

Table des matières

Liste des Figures et des tableaux.....	0
Remerciement.....	0
Présentation de la structure d'accueil.....	1
1. Introduction.....	2
2. Dynamique de l'oxygène dissous en milieux fluvial.....	2
2.1 Les principaux facteurs de contrôle.....	2
2.1.1 Facteurs biologiques.....	3
2.1.2 Facteurs physiques.....	4
2.1.3 Facteurs chimiques.....	5
2.2 Modélisation de l'oxygène dissous par les modèles SWAT et QUAL2K.....	5
2.2.1 Le modèle SWAT :.....	5
2.2.2 Le modèle QUAL2K :.....	8
2.3 Problématique.....	11
3. Implémentation du modèle QUAL2K sur le bassin versant de l'Arroux.....	11
3.1 Paramétrisation du modèle QUAL2K.....	11
3.1.1 Le réseau hydrographique.....	12
3.1.2 Les conditions météorologiques.....	13
3.1.3 Les paramètres de qualités des eaux.....	13
3.1.4 Calibration du modèle.....	14
3.2 Le bassin versant de l'Arroux.....	15
3.2.1 Caractéristiques générales du bassin versant de l'Arroux.....	15
3.2.2 Paramétrisation du modèle Q2K pour le bassin versant de l'Arroux.....	18
4. Résultats et discussion.....	23
4.1 Calibration du modèle.....	23
4.2 Dynamique de l'oxygène dissous dans l'Arroux.....	24
4.3 Sensibilité à la température.....	27
4.4 Scénarios futures.....	28
4.4 Discussion.....	29
5. Conclusion.....	30
Liste Bibliographique:.....	30

Liste des Figures et des tableaux.

Figure 1: Cycle de la concentration en oxygène dissous (mg/L) de la concentration en oxygène dissous à saturation (%) et de la température (°C) pour 3 rivières en fonction de la journée, d'après Villeneuve et al. 2006.....	3
Figure 2: Mode de représentation du réseau hydrographique par le modèle Q2K a) rivière avec affluents b) représentation de la segmentation par Q2K d'après Chapra et al, 2008 QUAL2K documentation and user's manual.....	12
Figure 3: Localisation du bassin versant de l'Arroux à Dracy-Saint-Loup par rapport au territoire Français, d'après Legras, 2014.....	15
Figure 4: Carte géologique simplifiée du bassin versant de l'Arroux.....	16
Figure 5: Modèle numérique de terrain du bassin versant de l'Arroux.....	17
Figure 6: Réseau hydrographique de l'Arroux modélisé par le modèle SWAT.....	19
Figure 7: Représentation du réseau hydrographique du bassin versant de l'Arroux pour le modèle Q2K. ...	20
Figure 8: Modélisation de la dynamique journalière de l'oxygène dissous (courbe noire) et de l'oxygène à saturation (courbe pointillée bleue) pour la journée du 20 juillet 2004. Les observations correspondent aux carrées noirs.....	24
Figure 9: Modélisation de la dynamique journalière de l'oxygène dissous (courbe noire) et de l'oxygène à saturation (courbe pointillée bleue) pour la journée du 05 janvier 2004. Les observations correspondent aux carrées noirs.....	25
Figure 10: Graphique journalier de la concentration en oxygène dissous relatif à la saturation.....	25
Figure 11: Graphique de la concentration en oxygène dissous en fonction de la concentration en oxygène dissous à saturation dans l'Arroux à la station d'Autun pour les saisons estivale (orange) et hivernale (bleu).	26
Figure 12: Graphique des variations de la concentration en oxygène dissous journalière avec une variation de température de plus ou moins 5°C.....	27
Figure 13: Graphique des variations du taux de saturation journalier avec une variation de température de plus ou moins 5°C.....	27
Figure 14: Graphique de la dynamique journalière simulée en O2 dissous pour les journées du 20 juillet 2004 et 2070.....	28
Figure 15: Graphique de la dynamique journalière simulée du taux de saturation pour les journées du 20 juillet 2004 et 2070.....	28
Tableau 1: Exemple de modélisation d'une rivière à un affluent dans le modèle Q2K	13
Tableau 2: Liste des paramètres de qualité des eaux à fournir pour chaque "Headwater" dans la feuille "Headwater" du modèle Q2K.....	14
Tableau 3: Feuille "Diel Data" du modèle Q2K correspondant aux observations utilisées pour la paramétrisation du modèle.....	14
Tableau 4: Caractéristiques de chaque segment du réseau hydrographique de l'Arroux en entrée du modèle Q2K dans la feuille "Reach"	18
Tableau 5: Valeurs des paramètres météorologiques horaires utilisés dans Q2K pour la journée du 20 juillet 2007.....	21
Tableau 6: Paramètres de qualité des eaux enregistrés à la station d'Autun.....	22
Tableau 7: Concentration en oxygène dissous (Do), température de l'eau (Teau) et oxygène dissous à saturation (Do sat) utilisées pour la calibration du modèle Q2K	23

Remerciement.

Je tiens à remercier Monsieur Philippe AMIOTTE-SUCHET enseignant chercheur à l'université de Bourgogne pour avoir bien voulu accepté d'être mon maître de stage ainsi que pour son aide et son temps précieux.

Je remercie Madame Marjorie UBERTOSI enseignant chercheur à AgroSup Dijon d'avoir accepté d'être mon tuteur de stage.

Je remercie Monsieur Etienne BRULEBOIS doctorant à l'université de Bourgogne pour son aide et ses conseils avisés sur le modèle SWAT.

Je remercie également Monsieur Yves Richards chercheur au centre de recherche en climatologie de l'université de Bourgogne pour m'avoir permis d'accéder à la base de données horaire de météo France.

Ce stage de fin de première année de master sciences de l'environnement m'a en outre permis de développer mes connaissances et d'acquérir une méthodologie sur la modélisation en générale et plus particulièrement sur les modèles SWAT et QUAL2K. Mais aussi d'avoir une vision plus large sur le monde de la recherche scientifique.

Présentation de la structure d'accueil.

Université de Bourgogne : Le Laboratoire Biogéoscience.

C'est à l'université de Bourgogne, bâtiment Gabriel (6 bd Gabriel à Dijon), au sein du laboratoire biogéoscience, que c'est déroulé ce stage (Implémentation du modèle de qualité des eaux QUAL2K sur le bassin versant de l'Arroux.) d'une durée de 7 semaines (du 04 mai 2015 au 19 juin 2015).

Le laboratoire est créé en 1971, il est dirigé par Monsieur Pierre Rat, et possède à l'origine le code d'unité LA 157. Il va, par l'intermédiaire de nombre modification et restructuration, devenir en 2003 le laboratoire Biogéoscience, dirigé par Monsieur Pascal Neige depuis 2007, et composé de 4 équipes de recherche depuis 2012. Ces 4 équipes sont écologie évolutive (éco évo), systèmes, environnements et dynamiques sédimentaires (SEDS), centre de recherches de climatologie (CRC) et biodiversité, macroécologie et évolution (BioMe).

Au premier janvier 2012, le laboratoire Biogéoscience est constitué d'environ 110 personnes dont, 11 chercheurs CNRS, 33 enseignants chercheurs uB, 3 enseignants chercheurs EPHE, 1 enseignants chercheurs AgroSup, 8 ITA CNRS, 11 (5,3 équivalent temps plein) IATOS uB, 29 doctorants, 6 personnels de recherche en CDD (ATER et post-doctorants) et 6 personnels techniques en CDD.

Encadré par Monsieur Philippe Amiotte-Suchet, enseignant chercheur dans le domaine de l'hydro-géochimie à l'université de Bourgogne et membre de l'équipe SEDS, ce stage s'inscrit dans le cadre d'une thèse réalisée par Monsieur Etienne Brulebois. Thèse traitant sur la modélisation de la ressource en eau dans 3 bassins versants Bourguignons à l'horizon 2100 par l'intermédiaire du modèle SWAT.

1. Introduction.

La qualité des eaux de surfaces est primordiale pour notre société. En effet un français consomme en moyenne 274 litres d'eau par jour (Insee). Cette eau, souvent issue des systèmes aquifères et des eaux d'écoulement de surface, est ensuite rejetée dans le système naturel après traitement en station d'épuration ou non. Notre société actuelle est donc entièrement dépendante de la ressource en eau et par conséquent de la qualité des eaux de rivière.

Longtemps sous-estimé, le changement climatique est aujourd'hui accepté de tous comme risquant d'entraîner une dégradation et une limitation de cette ressource en eau à l'échelle du territoire et plus particulièrement en ce qui concerne le cadre de notre étude, sur le territoire bourguignon. Il est alors indispensable pour les décideurs politiques de quantifier l'impact du changement climatique sur notre société et donc sur la ressource en eau.

L'objectif de ce mémoire est l'étude d'un facteur témoin de la qualité des eaux, l'oxygène dissous. Dépendant d'un grand nombre de facteurs, l'oxygène dissous constitue un excellent témoin de contrôle de qualité des eaux. En effet un problème d'oxygène dissous au sein d'une rivière conduit généralement à des problèmes d'eutrophisation et donc de dégradation du milieu. Nous nous devons donc de nous poser un certain nombre de questions. Comment la dynamique de l'oxygène évolue-t-elle dans les cours d'eau et plus particulièrement dans l'Arroux ? Est-il possible de modéliser l'évolution de l'oxygène dissous dans l'Arroux en réponse au changement climatique attendu dans un futur proche ?

Le suivi horaire de l'oxygène dissous s'avère difficile à mettre en œuvre, aussi bien du point de vue logistique que financier. La modélisation peut alors s'avérer tout à fait pertinente quant à l'étude de la dynamique horaire de l'oxygène dissous d'un cours d'eau. C'est pourquoi le présent mémoire traitera d'abord de la dynamique de l'oxygène dissous dans les rivières, puis de la manière dont cet oxygène dissous est intégré dans les modèles SWAT et QUAL2K. Nous aborderons ensuite le paramétrage du modèle QUAL2K et l'implémentation du modèle sur le bassin versant de l'Arroux dans le but d'étudier la dynamique en oxygène dissous dans l'Arroux et d'envisager un scénario futur en réponse au changement climatique moderne.

2. Dynamique de l'oxygène dissous en milieux fluvial.

2.1 Les principaux facteurs de contrôle.

La concentration en oxygène dissous dans les cours d'eau montre deux cycles, un cycle journalier (Figure 1) et un cycle saisonnier. Sur 24 heures, l'oxygène dissous (O_2) est minimum pendant la nuit et maximum pendant le jour. Sur une année, O_2 est généralement plus bas en été qu'en hiver (où il est généralement proche de la saturation). Ces cycles sont contrôlés par différents paramètres tels que la température de l'eau qui

contrôle le taux de dissolution et les processus bio-physico-chimique contrôlant la production et la consommation d'O₂ dans le cours d'eau.

