

UNIVERSITE DE LIEGE – AQUAPOLE

Rapport sur l'étude de faisabilité d'une méthodologie de modélisation à l'échelle globale du bassin versant de la Medjerda (Tunisie)



**J-F. Delière, T. Bourouag, C. Blockx,
X. Detienne, E. Everbecq, A. Grard**

Décembre 2009

Avec l'appui de WBI



Table des matières

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Table des matières | 2 |
| Résumé exécutif | 4 |
| Chapitre 1. Contexte et déroulement du projet..... | 5 |
| 1 - 1. Contexte..... | 5 |
| 1 - 2. Déroulement du projet..... | 6 |
| Chapitre 2. Disponibilité et analyse des données sur le bassin de la Medjerda | 8 |
| 2 - 1. Données géographiques..... | 8 |
| 2 - 1 - 1. Introduction | 8 |
| 2 - 1 - 2. Réseau hydrographique | 9 |
| 2 - 1 - 3. Modèle numérique de terrain | 10 |
| 2 - 1 - 4. Bassins versants..... | 10 |
| 2 - 1 - 5. Occupation des sols | 10 |
| 2 - 1 - 6. Limites administratives..... | 12 |
| 2 - 1 - 7. Caractéristiques du réseau hydrographique..... | 12 |
| 2 - 1 - 8. Singularités du réseau hydrographique..... | 13 |
| 2 - 2. Données météorologiques..... | 14 |
| 2 - 2 - 1. Introduction | 14 |
| 2 - 2 - 2. Insolation..... | 14 |
| 2 - 2 - 3. Températures | 14 |
| 2 - 2 - 4. Débits des rivières | 14 |
| 2 - 3. Rejets..... | 16 |
| 2 - 3 - 1. Introduction | 16 |
| 2 - 3 - 2. Rejets urbains..... | 18 |
| 2 - 3 - 3. Rejets industriels..... | 18 |
| 2 - 3 - 4. Stations d'épuration..... | 19 |
| 2 - 3 - 5. Abattements des stations d'épuration | 20 |
| 2 - 3 - 6. Cheptel | 20 |
| 2 - 4. Mesures de qualité | 21 |
| 2 - 5. Tableau récapitulatif | 22 |
| 2 - 6. Conclusions relatives aux données | 23 |
| Chapitre 3. Problématiques spécifiques | 24 |
| 3 - 1. Problématique des grands barrages..... | 24 |
| 3 - 2. Débit anthropisé..... | 25 |
| 3 - 3. Affluents intermittents..... | 25 |

| | | |
|--------------------|------------------------------------------------------------|-----------|
| 3 - 4. | <i>Prélèvements très importants</i> | 26 |
| 3 - 5. | <i>Problèmes de crues, d'érosion, ...</i> | 26 |
| 3 - 6. | <i>Calibration du modèle</i> | 26 |
| Chapitre 4. | Projet de modélisation | 27 |
| Chapitre 5. | Conclusions générales | 28 |
| Annexe 1 : | Tableau résumé des données nécessaires | 30 |
| Annexe 2 : | Principes généraux de l'utilisation de PEGASE | 31 |
| 1. | <i>Pré-processing des données</i> | 31 |
| 1 - 1. | Introduction | 31 |
| 1 - 2. | Pré-processing des données géographiques | 31 |
| 1 - 3. | Pré-processing des données d'entrée du modèle | 33 |
| 2. | <i>Exécution d'une simulation</i> | 34 |
| 3. | <i>Exploitation des résultats</i> | 34 |
| 3 - 1. | Sorties graphiques | 34 |
| 3 - 2. | Exportation de fichiers | 35 |
| 4. | <i>Futur de PEGASE</i> | 35 |
| 4 - 1. | Version PC | 35 |
| 4 - 2. | Interface utilisateur | 35 |
| 4 - 3. | Processus modélisés | 36 |
| 4 - 4. | Partage des Informations | 36 |

Résumé exécutif

Depuis 2007, l'Aquapôle appuie l'Agence Nationale de Protection de l'Environnement (ANPE - Tunisie) dans sa mission de contrôle de la pollution des eaux par la mise en place d'un réseau de contrôle de la pollution des eaux (projet LIFE Pays Tiers COPEAU 2007- 10). Les données ainsi collectées pourraient être utilement exploitées au travers de l'utilisation de modèles de gestion des ressources en eau. Le modèle PEGASE développé par l'Aquapôle, permet d'établir la relation pression / impact entre les différentes charges de pollution et la qualité de l'eau dans tout le réseau des rivières modélisées associées au bassin versant concerné, et constitue ainsi un puissant outil de gestion des cours d'eau et de leurs bassins versants. Il permet notamment de simuler le transport des polluants et différents scénarios de gestion (planification de l'épuration et de l'assainissement, réduction des pressions, mise aux normes des rejets,...) et d'en déterminer les impacts (gain de qualité) sur l'écosystème. Ce modèle est déjà largement utilisé dans plusieurs pays européens (Belgique, France, Pays-Bas, Allemagne, Luxembourg).

La présente étude intitulée « étude de faisabilité d'une méthodologie de modélisation à l'échelle globale du bassin versant de la Medjerda (Tunisie) » a été réalisée entre juin 2008 et décembre 2009 au travers du partenariat entre l'Aquapôle et l'ANPE et ce, avec l'appui de Wallonie Bruxelles International (commission mixte 2008).

L'étude dresse un **bilan des données disponibles** et analyse leur pertinence eu égard de ce qui est requis pour permettre la bonne application du modèle PEGASE à l'ensemble du bassin versant tunisien de la Medjerda. Il s'agit de données géographiques (MNT, réseau hydrographique, limites administratives, occupation des sols etc.), météorologiques (insolation, température, débits), de rejets (domestiques, industriels, STEP, cheptel) et de mesure de qualité.

L'étude dresse également un **bilan des problématiques spécifiques** dont il faudra nécessairement tenir compte dans l'adaptation du modèle au contexte local. Celles-ci concernent principalement la présence de 9 grands barrages implantés le long de la Mejerda et de ses affluents, la forte anthropisation du débit liée notamment aux lâchés de barrages, le caractère intermittent de certains affluents en fonction des périodes de l'année, la présence de prélèvements très importants notamment pour l'irrigation et enfin, des problèmes de crues et d'érosion.

En conclusion, l'analyse des échantillons de données transmises par l'ANPE et des problématiques spécifiques aux régions du Nord de la Tunisie montre que **le modèle PEGASE est tout à fait applicable au bassin de la Medjerda**, moyennant certaines adaptations spécifiques. Cet outil de gestion a toute sa raison d'être dans ce pays où la préservation des ressources en eau constitue un enjeu vital pour les générations actuelles et futures.

Chapitre 1. Contexte et déroulement du projet

1 - 1. Contexte

La préservation et la gestion des ressources en eau constituent une priorité nationale pour la Tunisie. Une stratégie globale du développement et de la préservation de l'eau en Tunisie a donc été élaborée et mise en œuvre depuis 1990. Ainsi plusieurs programmes y ont été réalisés dans le secteur de l'eau dont le Projet d'investissement du secteur de l'eau [PISEAU] financé par la Banque mondiale (2001-2007).

L'Aquapôle est impliqué en tant que partenaire de l'Agence Nationale de la Protection de l'Environnement (ANPE) dans la mise en œuvre d'un projet de mise en place d'un réseau national de contrôle de la pollution en Tunisie (projet COPEAU LIFE Pays-Tiers). Ce projet qui a démarré en janvier 2007 et qui se terminera fin 2009, vise à renforcer l'ANPE dans ses missions de contrôle de la pollution de l'eau et de coordination du réseau national de surveillance de la qualité de l'eau.

Dans le cadre de la Commission mixte permanente Wallonie-Bruxelles Tunisie qui s'est tenue à Tunis début 2008, et en réponse à l'intérêt suscité par la modélisation auprès de cadres de l'ANPE lors d'une visite technique en 2007, l'Aquapôle a soumis et obtenu le financement d'un projet intitulé « Etude de faisabilité d'une méthodologie de modélisation à l'échelle globale du bassin versant de la Medjerda (Tunisie) ». Ce projet d'une durée d'un an propose de compléter les actions mises en œuvre dans le cadre du PISEAU et du projet COPEAU par la réalisation d'une étude de faisabilité pour la mise en place d'une méthodologie et la collecte de données en vue de la modélisation des rivières du bassin versant tunisien de la Medjerda. En pratique, il vise, d'une part, à identifier les données disponibles et exploitables (entre autre par le modèle mathématique PEGASE) sur le bassin versant de la Medjerda en Tunisie. D'autre part, il s'agit de vérifier si les spécificités du bassin versant de la Medjerda (grands barrages, zones arides, ...) permettent l'utilisation d'outils de modélisation développés initialement pour les zones tempérées de l'Europe. En effet, via la modélisation déterministe de l'écosystème rivière et de son bassin versant, le modèle PEGASE permet d'établir la relation pression / impact entre les différentes charges de pollution et la qualité de l'eau dans tout le réseau des rivières modélisées associées au bassin versant concerné, et constitue ainsi un puissant outil de gestion des cours d'eau et de leurs bassins versants. Il permet notamment de simuler différents scénarios de gestion (planification de l'épuration et de l'assainissement, réduction des pressions, mise aux normes des rejets,...) et d'en déterminer les impacts (gain de qualité) sur l'écosystème. PEGASE est déjà largement utilisé, en Région wallonne et dans plusieurs pays européens.

Le présent projet vise à évaluer les mécanismes de transposition des approches de gestion globale des ressources en eau, en vue de les appliquer en Tunisie. Cette évaluation requiert des missions d'échange en vue de faire une étude de faisabilité de l'application du modèle PEGASE et, plus prosaïquement, de préparer ce projet ultérieur de modélisation (exportation des techniques et du savoir-faire de la Région wallonne aux bassins versants tunisiens).

1 - 2. Déroutement du projet

Le projet a démarré en juin 2008 et se terminera en octobre 2009. Il a impliqué la quasi-totalité¹ de l'équipe de l'Aquapôle (Université de Liège) et plusieurs agents² de l'Agence Nationale de Protection de l'Environnement (Tunisie). Il s'articule autour de 5 missions réalisées tantôt en Belgique (Aquapôle-ULg), tantôt en Tunisie. Chaque mission a fait l'objet d'un rapport détaillé qui est repris en annexe.

