., Bardossy A., Cudennec C., Hughes D., Montanari A., Neuweiler I., Savenije H., 2016. *Joint editorial – Fostering innovation and improving impact assessment for journal publications in hydrology*. Hydrol. Earth Syst. Sci., 20, 1081-1084, <http://dx.doi.org/10.5194/hess-20-1081-2016>

Béra R., Squidivant H., Le Henaff G., Pichelin P., Ruiz L., Launay J., Vanhouteghem J., Arousseau P., Cudennec C., 2015. *GéoSAS : A modular and interoperable open source spatial data infrastructure for research*. In 'Remote sensing and GIS for hydrology and water resources', PIAHS, 368, 9-14, [doi:10.5194/piahs-368-9-2015](http://dx.doi.org/10.5194/piahs-368-9-2015).

- Cudennec C., de Lavenne A., 2015. *Hydrogeomorphology – a long term scientific interface*. Hydrology Research, 46, 175-179, [doi:10.2166/nh.2015.100](https://doi.org/10.2166/nh.2015.100) / Introduction à un numéro special.
- de Lavenne A., Boudhraâ H., Cudennec C., 2015. *Streamflow prediction in ungauged basins through geomorphology-based hydrograph transposition*. Hydrology Research, 46, 291-302, [doi:10.2166/nh.2013.099](https://doi.org/10.2166/nh.2013.099).
- de Lavenne A., Cudennec C., Fovet O., Ruiz L., 2015. *Valuing knowledge on temporal dynamics from long-term monitored basins for neighbouring sites*. In 'Hydrological sciences and water security: Past, present and future', PIAHS, 366, 179-180, [doi:10.5194/piahs-366-179-2015](https://doi.org/10.5194/piahs-366-179-2015)
- Perrin C., Andreassian V., Arnaud P., Borrell-Estupina V., Braud I., Cudennec C., de Lavenne A., Gaume E., Hubert P., Javelle P., Lang M., Le Moine N., Mahé G., Moussa R., Oudin L., Paturel J.E., Payrastré O., Poncet C., Rodriguez F., Sauquet E., Servat E., 2015. *French contribution to the IAHS Prediction in Ungauged Basins (PUB) initiative*. CNFGG scientific report to the IUGG, 35 p.
- Squidant H., Béra R., Arousseau P., Cudennec C., 2015. *Online watershed boundary delineation: sharing models through spatial data infrastructures*. In 'Remote sensing and GIS for hydrology and water resources', PIAHS, 268, 144-149, [doi:10.5194/piahs-368-144-2015](https://doi.org/10.5194/piahs-368-144-2015).
- de Lavenne A., Cudennec C., 2014. *Prediction of streamflow from the set of basins flowing into a coastal bay*. In 'Complex interfaces under change: Sea – River – Groundwater – Lake', IAHS Publ. 365, 55-60, [doi:10.5194/piahs-365-55-2015](https://doi.org/10.5194/piahs-365-55-2015).
- de Lavenne A., 2013. *Modélisation hydrologique à base géomorphologique de bassins versants non jaugés par régionalisation et transposition d'hydrogramme*. Thèse de doctorat, Agrocampus Ouest, <http://www6.rennes.inra.fr/umrsas/Media/Fichiers/these/These-Alban-de-Lavenne>
- Hrachowitz M., Savenije H.H.G., Blöschl G., McDonnell J.J., Sivapalan M., Pomeroy J.W., Arheimer B., Blume T., Clark M.P., Ehret U., Fenicia F., Freer J.E., Gelfan A., Gupta H.V., Hughes D.A., Hut R.W., Montanari A., Pande S., Tetzlaff D., Troch P.A., Uhlenbrook S., Wagener T., Winsemius H.C., Woods R.A., Zehe, E., Cudennec C., 2013. *A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB) – a review*. Hydrological Sciences Journal, 58, 1198-1255, [DOI: 10.1080/02626667.2013.803183](https://doi.org/10.1080/02626667.2013.803183).
- Squidant H., Béra R., Arousseau P., 2013. *WPS Bassin Versant: un outil de modélisation hydrologique intégré à une infrastructure de données spatiales*. M@ppemonde, 112 <http://mappemonde.mgm.fr/num40/fig13/fig13402.html>
- Boudhraâ H., Cudennec C., Slimani M., Andrieu H., 2009. *Hydrograph transposition between basins through a geomorphology-based deconvolution-reconvolution approach*. In 'New Approaches to Hydrological Prediction in Data Sparse Regions', IAHS Publ., 333, 76-83, <http://iahs.info/redbooks/333.htm>
- Cudennec C., Pouget J.C., Chargui S., Boudhraâ H., Jaffrezic A., Slimani M., 2009. *Geomorphology-structured hydroinformatics for downward basin modelling with flexible accounting for net rainfall variability*. In 'Hydroinformatics in Hydrology, Hydrogeology and Water Resources', IAHS Publ. 331, 254-260, <http://iahs.info/redbooks/331.htm>
- Boudhraâ H., 2007. *Modélisation pluie-débit à base géomorphologique en milieu semi-aride rural tunisien : Association d'approches directe et inverse*. Thèse de doctorat, Institut National Agronomique de Tunisie.
- Cudennec C., Fouad Y., 2006. *Structural patterns in river network organization at both infra- and supra-basin levels: the case of a granitic relief*. Earth Surface Processes and Landforms, 31, 369-381, [doi: 10.1002/esp.1275](https://doi.org/10.1002/esp.1275)
- Cudennec C., Pouget J.C., Boudhraâ H., Slimani M., Nasri S., 2006. *A multi-level and multi-scale structure of river network geomorphometry with potential implications towards basin hydrology*. In 'Prediction in Ungauged Basins: promises and progress', IAHS Publ., 303, 422-430, <http://iahs.info/redbooks/303.htm>
- Cudennec C., Slimani M., Le Goulven P., 2005. *Accounting for sparsely observed rainfall space-time variability in a rainfall-runoff model of a semiarid Tunisian basin*. Hydrological Sciences Journal, 50, 617-630, [doi: 10.1623/hysj.2005.50.4.617](https://doi.org/10.1623/hysj.2005.50.4.617)
- Rodriguez F., Cudennec C., Andrieu H., 2005. *Application of morphological approaches to determine unit hydrographs of urban catchments*. Hydrological Processes, 19, 1021-1035, [doi: 10.1002/hyp.5643](https://doi.org/10.1002/hyp.5643)
- Cudennec C., Fouad Y., Sumarjo Gatot I., Duchesne J., 2004. *A geomorphological explanation of the unit hydrograph concept*. Hydrological Processes, 18, 603-621, [doi: 10.1002/hyp.1368](https://doi.org/10.1002/hyp.1368)