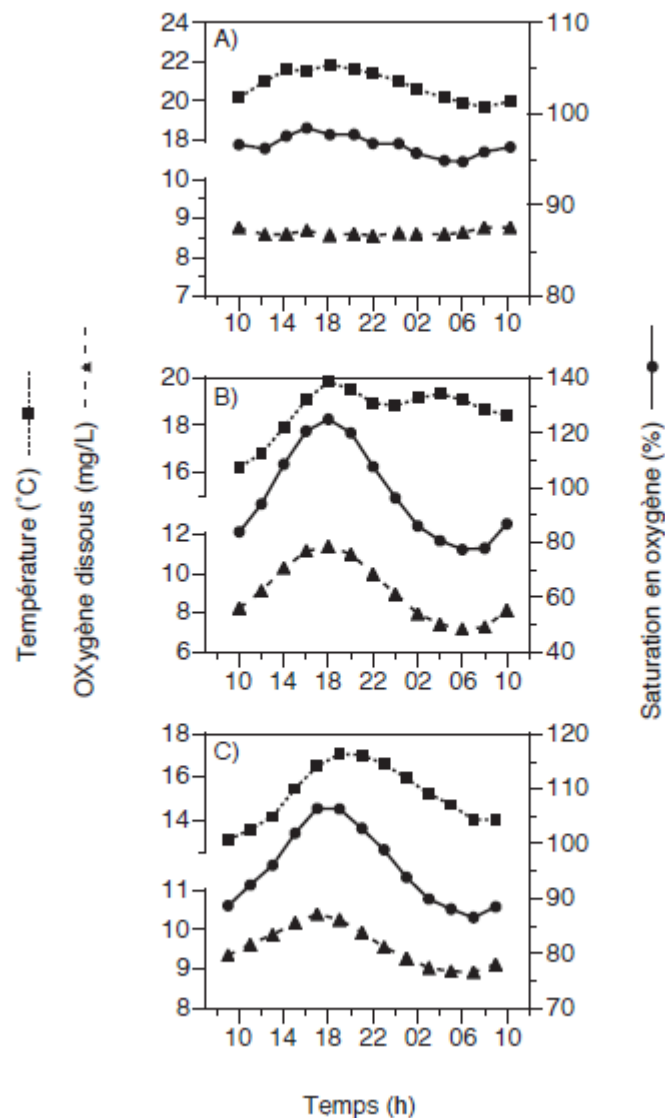


Figure 1: Cycle de la concentration en oxygène dissous (mg/L) de la concentration en oxygène dissous à saturation (%) et de la température (°C) pour 3 rivières en fonction de la journée, d'après Villeneuve et al. 2006.

2.1.1 Facteurs biologiques

Les facteurs biologiques sont les principaux responsables de la variation journalière du cycle de l'oxygène dissous. Ils influencent également le cycle annuel puisque sensible à la température, l'activité biologique est quasi inexistante dans les régions tempérées en hiver.

2.1.1.1 L'activité autotrophe :

La fluctuation journalière de la concentration en oxygène au sein d'un cours d'eau repose en partie sur l'alternance entre processus de photosynthèse et de respiration de la

biomasse du cours d'eau. En effet, au cours de la journée, l'énergie solaire active le processus de photosynthèse qui permet alors de réoxygéner le milieu. Inversement durant la nuit c'est le processus de respiration qui domine et qui favorise alors la consommation de l'oxygène dissous (*Villeneuve et al, 2006*).

2.1.1.2 L'activité hétérotrophe :

L'activité hétérotrophe peut avoir un rôle important sur la variation de l'oxygène dissous à court terme. Villeneuve et al. (2006) énoncent qu'un apport de bactérie allochtone serait responsable de la consommation totale de l'oxygène dissous dans la Seine lors d'un débordement d'égout, mais également qu'un apport de matière organique particulaire d'origine terrestre peut avoir une influence sur le taux de respiration (autotrophe ou hétérotrophe) et donc sur le cycle de l'oxygène dissous.

La nitrification et la dénitrification, processus d'oxydation biologique des ions NH_4^+ en ions NO_2^- et d'oxydation des ions NO_2^- en ions NO_3^- , peuvent également entraîner une forte déplétion en oxygène dissous et notamment dans le cas de rivière soumise au rejet d'eaux usées riche en ammonium et en nitrite.

2.1.2 Facteurs physiques.

2.1.2.1 La température.

La solubilité de l'oxygène dans l'eau diminue directement avec l'augmentation de la température, entraînant une diminution de la concentration en oxygène dissous à saturation. Cette relation température/oxygène dissous est plus ou moins perturbée par l'influence de la température sur l'activité biologique. En effet, la photosynthèse et la respiration, en relation avec la biomasse algale sont également fortement liées à la température (*Butcher et Covington, 1995*). La température semble donc un facteur prédominant contrôlant la concentration en oxygène dissous dans les rivières aussi bien du point de vue du cycle diurne que du cycle annuel.

2.1.2.2 La réaération.

La réaération correspond aux processus de mélange entre phase gazeuse et phase liquide. Elle permet l'apport en oxygène via l'interface air-eau. Elle est fonction de la vitesse et du type d'écoulement (laminaire ou turbulent), éventuellement du vent. Ainsi la réaération peut être suffisamment importante pour limiter la perte nocturne en oxygène dissous par respiration algale (*Villeneuve et al, 2006*).

2.1.2.3 La lumière.

Comme précisé précédemment, la lumière influence fortement le cycle diurne de l'oxygène dissous puisqu'elle est le principal moteur de l'activité autotrophe et conditionne les variations de température de l'eau.

2.1.3 Facteurs chimiques

L'apport en éléments nutritifs influence le cycle diurne de l'oxygène en favorisant la photosynthèse. La demande chimique en oxygène d'un cours est également un facteur capable d'influencer le cycle journalier de l'oxygène. Villeneuve et al. (2006) précisent que la photolyse des composés organiques dissous entraîne une consommation en oxygène et donc une perte potentielle de l'oxygène dissous dans le cours d'eau.

Il est donc important, afin de quantifier de manière optimale les variations en oxygène dissous dans un cours d'eau, et notamment pour le cycle diurne de l'oxygène, de pouvoir avoir un suivi horaire. Or ces dispositifs sont difficiles à mettre en œuvre aussi bien du point de vue matériel, logistique et économique. La modélisation des processus contrôlant l'oxygène dissous dans les cours d'eau, pourrait alors donner accès à ce type d'informations à l'échelle horaire et permettre également d'envisager différents scénarios futurs possibles.

2.2 Modélisation de l'oxygène dissous par les modèles SWAT et QUAL2K

2.2.1 Le modèle SWAT :

Le modèle SWAT ou Soil Water Assessment Tool est un modèle agro-hydrologique développé par l'USDA (U.S Department of Agriculture). En effet il permet de simuler les flux d'eau mais aussi la qualité des eaux de surfaces, le tout à l'échelle des bassins versants allant de quelques kilomètres carrés à plusieurs milliers de kilomètres carrés et avec une variété de sols, d'occupation de sol et de management différents.

SWAT est un modèle au pas de temps journalier, semi-distribué et semi-physique pouvant couvrir de longues périodes de temps. Il peut être mobilisé de manière tout à fait appropriée dans le contexte d'un impact du changement climatique sur le cycle hydrologique et la qualité des eaux dans les bassins versants.

L'unité de base du modèle SWAT est l'« Hydrological Response Unit » (HRU) ou unité de réponse hydrologique. En tous points d'une HRU, une molécule réagit de la même manière et est soumise aux mêmes contraintes. Les HRU sont déterminées en superposant les types de sols, les classes de pente (issue du modèle numérique de terrain (MNT)) et les différentes classes d'occupation du sol (Legras, 2014). Chaque HRU correspond alors à une combinaison unique sol-pente-occupation de sol.

Le modèle SWAT simule les flux d'eau et de matière dans les hydrosystèmes. Au-delà, le modèle est en mesure de calculer différents paramètres de qualité des eaux telles que l'oxygène dissous dans le cours d'eau. Pour cela il prend en compte un certain nombre de processus détaillés ci-dessous.

2.2.1.1 L'oxygène à saturation.

SWAT considère l'oxygène à saturation comme fonction uniquement de la température de l'eau calculée par le modèle. L'oxygène à saturation est déterminé suivant l'équation (Neitsch et al, 2009) :

$$Ox_{sat} = \exp \left(-139,34410 + \frac{1.575701 \cdot 10^5}{T_{wat,K}} - \frac{6.642308 \cdot 10^7}{(T_{wat,K})^2} + \frac{1.243800 \cdot 10^{10}}{(T_{wat,K})^3} - \frac{8.621949 \cdot 10^{11}}{(T_{wat,K})^4} \right) \quad (Eq 1)$$

Où Ox_{sat} est la concentration en oxygène à saturation à l'équilibre avec l'atmosphère à 1atm et $T_{wat,K}$ la température de l'eau en Kelvin.

2.2.1.2 La biomasse Algale.

Durant la journée, les algues augmentent la concentration en oxygène dissous par photosynthèse alors que durant la nuit, cette dernière diminue par respiration. Lors de leur croissance et de leur mort, les algues font parties intégrante du cycle des nutriments (Phosphore et Azote). Le modèle considère la concentration en phytoplancton directement proportionnel à la concentration en chlorophylle a selon l'équation suivante :

$$Chla = \alpha_0 \cdot algae \quad (Eq 2)$$

Où $chla$ est la concentration en chlorophylle a (μg $chla/L$), α_0 est le ratio de chlorophylle a sur la biomasse algale (μg $chla/mg$ alg) et $algae$ est la concentration en biomasse algale (mg alg/L).

2.2.1.3 La CBOD.

La CBOD (carbonaceous Biological Oxygen Demand) définit la quantité d'oxygène nécessaire à l'oxydation de la matière organique dans l'eau. La CBOD est directement ajoutée dans le cours d'eau par ruissellement de surface ou par rejet ponctuel. La variation de CBOD sur une journée est calculée de la manière suivante :

$$\Delta cbod = -(K_1 \cdot cbod + K_3 \cdot cbod) \cdot TT \quad (Eq 3)$$

Où $\Delta cbod$ est la variation de la concentration en CBOD (mg $CBOD/L$), K_1 est le taux de désoxygénation par la CBOD ($jour^{-1}$), $cbod$ est la concentration en CBOD dans le cours d'eau (mg $CBOD/L$), K_3 est le taux de perte en CBOD par sédimentation ($jour^{-1}$) et TT est le temps de transport dans le segment ($jour$).

2.2.1.4 Nitrification et Dénitrification.

La nitrification est définie par l'oxydation biologique des ions ammonium NH_4^+ en ions nitrite NO_2^- , elle intervient donc directement dans la consommation en oxygène dissous du cours d'eau.

La dénitrification est quant à elle définie par l'oxydation biologique des ions nitrite NO_2^- en ions nitrates NO_3^- . De même que la nitrification, la dénitrification est un processus intervenant en tant que consommateur d'oxygène dissous dans le cours d'eau.

2.2.1.5 La réaération.

La réaération se produit par diffusion de l'oxygène de l'atmosphère dans le cours d'eau et par le mélange d'eau et d'air qui se produit pendant l'écoulement turbulent.

2.2.1.5.1 La réaération par diffusion de Fickian.

La réaération par diffusion de Fickian constitue la diffusion de l'oxygène atmosphérique dans le cours d'eau par simple contact, elle est normé à la température extérieur de 20°C et ne dépend donc que de la température de l'eau. La réaération est déterminée par l'équation :

$$K_2 = K_{2,20} \cdot 1.024^{(T_{wat}-20)} \quad (\text{Eq 4})$$

Où K_2 est le taux de réaération (jour^{-1}), $K_{2,20}$ est le taux de réaération à 20°C (jour^{-1}) et T_{wat} la température moyenne de l'eau du jour considéré (°C).

2.2.1.5.2 La réaération par écoulement turbulent.

La réaération par écoulement turbulent se produit quant à elle lors de chute d'eau liée à un barrage, un seuil ou une cascade. Elle est déterminée suivant l'équation :

$$\Delta O_{x_{str}} = -D_a - D_b = D_a (1 - 1/rea) \quad (\text{Eq 5})$$

Où $\Delta O_{x_{str}}$ est la différence de concentration en oxygène dissous (mgO_2/L), D_a est le déficit en oxygène au-dessus de la structure et D_b est le déficit en oxygène dissous en dessous de la structure.

2.2.1.6 La demande sédimentaire en oxygène.

La demande sédimentaire en oxygène est définie par la quantité d'oxygène piégée par l'oxydation des sédiments, elle est déterminée à travers l'équation suivante :

$$K_4 = K_{4,20} \cdot 1.060^{(T_{wat}-20)} \quad (\text{Eq 6})$$

Où K_4 est le taux de demande sédimentaire en oxygène ($\text{mgO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{jour})$), $K_{4,20}$ est le taux de demande sédimentaire en oxygène à 20°C ($\text{mgO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{jour})$), et T_{wat} la température moyenne de l'eau du jour considéré (°C).