En résumé :

Une première **mission de démarrage** a eu lieu à Tunis du 22 au 26 juin 2008. Cette mission a permis de rencontrer les partenaires et les acteurs tunisiens et de présenter le modèle PEGASE, ses enjeux, ses applications et ses limites à un panel de personnalités scientifiques, techniques et administratives de très grande qualité. Un certain nombre de personnalités au niveau administratif et politique ont pu également être rencontrées, ce qui a permis de discuter d'autres enjeux de la gestion des ressources en eau en Tunisie (qui avaient jusqu'ici portés essentiellement sur les aspects quantitatifs, et qui maintenant, portent également sur les aspects qualitatifs). En particulier le bassin de la Medjerda qui constitue une ressource en eau essentielle pour la Tunisie est traité de manière globale par le modèle. La mission a été complétée par une visite de terrain tout à fait instructive en de nombreux points le long de la rivière Medjerda, ce qui a notamment permis d'appréhender la complexité et les singularités du système.

Cette première mission a été suivie d'un **premier atelier** qui a eu lieu du 26 au 30 janvier 2009 à l'Aquapôle en Belgique. Cet atelier a permis de présenter aux participants (2 personnes de l'ANPE, 1 personne de la DGRE et 1 personne de l'ONAS) l'ensemble des données requises pour pouvoir appliquer le modèle de la qualité des eaux PEGASE au bassin versant tunisien de la Medjerda. En effet, la phase de validation du modèle est directement tributaire de la « qualité » des données qui l'alimentent. C'est pourquoi il était essentiel avant toute chose de les définir et de les caractériser notamment au niveau de leur format, de leur précision et de leur sémantique.

Ensuite, une **mission de présentation** a eu lieu à Tunis du 17 au 20 mars 2009. Lors d'une réunion présidée par Monsieur le Ministre, Nadhir Hamada, l'intérêt et les enjeux liés à une approche multidisciplinaire pour la gestion intégrée de la ressource qualitative en eau, s'appuyant sur un outil de simulation numérique PEGASE ont pu être présentés à une assemblée composée de directeurs généraux de plusieurs administrations (ANPE, ONAS, Grands barrages, Agriculture...) et de représentants des grandes institutions concernées par la Medjerda et par la gestion de la qualité des eaux.

Cette mission a été suivie d'un **deuxième atelier** qui eu a eu lieu à Tunis du 4 au 9 mai 2009 et qui fait suite au 1^{er} atelier qui s'est tenu en Belgique au courant du mois de janvier 2009. Cela a permis de dresser un premier bilan des données disponibles en Tunisie et exploitables dans le cadre d'un projet futur de modélisation avec les différentes parties prenantes tunisiennes. Une visite de terrain a pu également être réalisée pour parcourir la Medjerda et ses affluents jusqu'à la frontière avec l'Algérie.

¹ J-F. Delière, T. Bourouag, C. Blockx, X. Detienne, E. Everbecq, A. Grard

² Principalement Samir Kaabi, Mohammed Ben Hassine et Mouna Sfaxi

Suite à cet atelier, l'ANPE a assuré la centralisation des données émanant des différentes institutions tunisiennes et les a transmises au fur et à mesure à l'Aquapôle où elles ont pu être analysées. Les deux partenaires du projet sont restés en contact permanent par courriels, ce qui a permis d'optimiser cette collecte de données.

Une **dernière mission** a eu lieu du 19 au 23 octobre 2009 à l'Aquapôle. Elle a permis de finaliser cette étude de faisabilité avec l'équipe de l'ANPE. Par ailleurs, elle a également permis de rédiger conjointement la trame du projet de modélisation en tant que tel, en privilégiant le travail en partenariat.



Chapitre 2. Disponibilité et analyse des données sur le bassin de la Medjerda

L'objectif de l'étude est de réaliser l'étude de faisabilité de la modélisation du bassin de la Medjerda. Cette étude constitue une étape préalable indispensable à l'élaboration d'un projet. Il convient en effet de s'assurer de la disponibilité et de l'adéquation des données disponibles aux besoins de la modélisation. Il n'entre donc pas dans les missions de l'étude de collecter physiquement les données. Cependant, cette collecte a été réalisée lorsque possible, afin de s'assurer au mieux de l'adéquation des données.

Ce chapitre reprend donc l'analyse des données nécessaires à une modélisation PEGASE. Il est basé sur le canevas du tableau en annexe du document « Application du modèle PEGASE au bassin de la Medjerda ; Inventaire des données nécessaires » (ce tableau est repris à la fin de ce document, voir annexe 1).

Une courte description de la méthodologie exploitée par le modèle PEGASE est également donnée en annexe à ce rapport (voir annexe 2). Elle reprend les principes généraux relatifs à l'utilisation du logiciel PEGASE, depuis la préparation des données d'entrée (le pré-processing des données) jusqu'à l'exploitation des résultats. Le dernier paragraphe de cette annexe fait référence aux développements envisagés pour le futur : la version 5 de PEGASE (version PC, interface utilisateurs, ...).

2 - 1. Données géographiques

2 - 1 - 1. Introduction

Le modèle PEGASE est basé sur une approche intégrée bassin versant-rivières. Le réseau hydrographique est représenté par une sélection de rivières explicitement calculées. Ces rivières explicitement calculées sont représentées par une série de segments et de points (la longueur des segments est variable, la distance entre 2 points de calcul est généralement comprise entre 200 et 400m). Le bassin versant est représenté par des mailles carrées (généralement de 1km x 1km ou 500m x 500 m).

Le code de calcul établit ensuite une relation entre chaque maille du bassin et un des points de calcul rivière, notamment par détermination d'un chemin de plus grande pente (utilisation du modèle numérique de terrain). Cette relation requiert le traitement d'un certain nombre de données spatiales (1-D et 2-D) telles que le réseau hydrographique, les zones hydrographiques, le modèle numérique de terrain et l'utilisation du sol.

Un CD-ROM dénommé SIG a été ramené à l'Aquapôle par Mr Ben Hassine³ le lundi 18/06/2009. Ce CD-ROM contient l'essentiel des données géographiques nécessaires à une application de PEGASE.

³ de l'ANPE (Agence Nationale pour la Protection de l'Environnement) de Tunisie

2 - 1 - 2. Réseau hydrographique

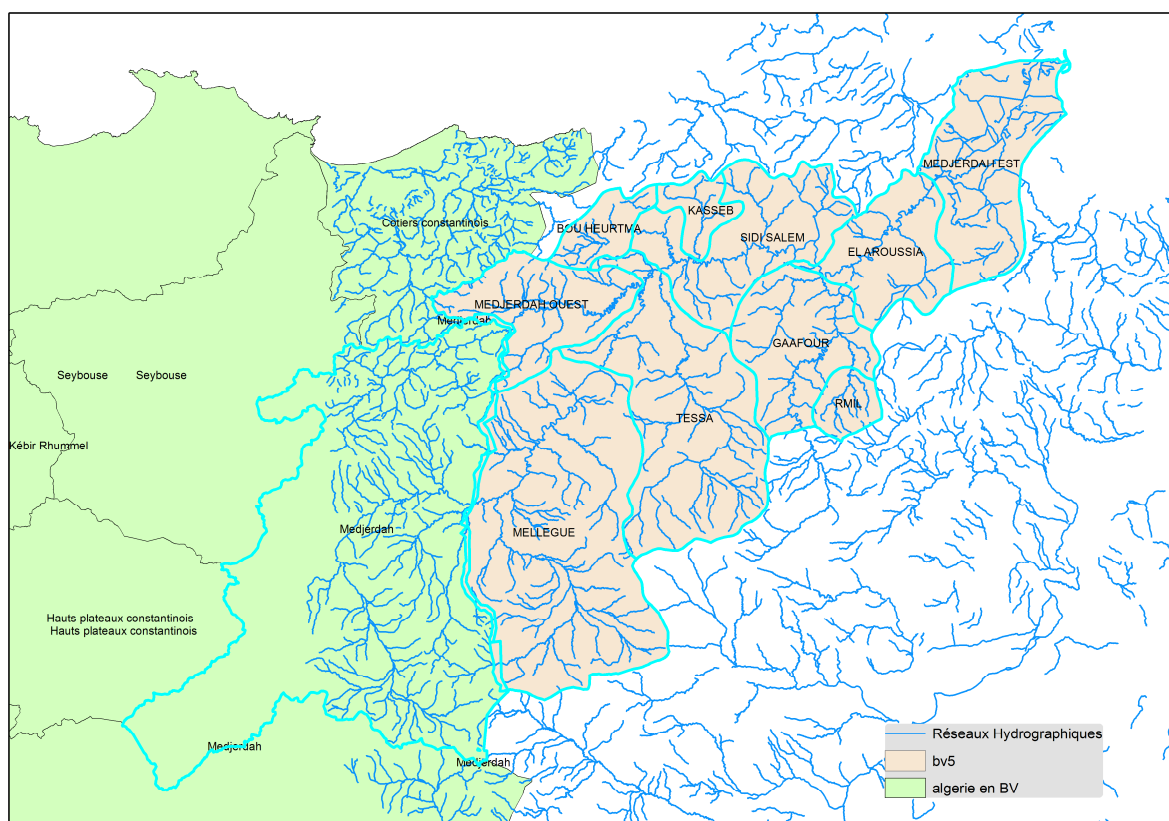
La **figure 1**, construite à partir des données transmises sur le CD, montre le bassin de la Medjerda dans sa totalité (partie algérienne y comprise).

La couche « Réseaux hydrographiques » au format shape d'ESRI sera exploitée pour construire la sélection des rivières qui seront modélisées dans PEGASE. Dans un premier temps la sélection se fera sur les oueds à écoulement permanent. Cette sélection sera étendue ultérieurement aux autres oueds afin de tenir compte de la dynamique de certains écoulements non permanents.

Il est important de noter ici que cette opération ne se limite pas à une simple « sélection de rivières ». PEGASE nécessite en effet la construction d'un réseau topologiquement correct, c'est-à-dire :

- un réseau dans lequel il n'y a pas de discontinuités⁴ ;
- un réseau disposant d'une codification hydrologique cohérente.

La création de ce réseau topologiquement correct est un travail long et fastidieux qui demande de nombreuses opérations manuelles. A la fin de la procédure, le réseau obtenu est soumis à une vérification automatique de la topologie.



⁴ Un cas typique est, par exemple, une rivière « coupée » lors de la digitalisation parce que sur la carte initiale un pont coupe le réseau

Figure 1. Bassin versant de la Medjerda (partie tunisienne en beige, partie algérienne en vert).

2 - 1 - 3. Modèle numérique de terrain

Le modèle numérique de terrain (MNT) est nécessaire :

- pour calculer, par chemin de plus grande pente, la relation « bassin versant / rivière »⁵
- pour estimer (dans le cas où on n'a pas d'information précise) les pentes des rivières.

Le MNT ne figure pas parmi les données du CD-ROM SIG. Cependant des données (provenant du ministère de l'Agriculture) ont été récupérées par l'ANPE⁶ et ont été ramenées à l'Aquapôle lors de la mission de clôture du mois d'octobre 2009 (à l'Aquapôle).

Deux couches d'isolignes à 10 m et à 50 m font partie des couches géographiques transmises. Ces couches peuvent éventuellement être utilisées pour générer un MNT sur le bassin de la Mejerda en Tunisie, mais cela nécessiterait un travail supplémentaire.

2 - 1 - 4. Bassins versants

Les limites des bassins versant sont utilisées dans PEGASE pour faciliter le calcul de la relation « bassin versant / rivière »⁷.

Les couches « bv5 » et « algerie en BV » au format shape seront utilisées pour construire le BV de la Medjerda.

2 - 1 - 5. Occupation des sols

La connaissance de l'occupation du sol est utilisée dans PEGASE pour pouvoir estimer les apports diffus des sols dans les rivières. Ceux-ci diffèrent de manière importante suivant qu'on se trouve, par exemple, sur des sols agricoles ou forestiers.

Pour tenir compte de cela, une représentation de l'occupation des sols en 6 classes est utilisée⁸: conifères, feuillus, prairies, cultures, urbain, divers. Les données d'occupation du sol disponibles seront donc d'abord regroupées dans ces 6 classes, puis globalisées par maille (de de 1km x 1km ou 500m x 500 m, voir ci-dessus).

Il n'y a pas de couche géographique d'occupation des sols sur le CD-ROM SIG. Par contre, une image de l'occupation des sols de la Tunisie (CARTE_LUS_ST21-AMELIRELATunisie.jpg), transmise par e-mail par

⁵ Pour tout point d'émission identifié par ses coordonnées, l'algorithme de calcul permet l'identification automatique de la rivière "réceptrice" et la détermination de la coordonnée longitudinale du point d'immission (=d'impact) sur cette rivière;

⁶ Email de Mouna Sfaxi du 30/06/2009

⁷ Cela permet, en recherchant les chemins de plus grande pente d'imposer de rester dans le bassin versant initial

⁸ Cette représentation pourrait éventuellement être modifiée pour l'application de PEGASE à la Medjerda

Mouna Sfaxi de l'ANPE le 19/05/2009, est montrée à la **figure 2**.

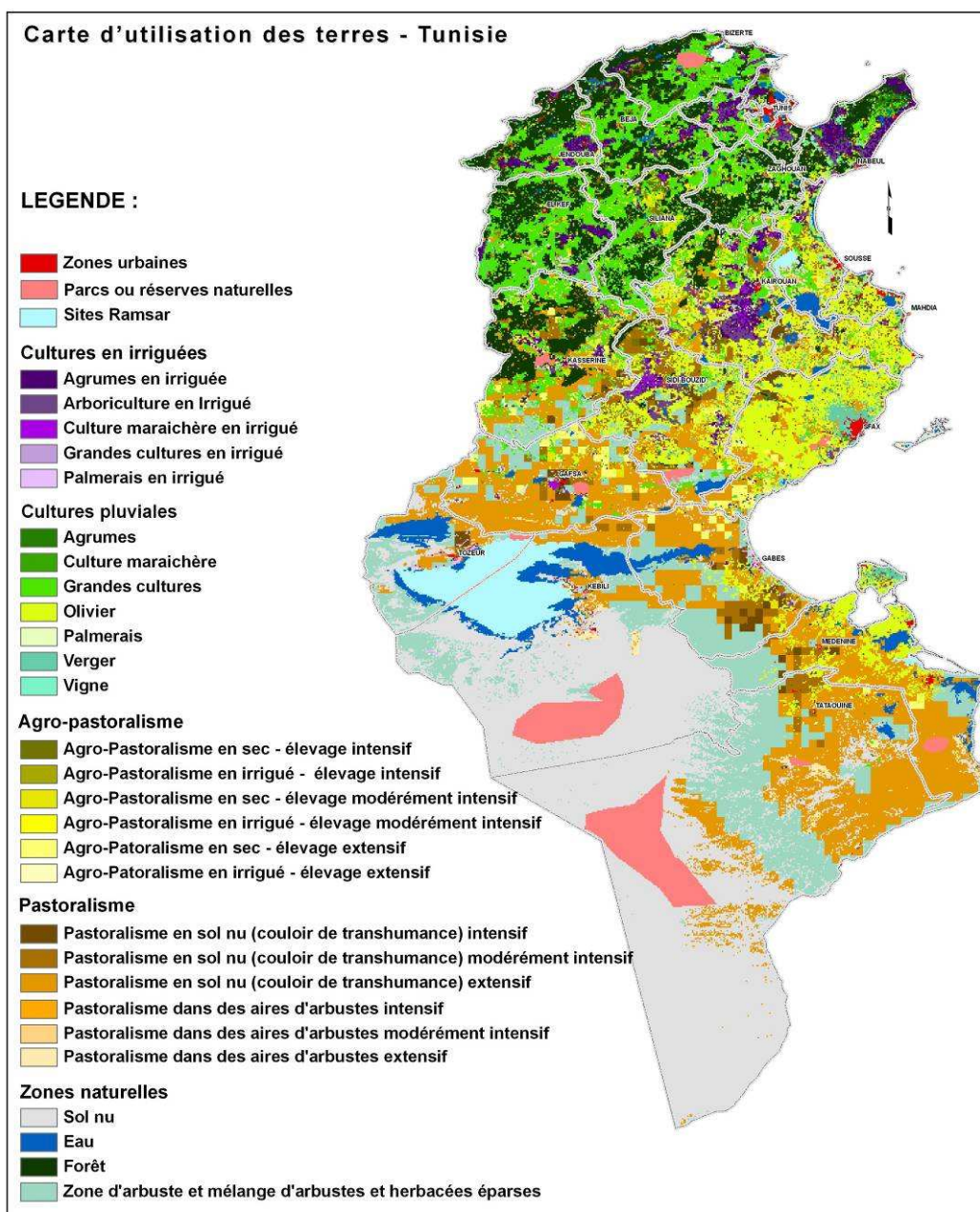


Figure 2. Occupation des sols – Tunisie (Image CARTE_LUS_ST21-AMELIRELADATunisie.jpg)

Idéalement, il faudrait acquérir l'image raster de base géo-référencée en Carthage_UTM32, contenant un code par utilisation des sols, à partir de laquelle cette image au format JPEG a été réalisée. Cette couche de données est disponible au ministère de l'agriculture⁹.

⁹ Email de Mouna Sfaxi du 30/06/2009

Cependant, en lieu et place de l'image raster, les couches suivantes ont été ramenées par la délégation tunisienne lors de la mission d'octobre 2009 :

- « agr_area » : zones agricoles ;
- « forest » : zones forestières ;
- « irrigated » : zones irriguées ;
- « urb_area » : zones urbaines ;
- « soil_qual » : qualité des sols ;
- « slopes » : pentes.

Les couches agr_area, forest, irrigated, urb_area peuvent éventuellement être exploitées pour générer les données « occupation du sol » nécessaires au modèle PEGASE, mais cela nécessiterait un travail supplémentaire.

2 - 1 - 6. Limites administratives

Un certain nombre d'informations nécessaires à une application de PEGASE (entres autres les informations sur le cheptel) ne sont disponibles que par entités administratives (communes, ...). Il est donc nécessaire de disposer des limites de ces entités administratives pour pouvoir géoréférencer ces données.

Deux couches géographiques correspondant aux limites administratives se trouvent sur le CD-ROM SIG : « Délégations » et « Gouvernorats », toutes deux au format « coverage » d'ESRI ArcInfo.

Etant donné que les rejets relatifs au cheptel ont été transmis globalisés par gouvernorat, la couche « Gouvernorats » sera utilisée comme couche des limites administratives pour géo-localiser les rejets liés au cheptel dans PEGASE.

2 - 1 - 7. Caractéristiques du réseau hydrographique

Afin de calculer la qualité des eaux de surface, il est nécessaire préalablement de calculer les vitesses et hauteurs d'eau dans les rivières. Pour ce faire, il est nécessaire de connaître les pentes et largeurs des rivières.

PEGASE permet d'estimer de manière automatique les pentes et largeurs des rivières en tout point :

- soit en utilisant (pour les pentes) le modèle numérique de terrain ;
- soit en utilisant (pour les largeurs) des relations statistiques largeurs / bassin versant / pentes.

Ces estimations permettent d'effectuer des simulations PEGASE, même en l'absence de tout renseignement spécifique. Il est cependant très utile de disposer d'informations plus précises, principalement pour les cours d'eau importants.

Des données concernant les largeurs et les pentes pour certains cours d'eau importants doivent encore être transmises.

2 - 1 - 8. Singularités du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique actuel ne correspond plus au réseau « naturel » préexistant. Il a été en effet fortement modifié par l'homme :

- par la construction de barrages (voir § 3.1 ci-après) ;
- par la construction de canaux qui dérivent une partie des rivières ;
- par des prélèvements d'eau pour l'industrie, l'irrigation ;
- par des modifications de la morphologie des cours d'eau (canalisation, ...).

Il est naturellement nécessaire de collecter ces singularités et de les injecter dans le modèle.

Les données concernant les barrages (hauteurs, largeurs, débits rejetés, ...) sont disponibles au service des barrages.

Des données concernant les prélèvements d'eau par des canaux ou pour l'irrigation ont été transmises à l'Aquapôle¹⁰. Il s'agit de données journalières des prélèvements faits par la SECADENORD (société pour l'exploitation des canaux et adduction au nord) des années 2007 et 2008, fournies par Mr Sami Azouz responsable à la SECADENORD. L'ANPE doit encore récupérer des données à ce sujet (par exemple, la position précise de ces prélèvements et les unités).