2.2.1.7 Bilan de l'oxygène dissous dans le cours d'eau.

Le modèle SWAT calcule l'oxygène dissous en fonction des facteurs cités plus haut. La variation d'oxygène dissous dans le cours d'eau est calculée selon l'équation suivante :

$$\Delta O_{x_{str}} = [K_2 \cdot (O_{x_{sat}} - O_{x_{str}}) + (\alpha_3 \cdot \mu_a - \alpha_4 \cdot \rho_a) \cdot \text{algae} - K_1 \cdot \text{cbod} - \frac{k_4}{1000 \cdot \text{depth}} - \alpha_5 \cdot \beta_{N,1} \cdot \text{NH}_{4\text{str}} - \alpha_6 \cdot \beta_{N,2} \cdot \text{NO}_{2\text{str}}] \cdot \text{TT} \quad (\text{Eq 7})$$

Où $\Delta O_{x_{str}}$ = variation d'oxygène dissous (mgO_2/L)

K_2 = taux de réaération (jour^{-1})

Ox_{sat} = concentration à saturation en oxygène dissous (mgO_2/L)
 Ox_{str} = concentration en oxygène dissous dans le cours d'eau (mgO_2/L)
 α_3 = taux de production d'oxygène par unité de photosynthèse algale ($mgO_2/mg\ alg$)
 μ_a = taux de croissance algale spécifique ($jour^{-1}$)
 α_4 = taux d'oxygène consommé par la respiration algale ($mgO_2 / mg\ alg$)
 ρ_a = taux de mortalité algale ($jour^{-1}$)
 $algae$ = concentration en biomasse algale au commencement de la journée ($mg\ alg/L$)
 K_1 = taux de désoxygénation par la CBOD ($jour^{-1}$)
 C_{bod} = concentration de la demande biologique en oxygène pour oxyder le carbone allochtone ($mg\ CBOD / L$)
 K_4 = taux de demande en oxygène par les sédiments ($mgO_2 / (m^2 \cdot jour)$)
 $depth$ = profondeur du cours d'eau (m)
 α_5 = taux d'oxygène consommé par l'oxydation de NH_4^+ (mgO_2/mgN)
 $\beta_{N,1}$ = constante de vitesse pour l'oxydation biologique de l'azote ammoniacal ($jour^{-1}$)
 NH_{4str} = concentration en ammonium au début de la journée ($mg\ N / L$)
 α_6 = taux d'oxygène consommé par l'oxydation de NO_2^- (mgO_2/mgN)
 $\beta_{N,2}$ = constante de vitesse pour l'oxydation biologique des nitrites en nitrates ($jour^{-1}$)
 NO_{2str} = concentration en nitrite au début de la journée ($mg\ N/L$)
 TT = temps de transport dans le segment (jour).

Il revient à l'utilisateur de fixer le taux de réaération K_2 , les taux d'oxygénation et de désoxygénation liés à la photosynthèse et à la respiration algale α_3 et α_4 , le taux de désoxygénation lié à la CBOD K_1 , les taux de désoxygénation liés à la nitrification et à la dénitrification α_5 et α_6 et la demande sédimentaire en oxygène K_4 .

2.2.2 Le modèle QUAL2K :

QUAL2K (Q2K) est un modèle de simulation de la qualité des eaux des rivières et plans d'eau développé par l'U.S environmental Protection Agency et fonctionnant au pas de temps horaire et journalier. Contrairement à SWAT, il n'est pas spatialement distribué. Il fonctionne avec l'interface Microsoft Excel, toutes les données d'entrée sont introduites dans des feuilles Excel et les données de sortie se récupèrent également sous la forme de tableaux et de graphiques Excel.

Concernant l'oxygène dissous, le modèle QUAL2K considère la photosynthèse de la biomasse algale (phytoplancton et algues benthiques) comme source d'oxygène dissous. En revanche la CBOD, la nitrification et la respiration algale sont considérés comme consommateurs d'oxygène dissous. Suivant les conditions climatiques, l'eau est sous-saturée ou sursaturée en oxygène dissous, l'équilibre est assuré par la réaération. La façon dont interviennent ces différents paramètres dans le modèle est listée ci-dessous (Chapra et al, 2008).

2.2.2.1 La photosynthèse :

La photosynthèse algale est décomposée en deux compartiments, la photosynthèse qui a pour origine le phytoplancton et la photosynthèse issue des algues benthiques.

La photosynthèse ayant pour origine le phytoplancton est calculée de la façon suivante :

$$\text{Phytophoto} = \mu_p \cdot a_p \quad (\text{Eq 8})$$

Où phytophoto est l'apport d'oxygène lié à la photosynthèse issue du phytoplancton, μ_p est le taux de photosynthèse du phytoplancton (jour^{-1}), et a_p est la concentration en phytoplancton (mg alg/L).

La photosynthèse ayant pour origine les algues benthiques peut être représentée de deux façons, la première étant une correction à la température d'ordre 0 atténuée par une limitation des nutriments et de la lumière :

$$\text{BotAlgPhoto} = C_{gb}(T) \Phi_{Nb} \Phi_{Lb} \quad (\text{Eq 9})$$

Où BotAlgPhoto est la quantité d'oxygène produit par photosynthèse des algues benthiques, $C_{gb}(T)$ est le taux de photosynthèse maximale dépendant de la température à l'ordre zéro ($\text{mgA}/(\text{m}^2 \text{ jour})$), Φ_{Nb} est le facteur de limitation par les nutriments (nombre sans dimension compris entre 0 et 1) et Φ_{Lb} est le facteur de limitation par la lumière (nombre sans dimension compris entre 0 et 1).

La deuxième méthode étant un modèle d'ordre 1 :

$$\text{BotAlgPhoto} = C_{gb}(T) \Phi_{Nb} \Phi_{Lb} \Phi_{Sb} a_b \quad (\text{Eq 10})$$

Où $C_{gb}(T)$ est le taux de photosynthèse maximale dépendant de la température à l'ordre un (jour^{-1}), Φ_{Sb} est le facteur de limitation par l'espace (nombre sans dimension compris entre 0 et 1) et a_b est la concentration d'algue de fond (mg alg/L).

2.2.2.2 La respiration.

De même que pour la photosynthèse, la respiration algale se décompose en deux compartiments représentés par le phytoplancton et les algues benthiques.

La respiration ayant pour origine le phytoplancton est représentée par l'équation :

$$\text{PhytoResp} = F_{\text{oxp}} K_{rp}(T) a_p \quad (\text{Eq 11})$$

Où PhytoResp est la quantité d'Oxygène consommé par respiration du phytoplancton, F_{oxp} est l'atténuation due au manque d'oxygène (nombre sans dimension), $K_{rp}(T)$ est le taux de respiration du phytoplancton dépendant de la température (jour^{-1}) et a_p la concentration en phytoplancton (mg Alg/L).

La respiration par les algues benthiques est quant à elle déterminée par l'équation :

$$\text{RespBotAlg} = F_{\text{oxb}} K_{rb}(T) a_b \quad (\text{Eq 12})$$

Où RespBotAlg est la quantité d'oxygène consommé par respiration des algues benthique, F_{oxb} est l'atténuation due au manque d'oxygène (nombre sans dimension), $K_{rb}(T)$ est le taux de respiration des algues benthiques dépendant de la température (jour^{-1}) a_b la concentration en algues benthiques (mg Alg/L).

2.2.2.3 La CBOD.

Le modèle QUAL2K décompose la CBOD en deux compartiments ayant des cinétiques d'oxydation différentes, la CBOD rapide (fastCBOD) et la CBOD lente (slowCBOD).

Dans le modèle, la CBOD lente est alimentée par la dissolution de la matière organique et décroît par hydrolyse et oxydation, mais elle n'intervient pas de manière directe dans le calcul de l'oxygène dissous.

En revanche la CBOD rapide intervient dans le calcul de l'oxygène dissous. La CBOD rapide a pour origine la dissolution de matière organique et l'hydrolyse de la CBOD lente, elle diminue par oxydation et dénitrification. La CBOD rapide est déterminée par l'équation :

$$S_{cf} = F_f r_{od} \text{ DetrDiss} + \text{SlowCHydr} - \text{FastCOxyd} - r_{ondn} \text{ Denitr} \quad (\text{Eq 13})$$

Où S_{cf} est la concentration en CBOD rapide, $F_f r_{od}$ est le taux d'oxygène consommé par dissolution de la matière organique particulaire DetrDiss est le taux de matière organique particulaire dissoute, SlowCHydr est la concentration en CBOD lente soumise à l'hydrolyse, r_{ondn} est le taux d'oxygène consommé par dénitrification, Denitr est le taux de dénitrification et FastCOxid est la quantité de CBOD rapide soumise à l'oxydation.

2.2.2.4 La nitrification.

La nitrification consomme l'oxygène dissous par oxydation biologique de l'ammonium en nitrite, elle est représentée par l'équation :

$$\text{Nitri} = F_{oxna} k_n (T) n_a \quad (\text{Eq 14})$$

Où Nitri correspond à la nitrification, F_{oxna} est l'atténuation due au manque d'oxygène (nombre sans dimension), $k_n (T)$ est le taux de nitrification de l'ammonium dépendant de la température (jour^{-1}) et n_a la concentration en ammonium dans le cours d'eau ($\mu\text{g N} / \text{L}$).

Il est judicieux de mettre en évidence que le modèle QUAL2K ne tient pas directement compte de la dénitrification dans le calcul de l'oxygène dissous.

2.2.2.5 La réaération.

Le modèle QUAL2K considère la réaération comme assurant l'équilibre entre l'oxygène dissous du cours d'eau et l'atmosphère, elle est dépendante des conditions climatiques mais aussi des conditions de sursaturation ou de sous-saturation de la rivière. La réaération est calculée de la manière suivante :

$$\text{OxReaer} = k_a (T) (o_s (T, \text{elev}) - o) \quad (\text{Eq 15})$$

Où $k_a (T)$ est le coefficient de réaération en oxygène dépendant de la température (Jour^{-1}), $o_s (T, \text{elev})$ est la concentration à saturation en oxygène ($\text{mg O}_2/\text{L}$) à température T et élévation au-dessus du niveau de la mer, et o la concentration en oxygène dissous ($\text{mg O}_2/\text{L}$).

2.2.2.6 Bilan de l'oxygène dissous dans le cours d'eau.

Q2K reprend les différents paramètres cités plus haut dans le calcul de l'oxygène dissous selon l'équation suivante.

$$S_o = r_{oa} \text{ PhytoPhoto} + r_{oa} \frac{\text{BotAlgPhoto}}{H} - r_{oc} \text{ FastCOxid} - r_{on} \text{ NH4Nitr} - r_{oa} \text{ PhytoResp} - \frac{\text{BotAlgResp}}{H} + \text{OxReaer} \quad (\text{Eq 16})$$

Où S_o = concentration en oxygène dissous dans le cours d'eau (mgO₂/L).

$r_{oa} \text{ PhytoPhoto}$ = apport d'oxygène lié à la photosynthèse issue du phytoplancton

$r_{oa} \frac{\text{BotAlgPhoto}}{H}$ = quantité d'oxygène produit par photosynthèse des algues benthiques sur la hauteur du cours d'eau (m)

$r_{oc} \text{ FastCOxid}$ = quantité de CBOD rapide soumise à l'oxydation

$r_{on} \text{ NH4Nitr}$ = quantité d'ammonium soumise à oxydation.

$r_{oa} \text{ PhytoResp}$ = PhytoResp est la quantité d'Oxygène consommé par respiration du phytoplancton

$\frac{\text{BotAlgResp}}{H}$ = RespBotAlg est la quantité d'oxygène consommé par respiration des algues benthique sur la hauteur du cours d'eau (m)

OxReaer = la réaération en oxygène dissous dans le cours d'eau.