Des caractéristiques de barrages ont également été fournies à l'Aquapôle¹¹. Les données reçues concernent les barrages suivants :

- Barrage de Ben Metir (oued ELLIL)
- Barrage sur l'oued Bou Heurtma
- Barrage sur l'oued Kasseb
- Barrage d'El Aroussia (Medjerda)
- Barrage de Nedeur (oued Mellegue)
- Barrage sur l'oued R'Mil
- Barrage de Sidi Salem (Medjerda)
- Barrage dur l'oued Siliana
- Barrage Zouitina (oued Barbara)
- Barrage sur l'oued Lakhmess

Parmi les caractéristiques précisées dans ces documents, les données suivantes seront utiles à la modélisation :

- La situation (cours d'eau et gouvernorat). Une position plus précise (coordonnées X, Y) sera néanmoins nécessaire ;
- Les caractéristiques principales de la retenue (aire, capacité) ;
- Les caractéristiques principales du barrage (hauteur, longueur de crête) ;
- Les caractéristiques des ouvrages de prises et d'évacuation des crues (débit maximal).

¹⁰ Email de Mouna Sfaxi du 16/10/2009

¹¹ Email de Jamil Saidani du 29/10/2009

2 - 2. Données météorologiques

2 - 2 - 1. Introduction

La qualité des eaux de surface dépend naturellement des conditions hydrométéorologiques. Dans PEGASE, les données hydrométéorologiques utilisées sont :

- les données d'insolation solaires horaires (qui permettent de calculer (si nécessaire) la production primaire) ;
- les températures journalières des rivières en quelques points (qui permettent de recalculer la température de l'eau en tout point du réseau hydrographique et à tout moment) ;
- les débits journaliers des rivières en quelques points (qui permettent de recalculer les débits en tout point du réseau hydrographique et à tout moment)¹².

Outre les données numériques des mesures, il est naturellement aussi nécessaire de connaître la localisation des stations de mesure (coordonnées x,y plus identifiant de la rivière).

2 - 2 - 2. Insolations

Ces données concernant les valeurs horaires (ou éventuellement journalières) de l'insolation sont en attente de réception (Météo Tunisie ?). Etant donné que, d'après nos informations, il y a peu de phytoplancton dans la Medjerda, des informations moins précises (durées journalières d'ensoleillement, ..) pourraient être suffisantes¹³.

2 - 2 - 3. Températures

Les températures journalières des rivières sont en attente de réception (DGRE ?).

2 - 2 - 4. Débits des rivières

Le **tableau 3** ci-après montre un résumé concernant la disponibilité des données par station et par année telles qu'elles ont été transmises par Mouna SFAXI le 08/06/2009.

- en vert : données complètes pour l'année
- en rouge : nombreuses données manquantes → inutilisable
- en orange : nombre réduit de données manquantes (éventuellement utilisables après traitement spécifique) ou année incomplète (vérifier si les données relatives à la période non transmise sont disponibles).

¹² PEGASE ne calcule pas les débits des rivières en faisant un calcul complet pluies / débits qui demande énormément de données tout en ayant une précision relative. PEGASE recalcule les débits en tout point du réseau hydrographique à partir des mesures de débit en un certain nombre de point. Ce calcul est effectué en calculant les débits spécifiques « naturels » (hors influence humaine) par sous-bassin

¹³ Si une modélisation plus fine de l'eutrophisation des barrages s'avérait nécessaire, les valeurs horaires en plusieurs stations s'avéreraient nécessaires

On constate qu'il y a très peu de données utilisables pour les années 2006 à 2008, années sur lesquelles devraient se faire les simulations. Il faudrait voir si de nouvelles données sont disponibles.

Les coordonnées des stations de mesure de débits sont précisées dans les fichiers de débits transmis.

Tableau 3. Disponibilité des données « débits » par station et par année

| ID | NOM | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 |
|---------------|-------------------|------------------------------|---------|--------------|-------------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| 1,485,900,188 | AR-PT BIZERTE-MEJ | | | | | | sept, oct, nov, déc | 1jan->6mars | 1jan->26fév |
| 1,485,900,141 | BJ-EL HERRI-MEJ | juin, oct, déc | | | | 1jan->31aout ?? | 12sept->31oct | complet | 1sept->31déc ?? 29mai->5juin |
| 1,485,802,270 | BJ-GP5 LHR | | | | | | sept, oct, nov, déc | | |
| 1,485,501,635 | BJ-JBL LAOUEJ-SI- | complet | complet | complet | sept, oct, nov, déc | | sept, oct, nov, déc | | complet |
| 1,485,801,890 | BJ-KHALED AVL-KH | | | | jan, fév, juill, sep, oct, nov, déc | | sept, oct, nov, déc | | 1jan->18mars |
| 1,485,900,139 | BJ-MJZ GP5-MEJ- | | | | | | | 1->13jan, 11->25sept | complet |
| 1,485,793,050 | BJ-MKHACHBIA-AVAL | complet | complet | complet | sept, oct, nov, déc | | sept-oct-nov-déc | 1jan->10juill | complet |
| 1,485,602,240 | BJ-PT BEJA-BEJ- | | | | | | | | 1-15jan |
| 1,485,900,130 | BJ-SLOUGHIA-MEJ- | complet | complet | complet | sept, oct, nov, déc | 1jan->31aout ?? | 24->29nov | 13->19juil (d. hor. àpd 1sept) | (d. hor j-> 31aout) 28mai->30juil |
| 1,485,400,180 | JD-BOUSALEM-MEJ- | complet | complet | complet | sept, oct, nov, déc | sept, oct, nov, déc | non enregistrés | 1->14jan | 1sept->31déc ?? |
| 1,485,400,110 | JD-GARDIMAOU-MEJ | complet | complet | complet | sept, oct, nov, déc | sept, oct, nov, déc | non enregistrés | 1->18jan | 1sept->31déc ?? |
| 1,485,400,160 | JD-JENDOUBA-MEJ | complet | complet | complet | sept, oct, nov, déc | | sept, oct, nov, déc | 1jan->21mars | 1sept->31déc ?? |
| 1,485,001,160 | JD-PLAINE RAGHAI- | complet | complet | complet | sept, oct, nov, déc | | | | |
| 1,485,101,211 | JD-PT GP17 MLG- | | | | | | sept, oct, nov, déc | | 1->14jan, 18oct->2déc |
| 1,485,106,125 | KF-HAIDRA SRT | complet | complet | complet | sept, oct, nov, déc | | | | |
| 1,485,101,210 | KF-K13 MLG- | complet | complet | complet | 15->31déc | | sept, oct, nov, déc | 1jan->23mars | 1sept->31déc ?? |
| 1,485,104,380 | KF-PT ROUTE RMEL- | 25->31mai, juin, juill, août | complet | 4sept->31déc | 5juin->31déc | | | | |
| 1,485,100,506 | KF-PT RTE SARRAT- | complet | complet | complet | 11nov->31déc | | sept, oct, nov, déc | | 1->28jan |
| 1,485,201,355 | KF-S/MEDIEN TSA- | complet | complet | complet | complet | | sept, oct, nov, déc | 1jan->22mars | complet |
| 1,485,900,170 | MN-JEDEIDA-MEJ- | | | | | 1jan->31aout ?? | 18->24oct | complet | complet |
| 1,485,001,110 | RARAI SUPERIEUR | complet | complet | complet | sept, oct, nov, déc | | | | |
| | SL-M12 OSAFA-SIL | | | | | | sept, oct, nov, déc | | complet |
| | KF-SERS VILLE-TSA | | | | | | sept, oct, nov, déc | 1->27jan | complet |

2 - 3. Rejets

2 - 3 - 1. Introduction

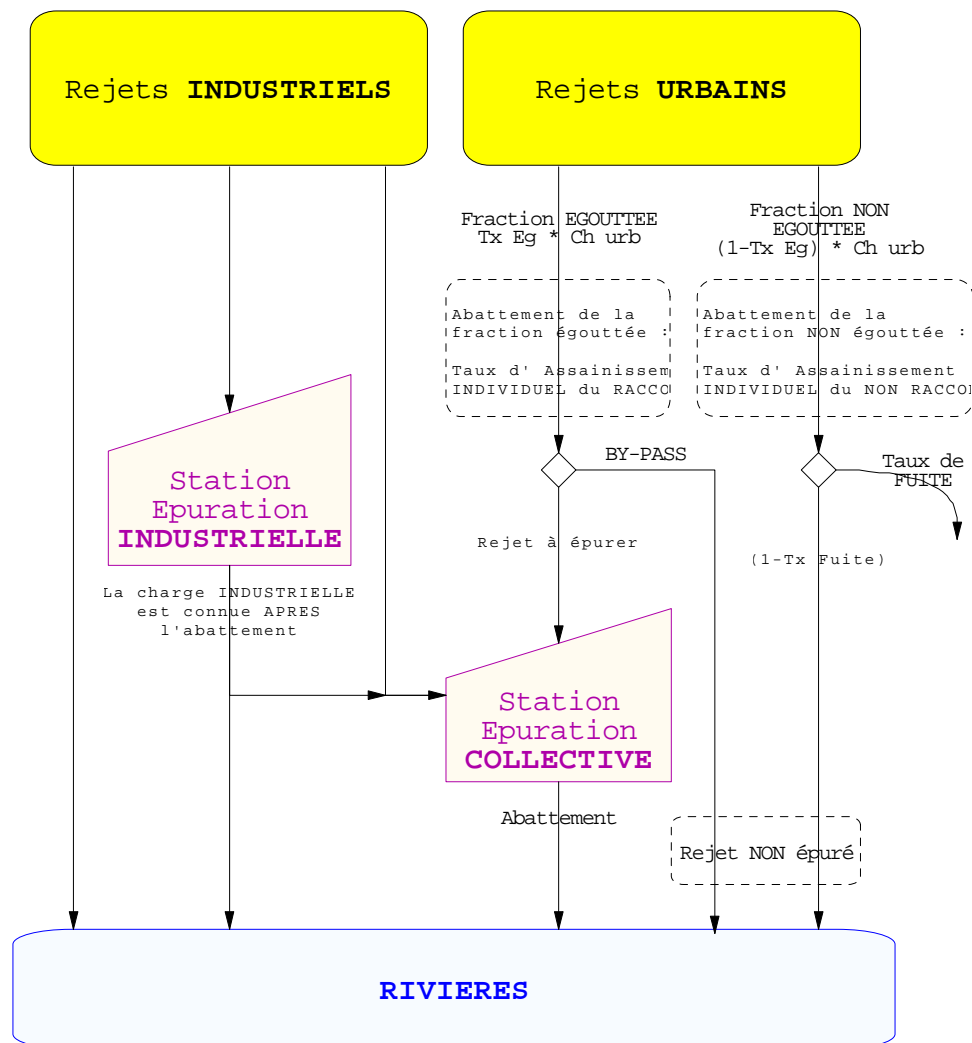
Pour permettre la simulation de la qualité de l'eau, un inventaire et une évaluation des apports, des rejets et des installations d'épuration doivent être réalisés. Les variables intervenant de manière prioritaire dans l'élaboration d'une stratégie de prévention et d'épuration à l'échelle de la région sont prises en considération pour ce qui concerne les pollutions 'classiques': matières carbonées, azotées et phosphorées. Les apports et rejets d'autres types de composés (par exemple, métaux lourds, pesticides, etc.) ne font pas l'objet du présent travail.