2.3 Problématique.

Nous cherchons à simuler la dynamique de l'oxygène dissous dans un bassin versant pilote bourguignon (le bassin versant de l'Arroux). Or, le modèle SWAT ne simule pas des valeurs en oxygène dissous à l'échelle horaire (bien que cette dernière soit prise en compte dans les calculs de l'oxygène dissous) puisque qu'il fonctionne au pas de temps journalier. L'objectif de ce mémoire sera donc de détailler une méthodologie dans la paramétrisation du modèle QUAL2K, qui fonctionne à l'échelle horaire, et d'ajuster ce modèle au bassin versant de l'Arroux dans le but de simuler la dynamique de l'oxygène dissous à l'échelle horaire dans le cours d'eau, de mettre en évidence la dynamique journalière et annuelle de l'O₂ et d'obtenir une première estimation du changement climatique sur la ressource en eau dans le bassin versant de l'Arroux.

3. Implémentation du modèle QUAL2K sur le bassin versant de l'Arroux.

3.1 Paramétrisation du modèle QUAL2K.

Q2K se paramètre sur une journée précise et pour une rivière donnée. Il nécessite des observations horaires de différents paramètres tels que la température ou encore certain paramètres de qualité des eaux. La paramétrisation du modèle s'effectue en respectant différentes étapes détaillées ci-dessous.

3.1.1 Le réseau hydrographique.

QUAL2K se concentre sur un chenal principal (mainstem), qu'il décompose en plusieurs segments (Reach) eux même composés de plusieurs éléments. Sur le chenal principal, viennent se greffer des affluents (tributary) découpés eux aussi de la même manière que le chenal principal. La Figure 2 illustre la façon dont le modèle Q2K représente le système hydrographique d'une rivière avec affluents.

La création du réseau hydrographique s'effectue sur la feuille « reach » du modèle Q2K. Pour chaque segment, il est demandé de renseigner :

- La distance par rapport l'exutoire du bassin versant en amont et en aval du segment.
- Le nombre d'éléments par segment.
- L'altitude en amont et en aval du segment.
- Les latitudes et longitudes de l'exutoire du segment (degrés minutes secondes).
- Un certain nombre de paramètres hydrauliques correspondants aux formules de Manning.

Le Tableau 1 montre l'exemple d'une rivière à six segments avec un affluent composé de deux segments.

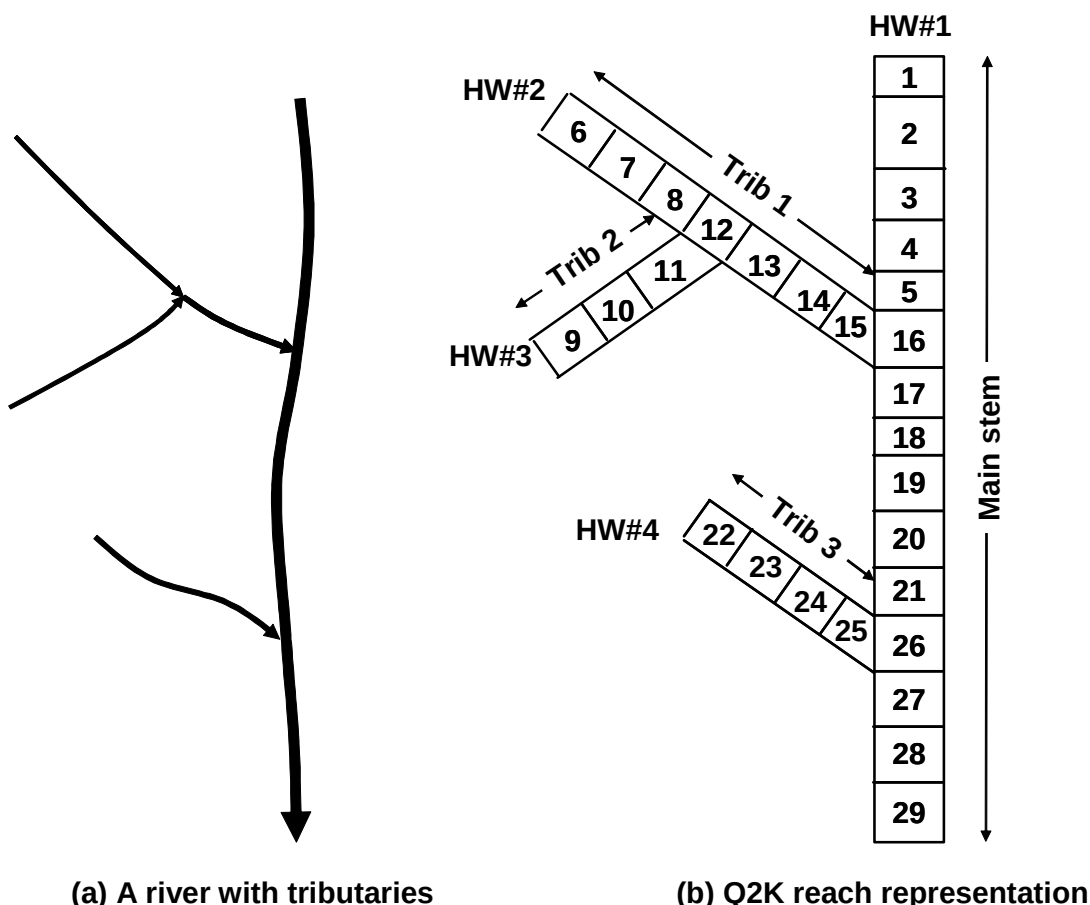


Figure 2: Mode de représentation du réseau hydrographique par le modèle Q2K (a) rivière avec affluents (b) représentation de la segmentation par Q2K d'après Chapra et al, 2008 QUAL2K documentation and user's manual.

Tableau 1: Exemple de modélisation d'une rivière à un affluent dans le modèle Q2K

					Location		Element	Elevation		Downstream						Hydro
Reach Number	Headwater Reach	Reach length (km)	Downstream		Upstream (km)	Downstream (km)	Number >=1	Upstream (m)	Downstream (m)	Latitude			Longitude			
		(km)	Latitude	Longitude						Degrees	Minutes	Seconds	Degrees	Minutes	Seconds	
1	Yes	1.00	47.05	-4.18	20.000	19.000	1	313.000	312.000	47.00	3	6	4.00	10	40	
2		3.00	47.05	-4.14	19.000	16.000	1	312.000	311.000	47.00	3	1	4.00	8	35	
3		3.00	47.05	-4.13	16.000	13.000	1	311.000	310.000	47.00	2	52	4.00	7	50	
4	Yes	3.00	47.14	-4.14	5.000	2.000	1	314.000	312.000	47.00	8	12	4.00	8	12	
5		2.00	47.05	-4.13	2.000	0.000	1	312.000	310.000	47.00	2	52	4.00	7	50	
6		4.00	47.06	-4.10	13.000	9.000	1	310.000	309.000	47.00	3	32	4.00	6	6	
7		5.00	47.08	-4.06	9.000	4.000	1	309.000	307.000	47.00	4	54	4.00	3	34	
8		4.00	47.05	-4.02	4.000	0.000	1	307.000	305.000	47.00	3	12	4.00	1	12	

Le modèle offre également la possibilité d'ajouter des sources diffuses ou des rejets ponctuels au réseau hydrographique par l'intermédiaire des feuilles « Diffuse Sources » et « Point Sources ». Il suffit alors le cas échéant d'indiquer le segment dans lequel se situe la source, la position de la source par rapport à l'exutoire du segment ainsi qu'une liste des paramètres physico-chimique de qualité des eaux (liste détaillée dans la section 3.1.3).

3.1.2 Les conditions météorologiques.

Le modèle Q2K nécessite un certain nombre de paramètres météorologiques à renseigner pour chaque heures de la journée considérée et pour chaque segment du cours d'eau.

Les différents paramètres météorologiques à entrés dans QUAL2K sont la température de l'air (feuille Air Temperature en °C), la température du point de rosé (feuille Dew Point Temperature en °C), la force du vent (feuille Wind Speed en m/s), la couverture nuageuse (feuille Cloud Cover en %) et l'ombrage (feuille Shade en %).

3.1.3 Les paramètres de qualités des eaux.

Les paramètres de qualité des eaux à entrés au modèle QUAL2K sont également à renseigner à l'échelle horaire et pour le premier segment (headWater) du cours d'eau principal et de chaque affluents.

Ces paramètres, listés dans le Tableau 2, sont à entrer dans la feuille « Headwater » du modèle Q2K. En plus de ces paramètres, il est nécessaire d'ajouter le débit et l'altitude en entrée de chaque « Headwater ».

Tableau 2: Liste des paramètres de qualité des eaux à fournir pour chaque "Headwater" dans la feuille "Headwater" du modèle Q2K.

paramètres de qualité des eaux	unités
Température	°C
Conductivité	µmhos
Les solides inorganique (MES)	mgD/L
Oxygène dissous	mgO2/L
CBOD rapide	mgO2/L
CBOD lente	mgO2/L
Azote Organique	µgN/L
Azote NH4	µgN/L
Azote NO3	µgN/L
Phosphore Organique	µgP/L
Phosphore Inorganique	µgP/L
Phytoplancton	µgA/L
Azote interne au phytoplancton	µgN/L
Phosphore interne au phytoplancton	µgP/L
Matière organique particulaire	mgD/L
Pathogène	cfu/100mL
Alcalinité	mgCaCO3/L
pH	-

Le modèle QUAL2K offre également la possibilité de fixer une limite en termes de qualité des eaux à l'exutoire en reprenant les mêmes paramètres dans la feuille « Downstream ».

3.1.4 Calibration du modèle.

Q2K est normalement calibré sur une journée, puis validé les semaines suivant ou précédant la calibration (*Tetra Tech, ins. final report, 2009*).

Ces valeurs, correspondant à des observations, sont reportées dans la feuille « Diel Data » du modèle, comme l'illustre le Tableau 3. Il est alors possible d'ajuster la simulation du modèle aux valeurs observées.

Tableau 3: Feuille "Diel Data" du modèle Q2K correspondant aux observations utilisées pour la paramétrisation du modèle.

	Temp Water	Temp Sediments	cond (umhos)	ISS (mg/L)	DO(mg/L)
t (hr)	(C) data	(C) data	data	data	data
16.00					10.20
17.00					8.20
20.00					8.10
8.00					7.50
19.00					9.60
13.00					9.90
12.00					8.90
15.00					12.40
10.00					9.80
9.00					9.20
11.00					11.10
14.00					8.70
18.00					8.39

3.2 Le bassin versant de l'Arroux

3.2.1 Caractéristiques générales du bassin versant de l'Arroux.

Le bassin versant de l'Arroux à Dracy-Saint-Loup se situe sur deux départements bourguignons, la Saône-et-Loire et la Côte-d'Or (Figure 3). Il mesure 756km². L'exutoire est situé à Dracy-Saint-Loup où se trouve la station de mesure des débits, mais la station de mesure des différents paramètres de qualité des eaux se situe à Autun.

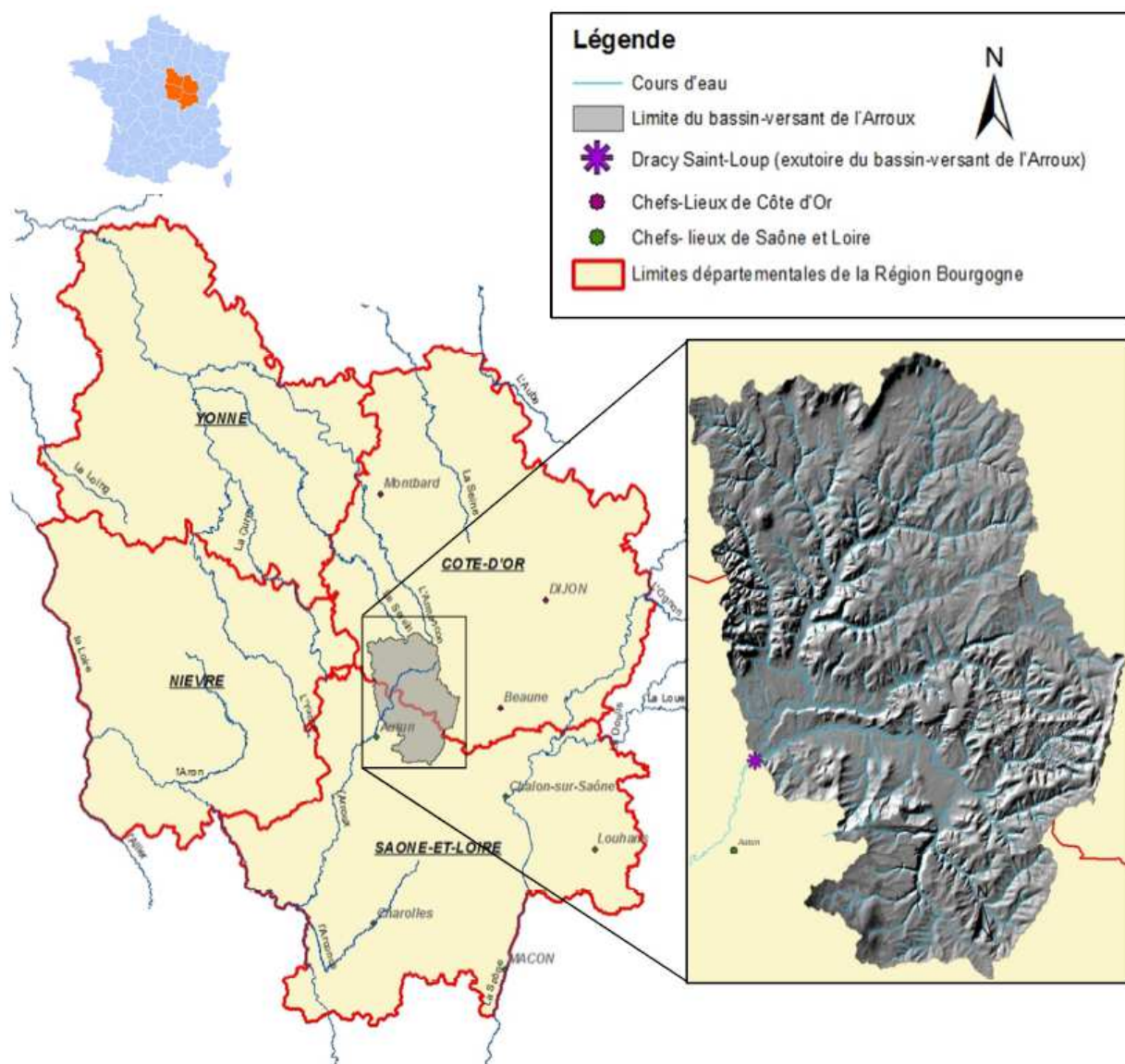


Figure 3: Localisation du bassin versant de l'Arroux à Dracy-Saint-Loup par rapport au territoire Français, d'après Legras, 2014.

3.2.1.1 Géologie.

Le bassin versant de l'Arroux est localisé dans le massif du Morvan, racine crustal de l'ancienne chaîne de montagne Hercynienne. Il repose donc principalement sur les formations granitiques et métamorphiques constitutifs du socle. Nous retrouvons également des formations gréseuses du Trias et du Permien reposant sur le socle, et les premières séries sédimentaires du Jurassique inférieure et moyen. La Figure 4 représente la carte géologique simplifiée du bassin versant de l'Arroux.

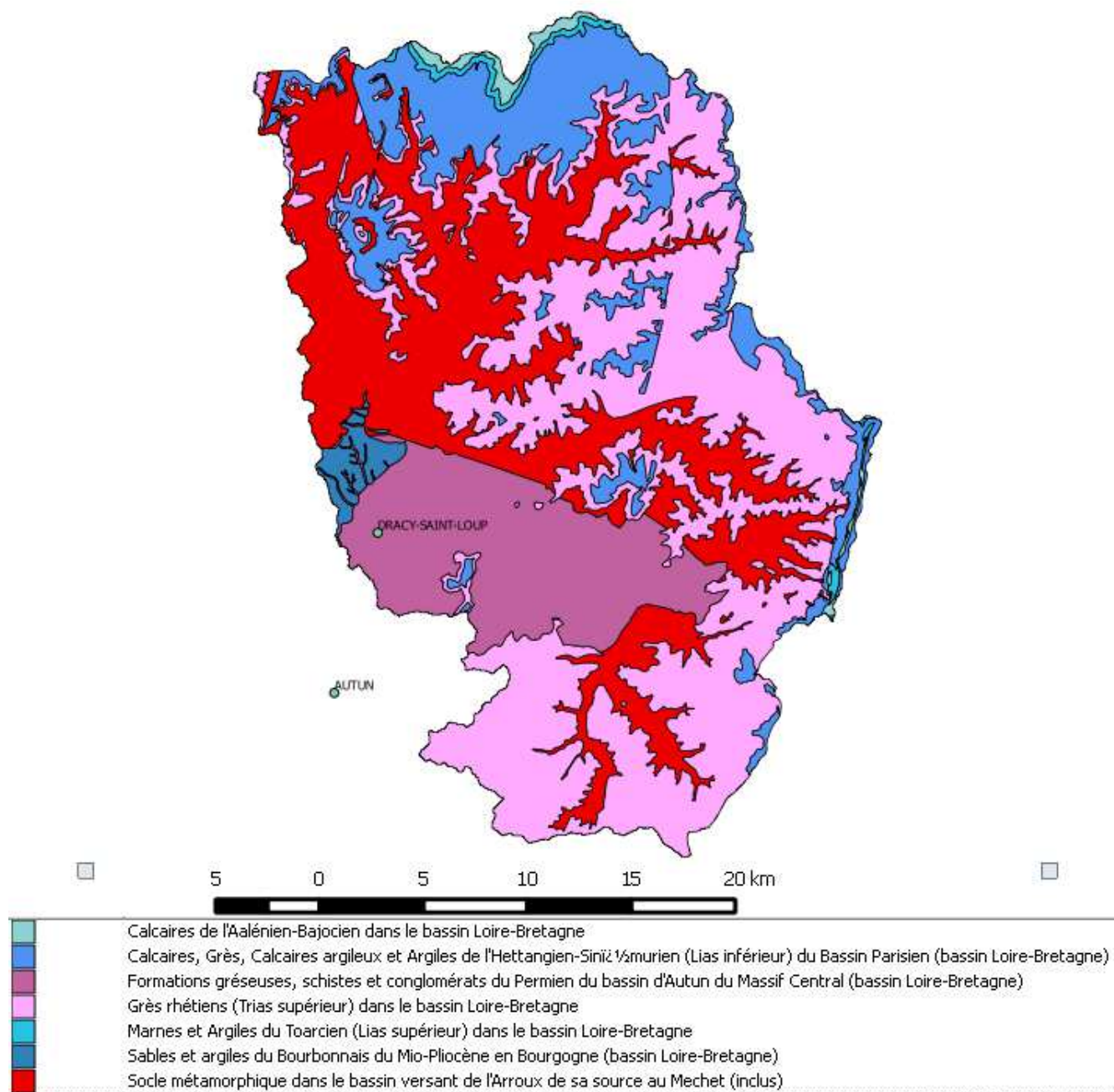


Figure 4: Carte géologique simplifiée du bassin versant de l'Arroux.

3.2.1.2 Géomorphologie.

Le bassin versant de l'Arroux est une zone relativement vallonnée, avec des altitudes comprises entre 566 et 292m. La Figure 5 illustre le modèle numérique de terrain du bassin versant de l'Arroux. La combinaison entre roche granitique et zone vallonnée donne lieu à un réseau hydrographique très développé avec peu de perte hydrologique et de sources diffuses.

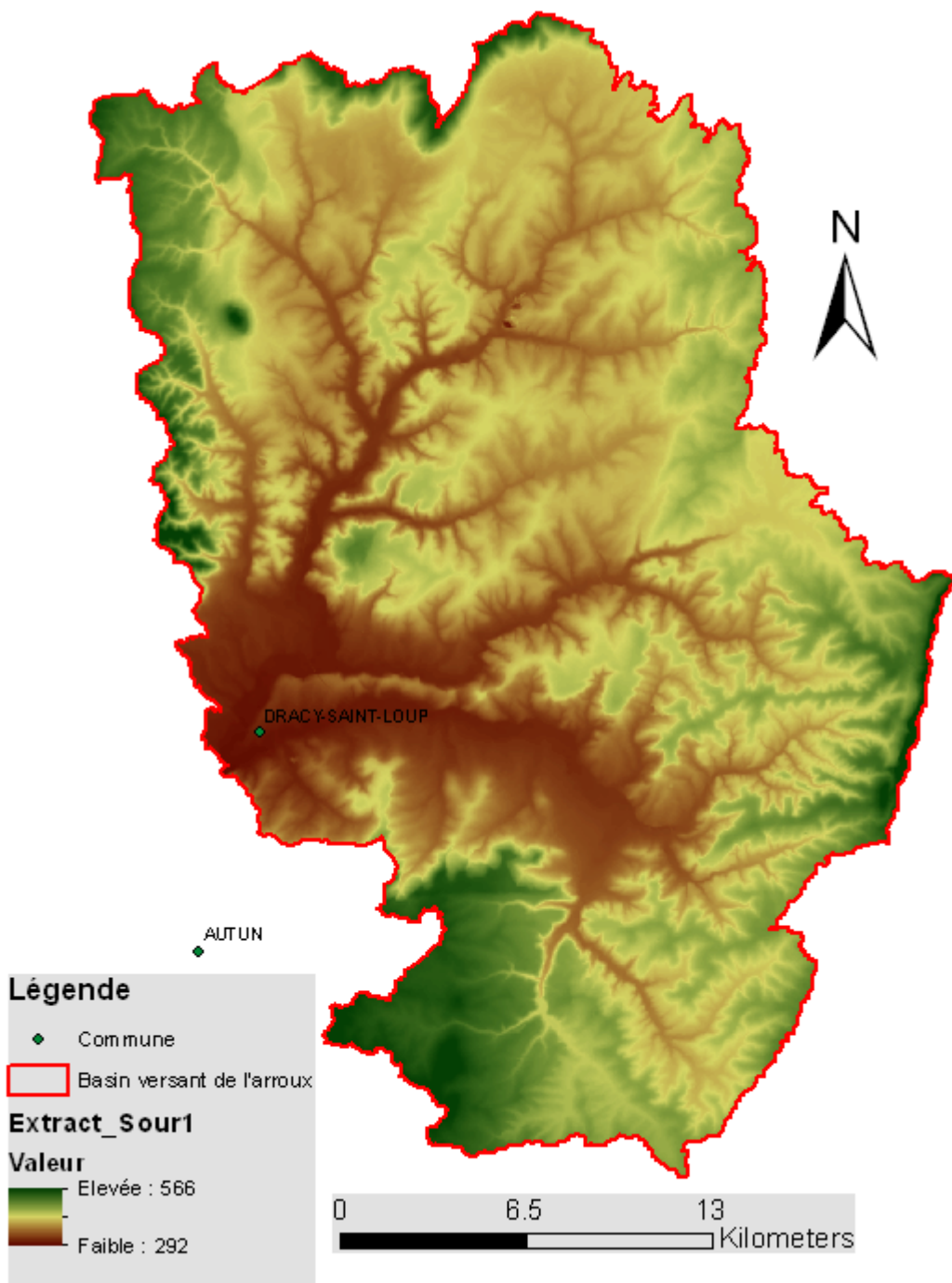


Figure 5: Modèle numérique de terrain du bassin versant de l'Arroux.

3.2.1.3 Climat.

Le climat sur le bassin versant de l'Arroux est caractéristique du climat morvandiaux, climat océanique à influences continentales, avec des précipitations moyennes d'environ 1000 mm par an en raison de sa position et de son altitude.