La classification adoptée dans PEGASE est actuellement la suivante :

- **apports et rejets industriels**, de type ponctuel : ils comprennent tous les apports et rejets industriels (soumis à autorisation et/ou redevance). Dans cette catégorie sont également repris les rejets provenant des élevages intensifs lorsqu'ils sont soumis à autorisation de rejet.
- **apports et rejets domestiques en égout**, de type ponctuel : comprennent les charges domestiques et assimilées (c'est-à-dire les charges des collectivités, petites industries, artisanat, commerce, etc.) non soumises à autorisation de rejet et qui sont collectées par un réseau d'assainissement. La population concernée peut être classée en différentes catégories (par exemple, la population sédentaire, la population "hors domicile" (bureaux, etc.), la population touristique, la population des hôpitaux, ...) et peut varier au cours de l'année.
- **rejets en sortie des stations d'épuration collectives** après traitement de la charge d'entrée (en provenance d'apports ou de rejets domestiques et/ou industriels). Ces rejets des stations d'épuration collectives sont de type ponctuel et sont calculés en fonction des charges en entrée de station et des caractéristiques des stations.
- **apports et rejets domestiques non rejetés en égout** (non raccordés), de type dispersé, calculés à partir des informations relatives aux charges urbaines totales et aux taux de raccordement et de collecte.
- **apports et rejets directs d'élevage**, de type dispersé : la charge polluante émise par les animaux d'élevage est pour la majeure partie déversée sur les sols agricoles, soit directement quand le bétail est en pâture, soit par épandage mécanique des fumiers et des lisiers quand les animaux sont à l'étable. Une partie de ces déjections animales est cependant rejetée directement en rivière ou en égout (par exemple, trop-plein des cuves de stockage).
- **apports provenant du lessivage des sols**, de type diffus, variant avec le type et l'occupation des sols.

Prise en compte des rejets domestiques et industriels

Les relations entre rejets urbains, rejets industriels et stations d'épuration, telles que prises en compte dans la modélisation, sont représentées dans l'organigramme ci-après (figure 4).



Tx Eg : Taux d'égouttage (proportion de la charge arrivant à l'entrée de la station)
Tx Ass Rac : Taux d'assainissement individuel de la fraction RACCORDEE de la charge urbaine
Tx Ass N Rac : Taux d'assainissement individuel de la fraction NON RACCORDEE de la charge urbaine
Tx Fuite : Taux de fuite appliqué à la fraction NON RACCORDEE de la charge urbaine
 : Cette fraction n'aboutit jamais au milieu (par exemple en raison de la distance trop élevée entre le point de rejet et le milieu, l'existence d'un puits profond, etc.)
ch urb : Charge URBAINE BRUTE (pollution potentielle)

Figure 4. Représentation des rejets

2 - 3 - 2. Rejets urbains

Des informations concernant les rejets urbains **connectés** sont disponibles à l'ONAS (Mr TOUNSI), essentiellement sur les rejets actuels. Celles-ci sont en attente de réception.

Les rejets urbains **non connectés** sont répertoriés dans le rapport PISEAU (« Actualisation de l'inventaire des sources de pollution hydrique »), pour chaque gouvernorat. Ces rejets sont des sources de pollution soit pour les oueds, soit pour les nappes phréatiques :

- les rejets sont localisés par une adresse, voire une localité, ainsi que le milieu du rejet. Idéalement, il faudrait connaître les coordonnées de chaque rejet.
- la quantité rejetée est exprimée en m³/jour et la qualité des eaux usées est spécifiée en terme de DCO, DBO, et MES (en mg/l). Ces valeurs pourront être converties en charges polluantes, puis en nombre d'équivalent-habitant, utilisable par le programme PEGASE.
- lorsqu'il s'agit de dépôts d'ordures (déchets solides), la quantité n'est que quelquefois spécifiée (en t/jour).

Tableau 5. Nombre de rejets urbains répertoriés dans le rapport PISEAU (année : 2004)

| Gouvernorat | Rejets eaux usées non traitées | Dépôts d'ordures |
|-------------|--------------------------------|------------------|
| Ariana | 4 | 1 |
| Béja | 10 (+4 STEPs) | 12 |
| Bizerte | 8 | 15 |
| Jendouba | 3 (+5 STEPs) | 9 |
| Kasserine | 7 (+1 STEP) | 7 |
| Kef | 8 (+1 STEP) | 11 |
| Manouba | 1 (+2 STEPs) | 0 |
| Siliana | 8 (+2 STEPs) | 9 |

Des informations complémentaires concernant les rejets **futurs** sont à rechercher (ONAS, Département développement, département épuration (Mr CHAOUACHI)).

2 - 3 - 3. Rejets industriels

Les informations sont disponibles au département rejets industriels de l'ONAS (Mme Haj SALEM).

Un fichier Excel contenant 1189 rejets (**connectés** et **non connectés** au réseau d'assainissement) a été transmis le 30/06/2009. Dans cette liste, seule une petite partie des ces rejets s'écoule dans le réseau hydrographique de la Medjerda (la plupart est évacuée dans la Méditerranée). Un tri, en concertation avec l'ANPE, sera nécessaire.

Après analyse des données de ce fichier, nous avons relevé que :

- les rejets concernent uniquement la DCO. Il n'y a **pas de données azote et phosphore** (ces analyses sont considérées uniquement pour les rejets urbains)
- beaucoup d'industries n'ont pas de données de rejets (l'analyse n'est pas systématique lorsqu'elles n'ont pas de rejet important)

- les stations d'épuration sont données via un nom. Il serait plus sécurisant de les avoir via un code (qui devrait alors se retrouver dans les fichiers "stations d'épuration")
- il y a 20 stations d'épuration existantes
- il y a des (au moins 2) rejets industriels renseignés comme rejetant en milieu naturel et également en station d'épuration (rejets 179 et 1408) --> **incohérence ?**
- il faudrait également connaître les raccords futurs des rejets au réseau d'assainissement et non raccordés à une STEP actuellement (voir avec Mr Sobhi Tounsi)

Les rejets industriels **non connectés** sont répertoriés dans le rapport PISEAU (« Actualisation de l'inventaire des sources de pollution hydrique »), pour chaque gouvernorat. Ces rejets sont des sources de pollution soit pour les oueds, soit pour les nappes phréatiques :

- les rejets sont localisés par une adresse, voire une localité, ainsi que le milieu du rejet. Il faudrait connaître les coordonnées de chaque rejet.
- la quantité rejetée est exprimée en m³/jour, et la qualité des rejets est spécifiée en terme de DCO, DBO, et MES (en mg/l), ce qui est directement utilisable par PEGASE. Il n'y a **pas de données azote et phosphore**.

Tableau 6. Nombre de rejets industriels répertoriés (année : 2004)

| Gouvernorat | Rejets industriels non raccordés |
|-------------|----------------------------------|
| Ariana | 5 |
| Béja | 21 |
| Bizerte | 16 |
| Jendouba | 17 |
| Kasserine | 3 |
| Kef | 6 |
| Manouba | 24 |
| Siliana | 29 |

2 - 3 - 4. Stations d'épuration

Les informations sur les stations d'épuration actuelles sont disponibles à l'ONAS (département épuration, Mr Chaouachi), et sont en attente de réception. Il s'agit de connaître pour chaque station :

- un code, un nom
- les coordonnées géographiques
- la date de mise en service
- le type de traitement effectué, et la capacité MAXIMALE de traitement (en nombre d'équivalent-habitant)
- le taux de collecte

Des informations complémentaires concernant les rejets **futurs** sont disponibles (ONAS, Département développement). Un fichier Excel contenant une liste de 6 stations d'épuration futures (qui seront installées en 2011 ou 2012) a été transmis le 22/06/2009. Les seules informations disponibles dans ce fichier sont :

- le nom, le gouvernorat

- la capacité hydraulique (débit en m³/l)
- la charge organique (en Kg DBO5/jour)
- la date d'installation prévue

Sont encore à préciser :

- les coordonnées
- les informations relatives au type de traitement ou aux abattements
- le taux de collecte

2 - 3 - 5. Abattements des stations d'épuration

Ces informations sont disponibles à l'ONAS (département épuration, Mr Chaouachi).

Ces données sont en attente de réception. Les informations relatives au type de station et aux abattements seront transmises prochainement.

2 - 3 - 6. Cheptel

Le recensement des bovins, moutons et chèvres agglomérés par gouvernorat pour les années 2003 à 2008 a été envoyé dans un tableau EXCEL dont un extrait est montré ci-après.

Tableau 7. Répartition des bovins de race pure (année : 2003/2004)

| Gouvernorat | Nombre Total |
|-------------|--------------|
| Tunis | 3770 |
| Ariana | 19310 |
| Manouba | 14000 |
| Béjà | 27170 |
| Jendouba | 28030 |
| Kef | 6820 |
| Siliana | 6970 |
| Nord | 178920 |

Ces données seront liées à la couche géographique des gouvernorats (cf. 1.5) en vue de les géo-localiser.

2 - 4. Mesures de qualité

Le modèle calcule la qualité des cours d'eau dans des conditions hydrologiques données à partir des éléments suivant :

- des données de débits mesurés
- des températures en un point du réseau
- les insolation solaires horaires
- les valeurs des rejets et les apports diffus des sols.

Les données relatives à la qualité mesurée dans les cours d'eau ne sont donc pas utilisées pour réaliser des simulations.

Cependant, les mesures de la qualité du réseau hydrographique sont nécessaires pour pouvoir VALIDER les résultats des simulations par comparaison entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées (à un endroit donné et à un moment donné).

Comme pour les données "débits", le traitement des données "qualité" comporte deux phases :

- le traitement des stations de mesure de qualité et leur positionnement dans le réseau hydrographique modélisé explicitement ;
- le formatage des données "qualité" proprement dites et la vérification des données disponibles.

Ces données ont été transmises par l'ANPE, puis assemblées dans une base de données unique.