3.2.2 Paramétrisation du modèle Q2K pour le bassin versant de l'Arroux

Nous avons choisie de paramétrer le modèle sur deux journées, une en été et une en hiver afin de pouvoir mettre en évidence à la fois le cycle journalier et le cycle annuel de l'oxygène dissous dans l'Arroux. Nous détaillerons ci-dessous la façon de procéder afin de paramétrer correctement le modèle Q2K pour la journée du 20 juillet 2004. Les données d'entrées pour la journée du 05 janvier 2004 sont reportées en annexes.

3.2.2.1 Le réseau hydrographique de l'Arroux.

Afin de paramétrer le réseau hydrographique du bassin versant de l'Arroux dans Q2K, nous reprenons le réseau hydrographique en sortie du modèle SWAT, tel qu'il est représenté en Figure 6.

L'ensemble du réseau hydrographique du bassin versant de l'Arroux modélisé par SWAT est donc ensuite découpé en 13 segments mesurant de 0,46 à 43,70 km de longueur et constitués de 1 à 16 éléments. Le nombre d'élément par segment correspond en réalité au nombre de sous bassin versant modélisés par SWAT (Figure 6) et intégré dans la segmentation. Cette segmentation est représentée en Figure 7. Le détail de chacun des 13 segments est ensuite reporté dans la feuille « Reach » du modèle Q2K comme l'illustre le Tableau 4.

Tableau 4: Caractéristiques de chaque segment du réseau hydrographique de l'Arroux en entré du model Q2K dans la feuille "Reach".

				Location		Element	Elevation		Downstream						Hydrauli
Headwater	Reach	Downstream		Upstream	Downstream	Number	Upstream	Downstream	Latitude			Longitude			
	length	Latitude	Longitude	(km)	(km)	>=1	(m)	(m)	Degrees	Minutes	Seconds	Degrees	Minutes	Seconds	
Yes	34.01	47.13	-4.42	79.240	45.230	14	380.000	325.000	47.00	7	45	4.00	25	12	
	5.87	47.11	-4.40	45.230	39.360	3	325.000	318.000	47.00	6	31	4.00	23	55	
Yes	32.43	47.11	-4.40	32.430	0.000	11	390.000	318.000	47.00	6	31	4.00	23	55	
	27.32	47.06	-4.37	39.360	12.040	7	318.000	307.000	47.00	3	22	4.00	21	57	
Yes	15.91	47.06	-4.37	15.910	0.000	5	395.000	307.000	47.00	3	22	4.00	21	57	
	2.98	47.03	-4.37	12.040	9.060	1	307.000	303.000	47.00	2	4	4.00	22	9	
Yes	26.98	47.06	-4.48	42.140	15.160	10	410.000	329.000	47.00	3	26	4.00	29	5	
	15.16	47.03	-4.37	15.160	0.000	5	329.000	303.000	47.00	2	4	4.00	22	9	
	8.60	47.00	-4.33	9.060	0.460	3	303.000	295.000	47.00	0	14	4.00	19	34	
Yes	43.70	46.99	-4.61	80.880	37.180	16	420.000	321.000	46.00	59	23	4.00	36	19	
Yes	21.31	46.99	-4.61	21.310	0.000	8	380.000	321.000	46.00	59	23	4.00	36	19	
	37.18	47.00	-4.33	37.180	0.000	13	321.000	295.000	47.00	0	15	4.00	19	34	
	0.46	47.00	-4.32	0.460	0.000	1	295.000	294.000	47.00	0	9	4.00	19	15	

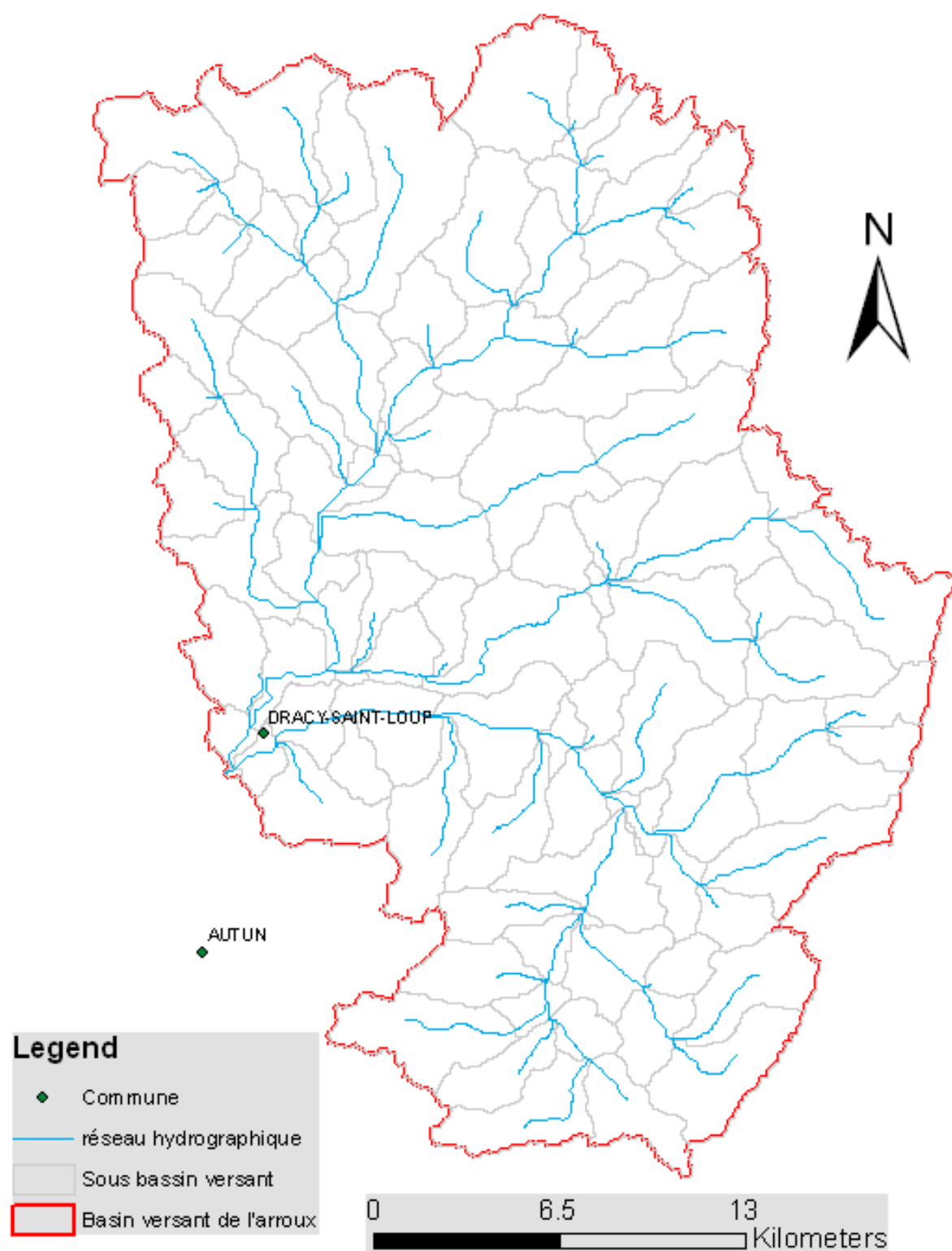


Figure 6: Réseau hydrographique de l'Arroux modélisé par le modèle SWAT.

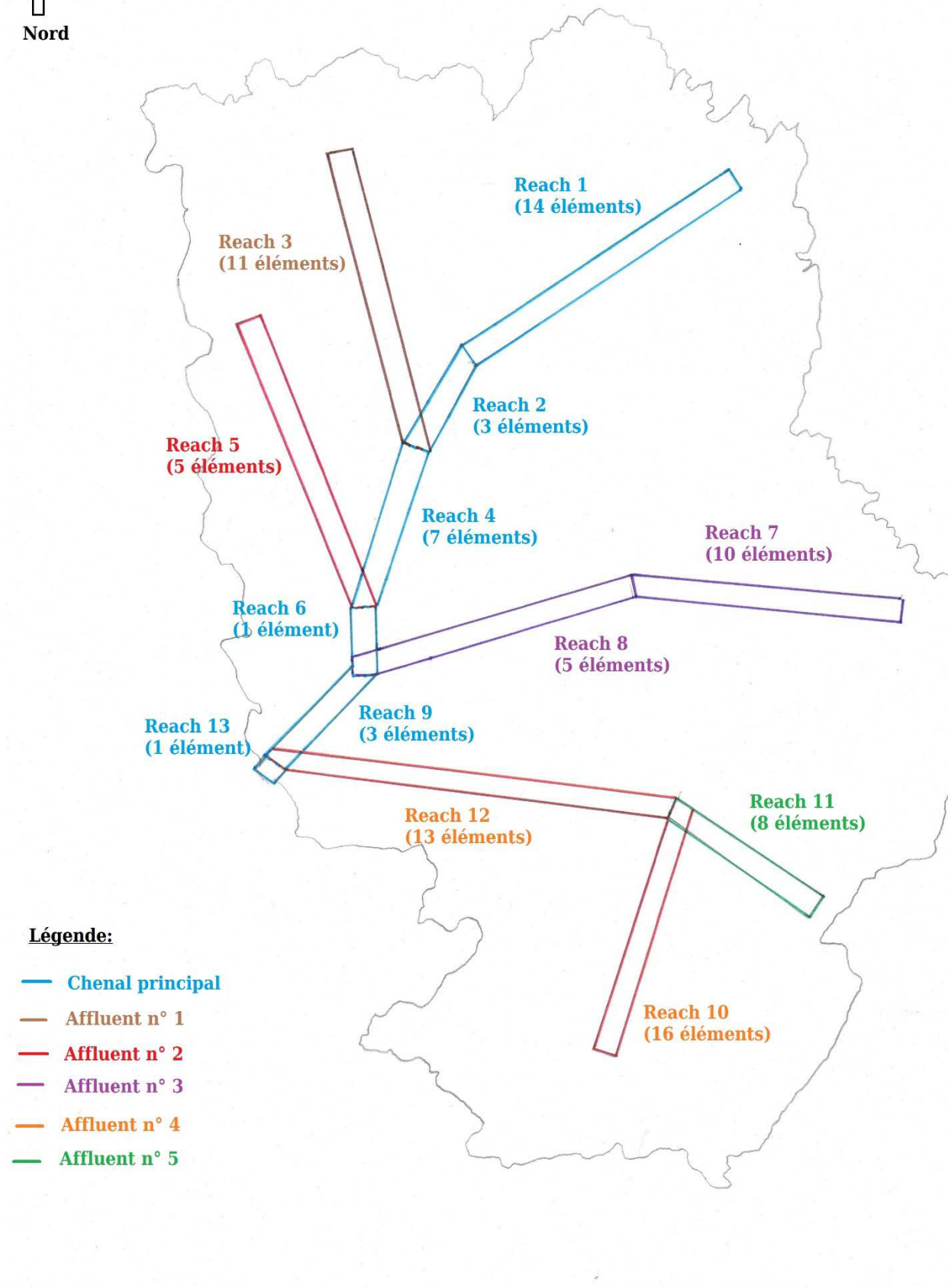


Figure 7: Représentation du réseau hydrographique du bassin versant de l'Arroux pour le modèle Q2K.

3.2.2.2 Les conditions météorologiques associées au bassin versant de l'Arroux.

Les variables climatiques étant récupérées au centre de recherche en climatologie (CRC) de Dijon et issues de la base de données météo France, nous avons accès à des données horaire pour les journées du 20 juillet 2004 et du 05 janvier 2004.

Dans un bassin versant de la taille de celui de l'Arroux (756km²) et dans le contexte Bourguignon, la variation des paramètres météorologiques peut être considérée comme nulle et ces paramètres comme constants sur l'ensemble du bassin versant. Nous n'effectuerons donc aucunes différences entre chaque segment.

Le Tableau 5 reprend les valeurs de la température de l'air, de la température du point de rosé, de la force du vent, et du couvert nuageux entrées pour chacun des 13 segments dans les différentes feuilles de météorologie du modèle Q2K

Tableau 5: Valeurs des paramètres météorologiques horaire utilisés dans Q2K pour la journée du 20 juillet 2007

Heure	Température du point de rosé (°C)	Température de l'aire (°C)	Force du vent (m/s)	Couvert nuageux (%)
00h00	17.4	18.2	1	100
1h00	17.4	18.2	1	100
2h00	17.4	18.2	0	100
3h00	17.4	18	1	100
4h00	17.1	17.6	1	100
5h00	17.1	17.6	2	100
6h00	16.9	17.9	3	100
7h00	17.1	18.4	3	100
8h00	17	19.6	4	80
9h00	16.4	22.1	6	0
10h00	15.6	22.8	4	11.67
11h00	15.8	24	5	56.4
12h00	15.1	25	4	15
13h00	16.4	25	5	25
14h00	16.1	25.5	4	53.3
15h00	16.3	25.7	4	43.3
16h00	15.8	25.5	3	25
17h00	15	26.2	3	3.3
18h00	15.8	24.9	2	16.7
19h00	16.2	23.1	1	28.3
20h00	16.7	19.1	0	100
21h00	16	17.8	0	100
22h00	15.5	16.6	1	100
23h00	15.4	16	0	100

La température de l'air, du point de rosé ainsi que la force du vent sont des valeurs directe issues de la base de donnée météo France. Le couvert nuageux est estimé à partir de la

durée d'insolation horaire. Le paramètre d'ombrage étant indisponible dans la base de donnée météo France, il est laissé à 0% par défaut dans le modèle.

3.2.2.3 Les paramètres de qualité des eaux.

Comme nous l'avons déjà évoqué plus haut, les paramètres physico-chimiques de qualité des eaux sont enregistrés à la station d'Autun. N'enregistrant qu'au pas de temps mensuel, il nous est impossible de renseigner au modèle une variation horaire des paramètres de qualité des eaux, nous prendrons donc le paramètre journalier enregistré par la station que nous considérerons constant sur l'ensemble de la journée. Les paramètres de qualité des eaux entrés dans le modèle pour la journée du 20 juillet 2004 sont résumés dans le Tableau 6.

Tableau 6: Paramètres de qualité des eaux enregistrés à la station d'Autun.

date	20 Juillet 2004	Débits / Headwater (HW)
Matières en suspension (mgD/L)	6.6	HW 1 : 0.3677
Ammonium (mgN/L)	0.08	HW 2 : 0.6735
Azote Kjeldahl (mgN/L)	1	HW 3 : 0.16
Nitrates (mgN/L)	3.1	HW 4 : 0.142
Nitrites (mgN/L)	0.06	HW 5 : 0.4473
Phosphore total (mgP/L)	0.05	HW 6 : 0.1795
DBO5 à 20°C (mgO2/L)	0.5	-
Oxygène dissous (mgO2/L)	10.2	-
Chlorophylle a (µgA/L)	4.57	-
pH (s.u.)	7.42	-
Conductivité (µmhos)	524	-
Alcalinité (mgCaCO3/L)	180	-

Ces différents paramètres sont à renseigner dans la feuille « Headwater » de Q2K, pour chacun des 6 « Headwater », que ce soit pour le chenal principal ou pour les affluents.

Les débits et les altitudes entrés pour chaque « Headwater » sont issus de la modélisation du cycle hydrologique du bassin versant de l'Arroux le 20 juillet 2004 par la modèle SWAT.

Une fois l'ensemble de cette paramétrisation effectuée, le modèle QUAL2K est opérationnel et donne les premiers résultats. Reste désormais à calibrer le modèle.

4. Résultats et discussion

4.1 Calibration du modèle.

Dans notre cas, l'incapacité à avoir des données horaires ne nous permet pas d'effectuer une calibration sur une journée. Une façon de contourner ce problème est de prendre plusieurs prélèvements ponctuels sur la station d'Autun à des heures différentes et dans des conditions climatiques similaires c'est à dire une journée estivale pour la calibration liée à la modélisation de la journée du 20 juillet 2004 et une journée hivernale pour la calibration liée à la modélisation de la journée du 5 janvier 2004.

Tableau 7: Concentration en oxygène dissous (Do), température de l'eau (Teau) et oxygène dissous à saturation (Do sat) utilisées pour la calibration du modèle Q2K.

Date	heure	DO (mgO2/L)	T Eau (°C)	T Eau (°K)	DO sat (mgO2/L)
20/07/2004	16h00	10,2	25,9	299,05	8,128475216
25/07/2005	17h00	8,2	22,9	296,05	8,594603697
23/08/2005	20h00	8,1	19,1	292,25	9,25770891
24/08/2006	19h00	9,6	20,9	294,05	8,93255779
04/06/2007	13h00	9,9	19,7	292,85	9,146987005
11/07/2007	12h00	8,9	16,2	289,35	9,828743549
09/06/2008	15h00	12,4	19,1	292,25	9,25770891
05/08/2008	9h00	9,2	20,6	293,75	8,985311562
03/06/2009	10h00	9,8	18,4	291,55	9,389974548
18/06/2013	8h00	7,5	20,3	293,45	9,038628246
02/06/2010	11h00	11,1	15,2	288,35	10,04059887
05/07/2010	14h00	8,7	25,3	298,45	8,218082502
20/08/2002	18h00	8,39	23,1	296,25	8,562064976
17/06/2002	13h00	9,45	27,1	300,25	7,954295177
15/07/2002	16h00	6,4	17,5	290,65	9,565116933
20/06/2006	16h00	7,8	25,10	298,25	8,24833798
25/06/2003	15h00	7,4	30,7	303,85	7,468388132
23/07/2003	10h00	6,1	24,3	297,45	8,371347677
26/08/2003	12h00	8,4	25,1	298,25	8,24833798
14/06/2004	17h00	12,8	23,8	296,95	8,4498876
16/08/2004	16h00	7,9	22,1	295,25	8,726994432
28/06/2005	8h00	5,8	24,4	297,55	8,355794727
18/07/2006	17h00	5,9	28,2	301,35	7,800231123
20/08/2007	16h00	9,3	17,5	290,65	9,565116933
15/07/2008	10h00	8,4	16,2	289,35	9,828743549
07/07/2009	8h00	7,4	19,8	292,95	9,128765157
03/08/2009	8h00	6,4	17,6	290,75	9,54536641
02/08/2010	15h00	8	22,1	295,25	8,726994432
07/06/2011	11h00	9,3	20,7	293,85	8,967664872
06/07/2011	11h00	6,5	19,9	293,05	9,110608594
03/08/2011	11h00	6,9	22,2	295,35	8,710246792
20/06/2012	9h00	8,94	19,2	292,35	9,239087901
19/07/2012	8h00	5,8	19,5	292,65	9,183627968
17/08/2012	8h00	5,8	19,3	292,45	9,220534315
22/08/2013	8h00	6,3	17,8	290,95	9,5060854

Le Tableau 7 reprend les valeurs en oxygène dissous des différentes journées estivales utilisées pour la calibration du modèle.

Dans notre cas, les données utilisées pour la calibration étant issues de plusieurs journées, nous sommes confrontés au cas où plusieurs observations correspondent à la même heure. Nous devons faire la moyenne de ces valeurs afin d'avoir une seule et unique valeur par heure avant de les intégrer au modèle.

Pour être au plus proche des valeurs observées, la calibration s'appuiera principalement sur la modification de la réaération 50 Jour^{-1} . La faible quantité de biomasse en entrée de chaque « headwater » signifie un faible impact des paramètres biologiques sur le cours d'eau.

4.2 Dynamique de l'oxygène dissous dans l'Arroux.

La Figure 8 et la Figure 9 représentent respectivement les simulations du modèle calibré pour la journée du 20 juillet 2004 et pour la journée du 05 janvier 2004.

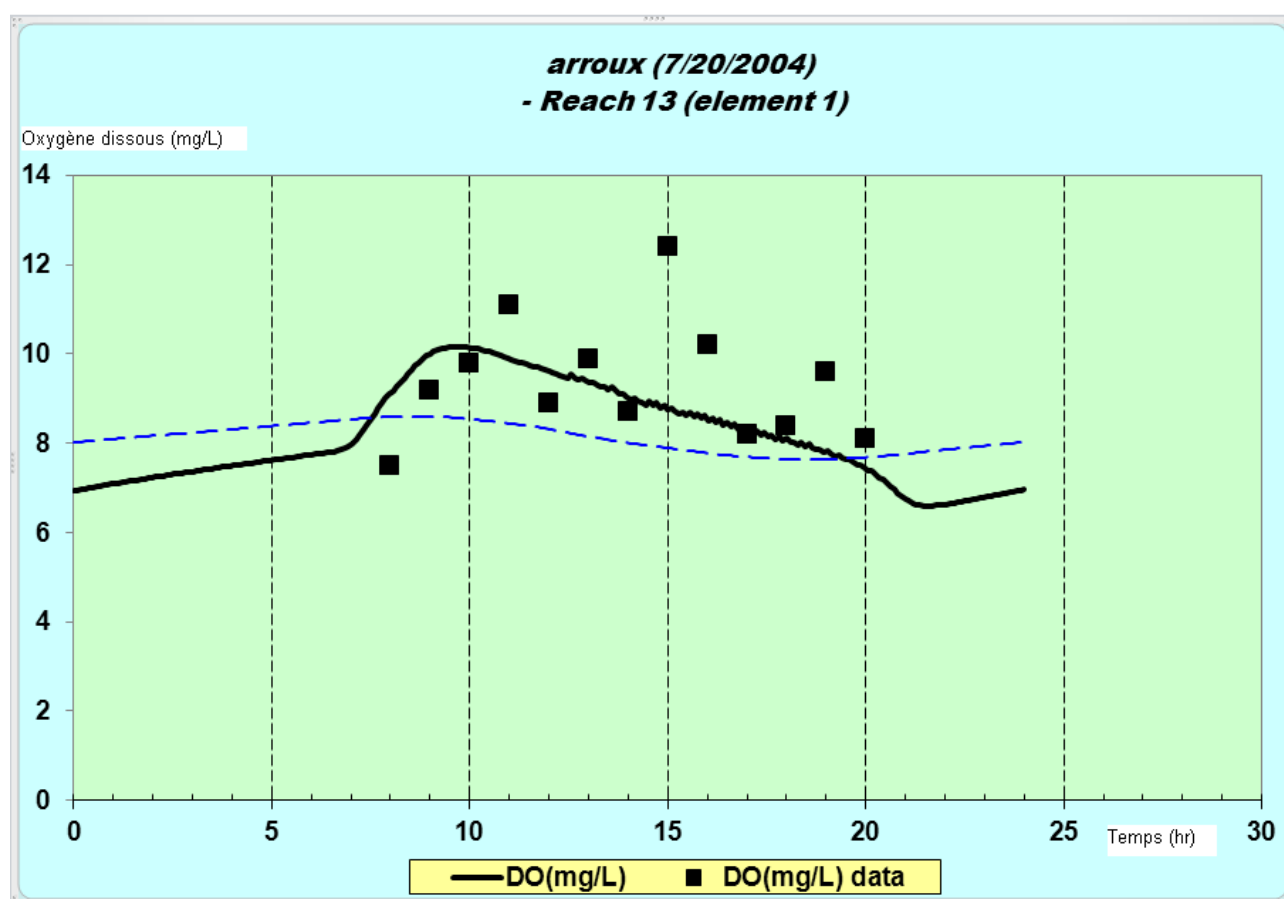


Figure 8: Modélisation de la dynamique journalière de l'oxygène dissous (courbe noire) et de l'oxygène à saturation (courbe pointillée bleue) pour la journée du 20 juillet 2004. Les observations correspondent aux carrés noirs.