Un fichier au format d'un tableau EXCEL « base de données Medjerda » a été envoyé par Mouna SFAXI le 20/05/2009. Ce fichier contient les mesures de qualité observées entre 2005 et 2009 à raison d'1 (2005, 2006, 2007) ou 2 (2008 et 2009) mesures par an, sur une vingtaine de sites. Certaines variables sont mesurées systématiquement (T°, pH, conductivité, salinité, oxygène dissous, NO₃⁻, DCO) alors que les autres sont souvent manquantes. Ce fichier contient également la localisation des stations de mesures en degrés, minutes, secondes.

Les données existantes permettent la validation du modèle. Toutefois, cette validation sera d'autant plus fine que le nombre et la qualité des données augmenteront.

2 - 5. Tableau récapitulatif

Le **tableau 8** ci-après reprend un récapitulatif des données nécessaires pour une application de PEGASE au bassin tunisien de la Medjerda. Sont reprises dans ce tableau :

- les données considérées comme disponibles et utilisables dès maintenant (X) ;
- les données disponibles partiellement : ce sont soit des données dont la disponibilité est prouvée, mais qui n'ont pas encore été transmises, soit des données qu'il faudrait améliorer pour une utilisation optimale de PEGASE (X) ;
- les données manquantes : ce sont des données non transmises et dont la disponibilité est incertaine (X).

Tableau 8. Récapitulatif des données

| Données | Disponibles et utilisables | Disponibles partiellement et/ou à améliorer | Manquantes |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------------|------------|
| 1. Données géographiques | | | |
| 1.1 Réseau hydrographique | X | | |
| 1.2 MNT | X | X | |
| 1.3 Bassins versants | X | | |
| 1.4 Occupation des sols | X | X | |
| 1.5 Limites administratives | X | | |
| 1.6 Singularités du réseau hydrographique | | X | |
| 1.7 Caractéristiques du réseau hydrographique | | X | |
| 2. Données météorologiques | | | |
| 2.1 Insolations | | | X |
| 2.2 Débits des rivières | | X | |
| 2.3 Températures de l'eau | | | X |
| 2.4 Localisation des points de mesure - débits - température - insolation | X | | X X |
| 3. Rejets | | | |
| 3.1 Rejets urbains | | X | |
| 3.2 Rejets industriels | X | | |
| 3.3 Stations d'épuration | | X | X |
| 3.4 Abattement stations d'épuration | | X | X |
| 3.5 Cheptel | X | | |
| 4. Mesures de qualité | | | |
| 4.1 Localisation des points de mesure | X | | |
| 4.2 Mesure de qualité | X | | |

2 - 6. Conclusions relatives aux données

Peu de données semblent poser des problèmes importants pour une application de PEGASE au bassin de la Medjerda. En effet, pour la plupart des données encore manquantes actuellement, leur disponibilité nous a été confirmée : soit Mouna Sfaxi a pris les contacts nécessaires, soit il s'agit de données non absolument nécessaires.

Les principales données manquantes sont :

- l'insolation et la température de l'eau : ces informations sont en attente de réception.
- les rejets urbains raccordés, les informations relatives au type de station d'épuration et aux abattements, ainsi que les informations sur la situation future de l'assainissement : ces informations sont disponibles à l'ONAS (département épuration, département développement), et sont en attente de réception.

Les données à améliorer sont :

- les débits pour les années 2006 à 2008. Après analyse des fichiers transmis, il apparaît que de nombreuses mesures journalières sont manquantes, ce qui rend les données peu (voire pas) exploitables.
- les singularités et caractéristiques du réseau hydrographique : ces informations devraient être transmises lors de discussions interactives afin de mieux connaître et appréhender le système à modéliser. Des données provenant de la SECADENORD (société pour l'exploitation des canaux et adduction au nord) ont été transmises concernant les prélèvements pour l'irrigation, et les caractéristiques des barrages ont été fournies.

Chapitre 3. Problématiques spécifiques

Le modèle PEGASE est opérationnel sur un grand nombre de BV en Europe (Belgique, France, Pays-Bas, Allemagne, Luxembourg). Il est parfaitement adapté aux caractéristiques de ces régions tempérées et produit d'excellents résultats.

L'objectif étant de rendre le modèle opérationnel et efficace en Tunisie, il est indispensable de tenir compte de toutes les spécificités locales. Ainsi, ci-dessous sont listées quelques problématiques spécifiques à la Medjerda (liste non exhaustive). Même si aucune d'entre elles ne posera un réel problème, il sera nécessaire d'avoir une réflexion en concertation avec les experts de l'ANPE afin d'implémenter les adaptations nécessaires.

3 - 1. Problématique des grands barrages

La construction des grands ouvrages hydrauliques a modifié fortement le régime d'écoulement des rivières du bassin de la Medjerda. En effet, sur le cours d'eau de la Medjerda et sur ses principaux affluents, plusieurs grands barrages de stockage d'eau sont édifiés :

- le barrage de **Nébeur** sur l'oued Mellégue (capacité de 182 Mm³, mis en eau en 1954) ;
- le barrage de **Béni Mtir** sur oued E-lilil (capacité de 38 M m³, mis en eau en 1954) ;
- le barrage de **Kasseb** sur l'oued Kasseb (capacité de 82 M m³, mis en eau en 1968) ;
- le barrage de **Bouhertma** sur l'oued Bouhertma (capacité de 117 Mm³, mis en eau en 1976) ;
- le barrage de **Aïn Dalia** sur la Medjerda, partie Algérienne (capacité de 45 Mm³, mis en eau en 1980) ;
- le barrage de **Sidi Salem** sur la Medjerda (capacité de 762 Mm³, mis en eau en 1982) ;
- le barrage de **Siliana** sur l'oued Siliana (capacité de 70 M m³, mis en eau en 1987) ;
- le barrage mobile de **Laâroussia** sur la Medjerda (mis en eau en 1950). Sa principale fonction est la fourniture d'eau à un canal d'irrigation à usage local et au canal Medjerda Cap Bon ;
- le barrage **Barbera** sur l'oued Barbera (Aïn Drahem).

D'autres barrages pourraient également être construits dans le futur. Il est naturellement nécessaire que le modèle puisse les prendre en compte pour des simulations prospectives.

Le barrage de Sidi Salem (1981), de part sa grande capacité de rétention (762 Mm³) et son mode de gestion (lâchages d'eau fortement non stationnaires pour optimiser la production d'électricité), provoque les plus importantes et les plus évidentes modifications du régime d'écoulement. On observe en effet depuis sa construction des répercussions directes sur la morphologie du lit de la rivière¹⁴, ainsi que des impacts évidents sur l'environnement.

¹⁴ particulièrement la réduction de capacité d'écoulement du fleuve suite aux engravements, entraînant des débordements des eaux chargées sur les villes et les parcelles agricoles de plus en plus fréquents et spectaculaires

La construction de ces grands barrages est justifiée pour stocker les eaux de ruissellement en période de crue et les rendre disponibles en période d'étiage. Néanmoins, un nouveau compromis entre les actions nécessaires de régularisation des eaux de surface et les actions destinées à lutter contre les effets dommageables sur l'environnement devrait être trouvé.

Le modèle PEGASE inclut déjà une représentation des barrages (utilisée entre autres sur les bassins de la Loire et de la Garonne). Cette représentation pourrait être utilisée pour la plupart des barrages du bassin de la Medjerda. Il semble cependant nécessaire, pour certains d'entre eux (Mellègue, ...), d'améliorer cette représentation pour prendre en compte explicitement les valeurs des débits rejetés à l'aval des barrages.

3 - 2. Débit anthropisé

En aval du barrage de Sidi Salem, le débit est fortement anthropisé. En effet, l'eau est lâchée 2 fois par jour pendant quelques heures, dans le but de faire tourner les turbines électriques¹⁵. En saison sèche, les lâchés sont réalisés également en fonction des besoins en eau d'irrigation à l'aval. La modélisation de tels régimes d'écoulement n'est actuellement pas prise en compte dans le modèle PEGASE, puisque le modèle effectue les calculs sur base d'un pas de temps journalier.

Ainsi, la modélisation du bassin de la Medjerda devra très certainement se découper en 2 applications distinctes :

- la partie haute de la Medjerda (en amont du barrage de Sidi Salem) peut être modélisée de manière 'classique' (avec un pas de temps journalier) tout en prenant en considération toutes les spécificités locales (singularités du réseau, nature des sols, végétations, ...)
- la partie basse de la Medjerda (en aval du barrage de Sidi Salem) nécessitera l'utilisation de méthodes spécifiques. Une solution envisageable serait d'utiliser le mode « stationnaire » de PEGASE pour simuler les 2 modes caractéristiques de la Medjerda en aval du barrage (avec et sans turbinage).

3 - 3. Affluents intermittents

Une autre difficulté à prendre en compte est le fait que certains cours d'eau sont intermittents (à sec pendant une partie de l'année). Ceci n'est pas explicitement prévu dans PEGASE (où on suppose toujours un débit minimum).

Une première application de PEGASE pourrait être réalisée d'abord avec uniquement les cours d'eau permanent. En fonction des résultats et des attentes de l'ANPE, l'extension de PEGASE aux cours d'eau intermittents pourrait être envisagée.

¹⁵ 36 MW installés - débit turbinable 80 m³/s pour une hauteur de chute de 40 m, donc puissance pratique 25 MW

3 - 4. Prélèvements très importants

Des prélèvements très importants sont réalisés dans les cours d'eau à destination de l'irrigation, de sorte que le débit à l'embouchure de la Medjerda est quasi nul. Etant donné qu'il existe un certain nombre de prélèvements non déclarés, la difficulté sera d'obtenir un inventaire le plus complet possible (position et débits).

3 - 5. Problèmes de crues, d'érosion, ...

La nature des sols est extrêmement propice à l'érosion du lit des rivières. Ainsi, le profil du lit a peut être été complètement modifié par le passage d'une crue, modifiant ainsi constamment les caractéristiques d'écoulement.

3 - 6. Calibration du modèle

Par rapport à beaucoup de modèles, un des avantages de PEGASE est qu'il nécessite peu de calibration. En effet, la plupart des processus incorporés dans le modèle (dégradation de la matière organique, nitrification,...) sont paramétrisés avec des paramètres physiques (vitesse de dégradation, ...) dépendant eux même des conditions du milieu (températures, hauteurs d'eau, ...).

A priori, il n'y a donc pas de raison de les recalibrer pour un nouveau domaine de simulation. En pratique, la calibration ne concerne donc que les fonctions d'apport diffus des sols.

Chapitre 4. Projet de modélisation

Suite à cette présente étude de faisabilité, un projet de modélisation sera rédigé et proposé en partenariat avec l'ANPE. Les documents relatifs à ce projet seront rapidement disponibles.

L'objectif de ce projet est de renforcer l'Agence Nationale de Protection de l'Environnement en Tunisie dans sa mission de gestion de la qualité des eaux du principal cours d'eau tunisien, la Medjerda, par la modélisation explicite de son écosystème rivière et de son bassin versant, permettant d'établir la relation pression / impact entre les différentes charges de pollution et la qualité physico-chimique de l'eau.

Ce renforcement vise les aspects suivants :

- Renforcement du rôle l'ANPE dans le contrôle de la qualité des eaux de la Medjerda et de la coordination entre les différents acteurs chargés de la surveillance des rejets urbains, industriels, agricoles.
- Renforcements des compétences au sein de l'ANPE avec la formation d'un expert en modélisation PEGASE.

L'objectif est également de servir de modèle aux autres pays de la région désireux de mettre sur pied un réseau similaire.

Chapitre 5. Conclusions générales

Le partenariat entre l'ANPE et l'Aquapôle a été initié par la mise en œuvre du projet COPEAU - LIFE Pays Tiers – 06/TCY/TN/275 (2007-2009). Ce projet s'inscrit dans le cadre de la mise en place d'un réseau de surveillance de la qualité des eaux continentales en Tunisie, qui devrait à terme regrouper l'ensemble des intervenants dans le domaine de la surveillance et du contrôle de la qualité des eaux de surface et souterraines.

Le projet COPEAU, réalisé en partenariat entre l'ANPE et l'Aquapôle, avait pour but de renforcer l'ANPE dans ses missions (i) de contrôle de pollution des eaux et (ii) de coordination des intervenants agissant dans le domaine de la surveillance et de contrôle de la qualité et de la pollution des eaux.

En complément au projet COPEAU, l'Aquapôle et l'ANPE ont réalisé cette présente étude de faisabilité pour la mise en place d'une méthodologie et la collecte des données en vue de la modélisation de l'ensemble de l'écosystème du bassin versant de l'oued Medjerda¹⁶, principale artère du réseau hydrographique tunisien.

Des ateliers de travail et des missions de terrain ont permis de dresser un bilan des données disponibles en Tunisie et exploitables dans le cadre d'un projet futur de modélisation du bassin versant entier de la Medjerda (données disponibles, sources, qualité et pertinence). Il en ressort que :

- **Au niveau des données géographiques**, les données hydrographiques transmises vont permettre de créer un réseau hydrographique topologiquement correct, de générer le modèle numérique de terrain, de définir les limites du bassin et les limites administratives, et d'intégrer les singularités du réseau hydrographique. En ce qui concerne l'occupation des sols et les caractéristiques du réseau hydrographique, les données n'ont pas pu être transmises mais elles devraient être disponibles et permettre de répondre aux besoins du modèle.
- **Au niveau des données météorologiques**, les données d'insolation horaires voire journalières devraient être suffisantes. Toutefois, ces données ainsi que les données de températures journalières des rivières n'ont pas pu être transmises et donc analysées. Par contre, les données de débits des rivières sont suffisamment complètes, du moins pour certaines années, et donc exploitables.
- **Au niveau des rejets**, les rejets urbains sont bien répertoriés (étude PISEAU) mais les données de rejets industriels sont lacunaires (pas de données azote et phosphore et absence de données pour certaines industries). Par ailleurs, celles-ci devront être triées pour ne conserver que celles qui concernent des rejets qui vont dans la Medjerda. Les données concernant les stations d'épuration existent mais n'ont pas été transmises, tandis que les données concernant les cheptels bovins ont été transmises par gouvernorat.
- **Au niveau des mesures de qualité**, des données existent et ont été transmises à l'Aquapôle ; celles-ci permettront de valider le modèle.

¹⁶ Etude de faisabilité d'une méthodologie à l'échelle globale du bassin versant de la Medjerda : financement Région wallonne- Coopération avec la Tunisie (programme 2008-2010)

L'étude dresse également un bilan des problématiques spécifiques dont il faudra nécessairement tenir compte dans l'adaptation du modèle au contexte local. Celles-ci concernent principalement la présence des grands barrages implantés le long de la Mejerda et de ses affluents, la forte anthropisation du débit, liée notamment aux lâchés de barrages, le caractère intermittent de certains affluents, en fonction des périodes de l'année, la présence de prélèvements très importants notamment pour l'irrigation et enfin, des problèmes de crues et d'érosion.

En conclusion, l'analyse des échantillons de données transmises par l'ANPE et des problématiques spécifiques aux régions du Nord de la Tunisie, montre que l'application de PEGASE au bassin de la Medjerda est tout-à-fait réaliste. En effet, les données disponibles dans les administrations tunisiennes sont nombreuses et bien documentées et permettront de créer les bases de données nécessaires à une application PÉGASE. Toutefois, certaines données nécessiteront un léger traitement qui, à priori, ne devraient pas poser de problèmes. La disponibilité de la plupart des données encore manquantes actuellement nous a été confirmée. D'autre part, l'adaptation du modèle aux spécificités locales sera possible, moyennant une réflexion commune avec les experts tunisiens et les adaptations nécessaires aux codes de calcul du modèle

Cette étude de faisabilité débouche donc en toute logique sur la formulation d'un projet de modélisation (exportation des techniques et du savoir-faire de la Région wallonne aux bassins versants tunisiens). La trame de ce projet a déjà été rédigée lors du dernier atelier. Il s'agira d'un projet ambitieux et novateur en Tunisie qui pourra servir de modèle pour d'autres applications au niveau de la Région. Par ailleurs, rappelons que la Medjerda est un cours d'eau transfrontalier, et qu'il conviendrait donc de pouvoir associer l'Algérie à la démarche. L'implémentation du modèle à l'échelle internationale permettrait dans ce cas précis d'optimiser l'utilisation de PEGASE comme outil de gestion au niveau de **l'entièreté du district**.

Annexe 1 : Tableau résumé des données nécessaires

| PEGASE : Inventaire des données nécessaires | | | |
|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Donnée | Format | Description / commentaire | Responsable |
| 1. Données Géographiques | | | |
| 1.1 Réseau Hydrographique | ArcInfo Interchange file (*.e00), shapefile | - Réseau hydrographique complet, couche digitalisée des rivières à modéliser. Nécessité d'avoir des identifiants uniques (8 caractères) | |
| 1.2 Modèle numérique de terrain | ArcInfo GRID, altitudes points (x,y,z) | - résolution la plus fine possible (50-100 m) | |
| 1.3 Bassins versants | ArcInfo Interchange file (*.e00), shapefile | Délimitations des "zones hydrographiques" | |
| 1.4 Occupation des sols | ArcInfo GRID, images géoréférencées | Occupation des sols : ex Corine LandCover (à regrouper en 6 classes) | |
| 1.5 Limites administratives | ArcInfo Interchange file (*.e00), shapefile | Limite des communes (nécessaire si utilisation de données par communes) | |
| 1.6 Singularités du réseau hydrographique | Divers | - Canaux, barrages, masses eau, prélèvements eau, ... | |
| 1.7 Caractéristiques réseau hydrographique | Divers | - largeurs, pentes, ... | |
| 2. Données météorologiques | | | |
| A faire préalablement : choisir une année de référence | | | |
| 2.1 Insolations | .txt, .xls, .csv, .dbf, ... | Valeurs horaires de l'insolation solaire | |
| 2.2 Débits des rivières | .txt, .xls, .csv, .dbf, ... | Débits journaliers des rivières | |
| 2.3 Températures | .txt, .xls, .csv, .dbf, ... | Températures journalières des rivières | |
| 2.4, 2.5, 2.6 : Localisation des points de mesure | .txt, .xls, .csv, .dbf, ArcInfo Interchange file (*.e00), shapefile | - Identifiant point, localisation (x,y), identifiant (tronçon) de rivière | |
| 3. Rejets | | | |
| 3.1 Rejets urbains | .txt, .xls, .csv, .dbf, ... | identifiant, localisation (x,y), connection STEP, équivalent-habitants | |
| 3.2 Rejets industriels | .txt, .xls, .csv, .dbf, ... | identifiant, localisation (x,y), connection STEP, charges (kg/jour), type industrie | |
| 3.3 Stations d'épuration | .txt, .xls, .csv, .dbf, ... | identifiant, localisation (x,y), capacité, type, date mise en fonctionnement | |
| 3.4 Abattements stations épuration | .txt, .xls, .csv, .dbf, ... | identifiant, rendements (ou flux entrée/sortie) | |
| 3.5 Cheptel | .txt, .xls, .csv, .dbf, ... | Cheptel par unité administrative (commune, ...) | |
| 4. Mesures de qualité | | | |
| 4.1 Localisation stations de mesure | .txt, .xls, .csv, .dbf, ArcInfo Interchange file (*.e00), shapefile | - Identifiant point, localisation (x,y), identifiant (tronçon) de rivière | |
| 4.2 Mesures de qualité | .txt, .xls, .csv, .dbf, ... | - identifiant point de mesure, date, mesures (DCO, NH4, ...) | |

Annexe 2 : Principes généraux de l'utilisation de PEGASE

L'utilisation du logiciel PEGASE se fait généralement en 3 grandes étapes :

1. Préparation des données d'entrée (le pré-processing des données)
2. Exécution d'une simulation PEGASE
3. Exploitation des résultats, entres autres graphiques

1. Pré-processing des données

1 - 1. Introduction

Avant de pouvoir être injectés dans PEGASE, les fichiers contenant les informations requises par le modèle doivent subir des traitements afin de se retrouver dans la forme et avec les informations requises par le logiciel.

Les programmes de pré-processing qui effectuent ce travail peuvent être divisés en deux grandes parties :

- 1) le prétraitement des informations de type géographique (réseau de rivière, modèle numérique de terrain, ...) qui doit aboutir à la construction de la base de données géographiques de PEGASE. Ce prétraitement doit être réalisé avant toute application à un sous-domaine.
- 2) le prétraitement des autres informations (données rejets, débits, mesures de qualité, ...) Le but principal de ce prétraitement est de mettre les données reçues dans le bon format informatique, et d'y rajouter des informations de type géographique.

1 - 2. Pré-processing des données géographiques

Le modèle PEGASE est basé sur une approche intégrée bassin versant-rivières. Le bassin versant est représenté par des mailles carrées, généralement de l'ordre de 1km x 1km ou de 500m x 500m.

Le réseau hydrographique est représenté par une sélection de rivières explicitement calculées. Toutes les rivières principales sont reprises dans cette sélection. Ces rivières explicitement calculées sont représentées par une série de segments et de points (la longueur des segments est variable, la distance entre 2 points de calcul est généralement d'environ 200 à 400m).

Le code de calcul établit ensuite une relation entre chaque cellule du bassin et un des points de calcul rivière, notamment par détermination d'un chemin de plus grande pente (utilisation du modèle numérique de terrain). Cette relation requiert le traitement d'un certain nombre de données spatiales (1-D et 2-D) telles

que le réseau hydrographique, les zones hydrographiques, le modèle numérique de terrain et l'occupation du sol.

Parmi les données nécessaires pour représenter le bassin versant et le réseau hydrographique, un grand nombre sont géoréférencées et disponibles dans des systèmes d'information géographiques (SIG).

Ces données ne sont pas intégrées directement dans PEGASE, mais subissent préalablement un traitement important. Celui-ci s'organise en quatre grandes étapes :

1. ARBRES

- Sélection du réseau des rivières explicitement représentées à partir de la couche des réseaux hydrographiques;
- Codification spécifique à PEGASE de tous les tronçons de cours d'eau ;
- Vérification et validation des données (entres autres, vérification de la topologie, intégration des canaux dans le réseau des rivières);
- Génération de l'arbre des rivières (et du système de routes utilisé pour la visualisation des résultats).

2. ALTRIV

- Superposition de la sélection des rivières avec le modèle numérique de terrain (MNT);
- Sélection des NŒUDS de la digitalisation PEGASE;
- Génération des profils altimétriques des rivières.

3. BASSIN

- Génération des mailles "sols" (de 500 m x 500 m en général) à partir de la couche des zones hydrographiques et du MNT;
- génération de la connectivité (par calcul de chemin de plus grande pente) entre les mailles "sols" et le point d'aboutissement de l'eau de ruissellement dans le réseau hydrographique explicitement représenté;
- calcul des distances aux rivières, de la différence d'altitude, etc.

4. LISTBV

- Génération du fichier d'entrée principal de PEGASE (nœuds rivière);
- génération des codes rivière, altitudes, distances à la source;
- calcul des bassins versants associés à chaque nœud;
- représentation de l'occupation des sols à partir de la couche d'occupation des sols;
- calcul des rejets animaliers qui aboutissent à chaque nœud.

Ce pré-processing est réalisé via une interaction entre des routines écrites dans un langage informatique et le SIG. Des éditions de couches géographiques sont réalisées à l'aide des outils SIG, ensuite ces couches alimentent les routines de pré-processing via des fichiers d'échange, enfin, le résultat des traitements des routines est réinjecté dans le SIG pour vérification, visualisation et production de cartes de résultats. Cette interaction permet la validation des données à deux niveaux de vérification, celui du SIG et celui des routines de programmation.

Ce pré-processing permet d'obtenir un réseau de rivière topologiquement correct, reprenant les rivières utiles pour la modélisation à entreprendre.

1 - 3. Pré-processing des données d'entrée du modèle

Le logiciel PEGASE utilise plusieurs fichiers qui contiennent les données d'entrée du modèle. Parmi ceux-ci, un certain nombre sont modifiables par l'utilisateur final.

Avant de pouvoir utiliser les données d'entrée dans PEGASE, il faut cependant :

- mettre ces données dans les « bons » formats PEGASE
- rajouter la connectivité, c'est-à-dire, pouvoir dire (en fonction du réseau de rivière explicitement modélisé) où et dans quelle rivière se retrouveront ces éléments

Les données concernées par ces prétraitements sont :

- les stations d'épuration
- les rejets urbains
- les rejets industriels
- les rejets thermiques
- les mesures des débits des rivières
- les mesures de qualité des rivières
- les mesures d'insolation
- les mesures de température des rivières
- les largeurs des rivières
- les « hauteurs » des rivières

Les informations que les fichiers créés contiennent sont :

- des informations topologiques : code identifiant le rejet, la station, les connexions entre les rejets urbains et industriels et les stations, ...
- des informations géographiques : coordonnées de la station, du point de rejet en rivière;
- des informations quantitatives : charges des rejets (en équivalent-habitants ou en kg/jour), capacité maximale des stations, taux de collecte,...
- des informations qualitatives : type de station, type d'industrie, type de rejet urbain,
- des informations "temporelles" : années de référence, année de mise en service des stations, année de fermeture, ...
- des informations complémentaires utiles (noms, bassin versant, ...).

En résumé, les programmes de pré-processing réalisent les opérations suivantes :

- la collecte des informations brutes dans les différents fichiers où elles se trouvent;
- la mise en forme des informations brutes dans le format informatique nécessaire;
- la transformation d'un certain nombre de données (par exemple, pour les rejets industriels, la transformation des charges en DCO (kg/j) en charges de carbone, réparties suivant les sous-compartiments (dégradable, ...);

- la transformation éventuelle de coordonnées qui se trouveraient dans un autre système de coordonnées que le système employé pour l'application ;
- la vérification de certaines valeurs;
- l'incorporation de la connectivité : sont ainsi rajoutées aux informations disponibles:
 - la rivière où le rejet aboutit
 - la maille rivière où le rejet aboutit
 - la distance à la source de cette maille
 - la différence d'altitude entre le point d'émission et le point de rejet en rivière
 - la distance entre le point d'émission et le point de rejet en rivière
- la création de couvertures Arc/Info reprenant les principales informations sur les rejets (y compris les liaisons rejets/stations d'épuration)¹⁷.

2. Exécution d'une simulation

Le logiciel PEGASE utilise un *fichier de simulation* construit par l'utilisateur comme le fichier de référence dont le suffixe apparaîtra lors de la génération des résultats ASCII ou binaires PEGASE.

Ce fichier (éditable) reprend :

- d'une part, la référence des fichiers utilisés pour la simulation
- d'autre part, l'année de référence rejets
- quelques valeurs logiques permettant de paramétrer la simulation

3. Exploitation des résultats

L'exploitation des résultats peut se faire de plusieurs manières :

3 - 1. Sorties graphiques

PEGASE est prévu pour générer quasi automatiquement un certain nombre de graphiques. Les programmes sont prévus pour une visualisation rapide des résultats avec une mise en page correcte, mais limitée.

L'utilisateur a toujours la possibilité d'exporter les résultats vers une autre station de travail ou un PC pour se générer des graphiques "faits main".

Deux logiciels permettent (si installés) de générer les sorties graphiques standard : DISSPLA et ARC/INFO. ARC/INFO peut être considéré comme le logiciel "standard" pour la génération de graphiques 2D (cartes) ; les sorties générées avec le logiciel DISSPLA servant essentiellement pour les graphiques 1D (profils longitudinaux et évolutions annuelles).

¹⁷ Ces couvertures permettent de générer des shapex files d'ArcView

PEGASE permet de créer facilement trois grands types de graphiques :

- des profils longitudinaux, rivière par rivière (tant pour le mode stationnaire que pour le mode non-stationnaire)
- des évolutions annuelles (en un point donné) (pour le mode non-stationnaire)
- des cartes globales, avec des codes de couleur, via Arc-Info. Ces programmes font appel à des fichiers de configuration qui sont modifiables par l'utilisateur.

3 - 2. Exportation de fichiers

L'autre manière d'exploiter les résultats est de les exporter vers une autre station de travail ou un PC pour se générer des graphiques "faits main", ou bien utiliser les valeurs numériques des résultats pour des post-traitements (calcul d'indices de qualité, ..). Cette exportation peut se faire via un protocole de transfert approprié (par exemple, un client ftp). Tous ces résultats sont stockés dans le répertoire "résultat" de l'utilisateur.

Les fichiers exportables sont ainsi par exemple:

- des fichiers au format dBase à transférer en binaire. Ces fichiers peuvent être récupérés sous ARC/INFO ou ARC/VIEW sur un autre ordinateur.
- des fichiers ASCII créés (éventuellement) à chaque simulation. Ils sont à transférer en mode ASCII
- des fichiers compatibles *Excel* (en fait, des fichiers CSV, avec un dièse '#' comme séparateur de champ).

4. Futur de PEGASE

4 - 1. Version PC

La version 5 de PEGASE devrait sortir dans les trois ans à venir. Elle est résolument tournée vers l'utilisation de PEGASE sur des stations de travail individuelles de type PC sous Microsoft Windows®.

Les performances des machines actuelles permettent de se tourner vers les architectures de type stations de travail personnelles (PC puissant) pour réaliser des simulations PEGASE. Si le portage de PEGASE sous Microsoft Windows ne pose aucun problème technique, il faut tout de même se tourner vers la récente architecture 64 bit dénommée x64 ou AMD64, afin de pouvoir supporter des calculs de bassins demandant une grande quantité de mémoire.

L'architecture de PEGASE proprement dit doit aussi s'adapter au mode de fonctionnement de Windows, soit du multifenêtre interactif, plutôt qu'un script de commandes DOS.

4 - 2. Interface utilisateur

Pour cette raison, l'Aquapôle a entrepris, avec les utilisateurs historiques de PEGASE, le montage d'un projet international permettant le développement d'une interface ergonomique, multifenêtre et interactive, afin

de rendre plus facile le prétraitement des données et l'exploitation des résultats. Cette interface devrait aboutir d'ici deux à trois ans.

Cette interface, basée sur une technologie informatique moderne permettra de travailler dans un environnement graphique convivial. Elle guidera l'utilisateur dans la définition de ses données. Elle permettra le travail en équipe. Elle permettra une vérification de la consistance des données avant de lancer une simulation.

4 - 3. Processus modélisés

L'avenir de PEGASE passe aussi par une amélioration des processus modélisés et la modélisation de nouveaux processus.

Des processus aussi variés que la désoxygénation dans les lacs de barrages, ou le transport des substances chimiques et médicamenteuses sont envisagés, à côté d'améliorations, par exemple, au processus de sédimentation et remise en suspension.

4 - 4. Partage des Informations

L'avenir de PEGASE passe aussi par une meilleure diffusion des informations concernant le modèle, mais aussi une interaction plus forte entre les utilisateurs de celui-ci. L'organisation de workshops internationaux réunissant les utilisateurs historiques, les utilisateurs actuels et les utilisateurs potentiels devient une réalité.

Le partage des informations entre équipes est envisagé sous la forme de services disponibles à travers l'internet ou le web, sous une forme encore à déterminer.