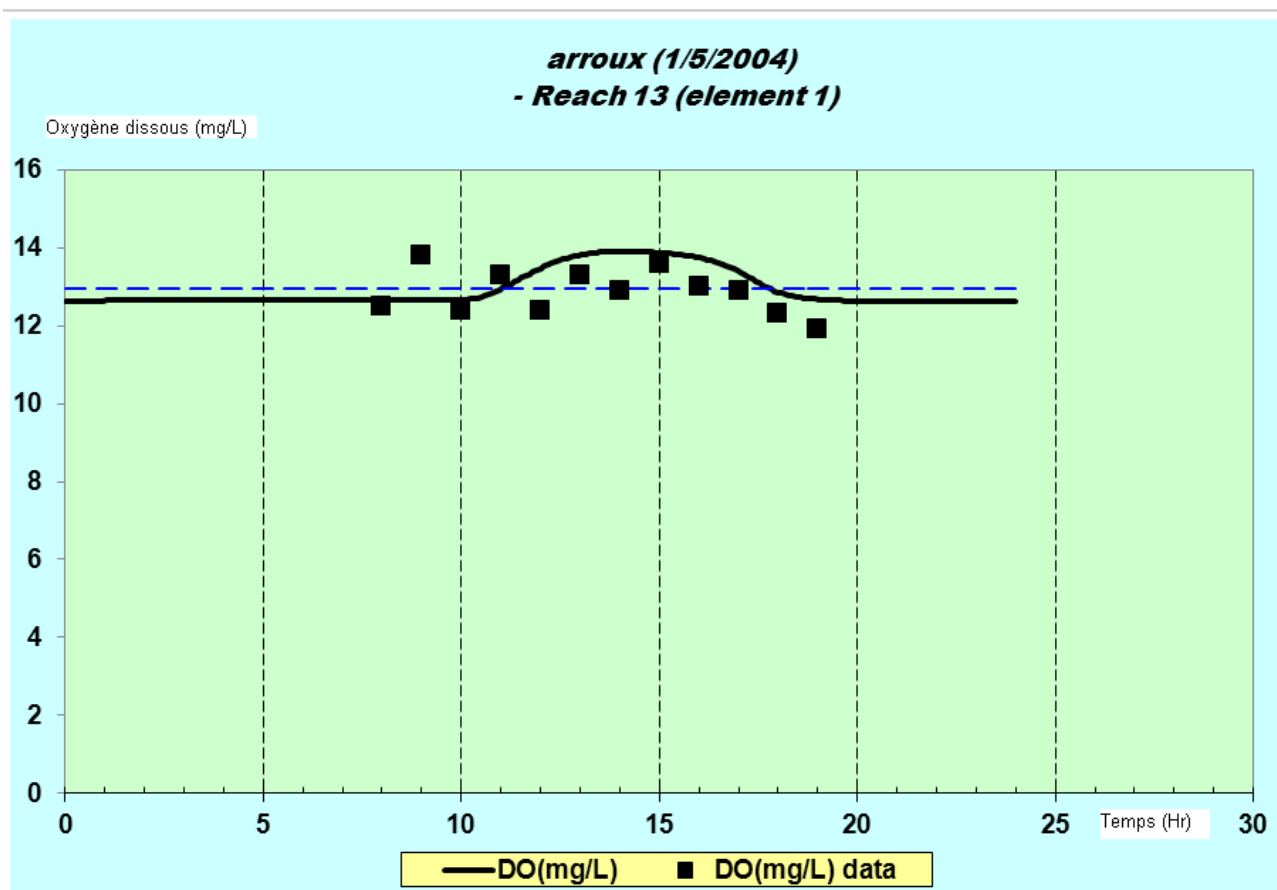


Figure 9: Modélisation de la dynamique journalière de l'oxygène dissous (courbe noire) et de l'oxygène à saturation (courbe pointillée bleue) pour la journée du 05 janvier 2004. Les observations correspondent aux carrés noirs.

Le cycle journalier de la concentration en oxygène dissous s'observe au pas de temps horaire, nous pouvons tout d'abord noter que le modèle est plutôt proche des observations faites sur le terrain. Le taux de saturation en O₂ (%) c'est-à-dire le rapport entre la concentration effective en oxygène et la concentration à saturation (Eq 1 section 2.2.1.1), est représenté sur la Figure 10 pour les 2 simulations réalisées.

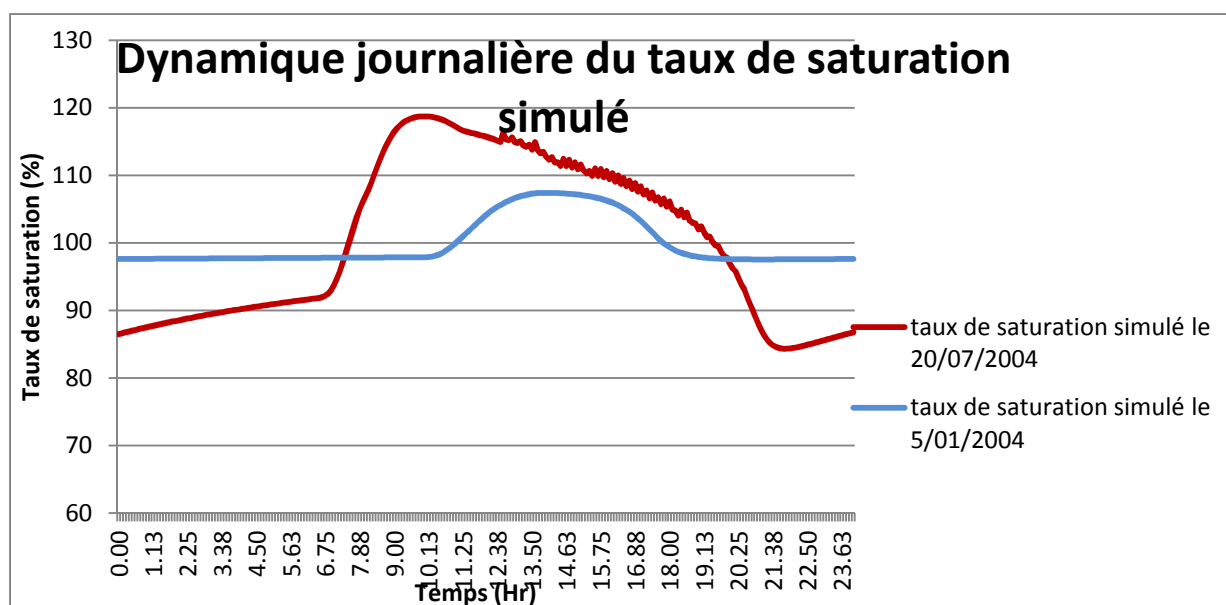


Figure 10: Graphique journalier de la concentration en oxygène dissous relatif à la saturation.

Pour la journée du 20 juillet 2004 (Figure 8 et Figure 10), nous pouvons facilement mettre en évidence une sous saturation à environ 85 % en oxygène dissous dans l'Arroux durant la période nocturne et une sursaturation en oxygène dissous pouvant aller jusqu'à 120% durant la journée. Cette variation journalière peut être attribuée aux facteurs de contrôle de l'oxygène dissous que sont la respiration et la photosynthèse de la biomasse, respectivement consommateurs et producteurs d'oxygène. L'observation particulière sur la valeur en O_2 à 15H (Figure 8) correspond à une journée particulière et ne sera pas prise en compte l'étude des résultats.

Pour la journée du 05 janvier 2004 (Figure 9 et Figure 10), nous pouvons observer que ce même cycle est beaucoup moins prononcé, avec une sous saturation comprise entre 95 et 98% durant la nuit et une sursaturation d'environ 110% la journée. Les facteurs de contrôle évoqué ci-dessus étant moins important en hiver, c'est alors la réaération et la température qui contrôle la dynamique de l'oxygène dissous.

L'étude de ces deux cycles journaliers nous permet de mettre alors en évidence la dynamique annuelle de l'oxygène dissous, également visible via l'étude de la Figure 11.

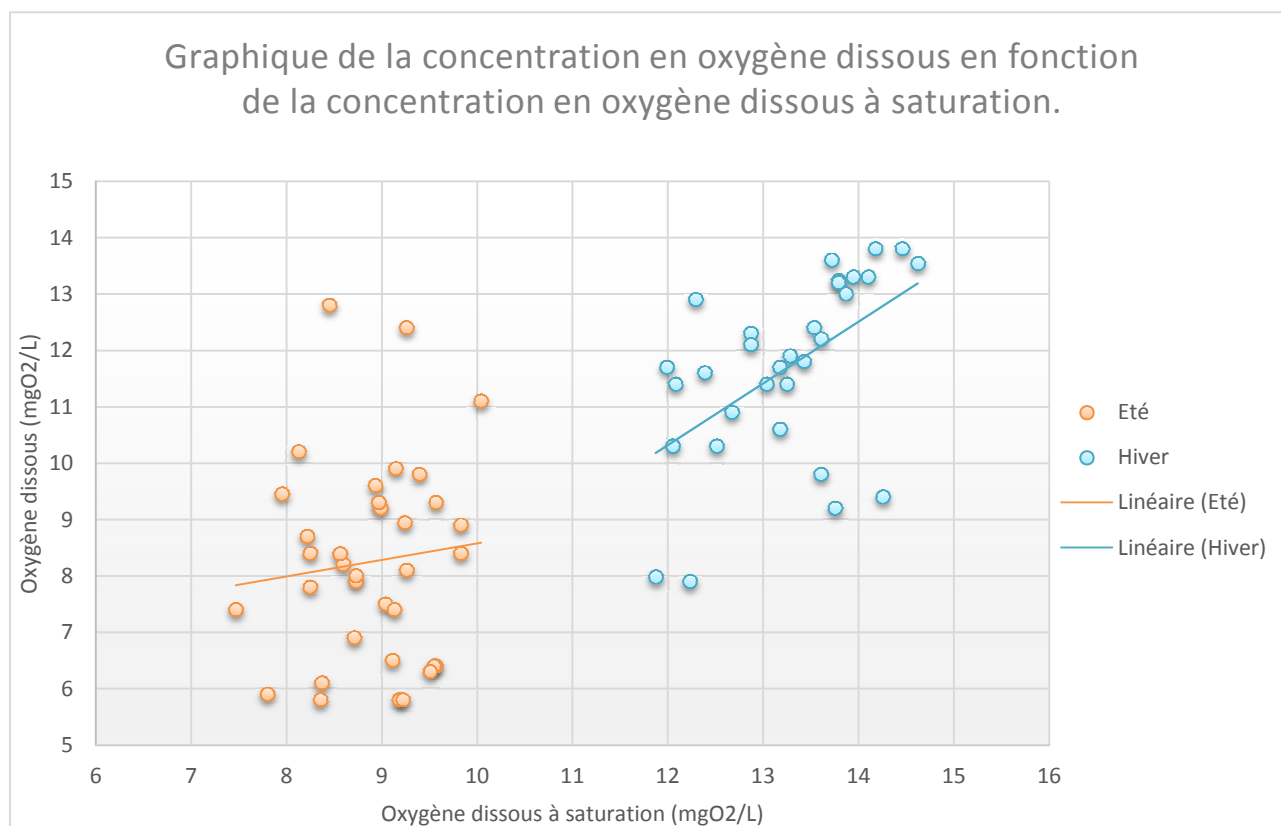


Figure 11: Graphique de la concentration en oxygène dissous en fonction de la concentration en oxygène dissous à saturation dans l'Arroux à la station d'Autun pour les saisons estivale (orange) et hivernale (bleu).

La Figure 11 reprend les données d'observation de l'oxygène dissous sur l'Arroux en été et en hiver (Tableau 7 et annexe 1) en fonction de l'oxygène à saturation. Pour la période estivale, nous observons un nuage de point très dispersé ou la droite de régression n'est aucunement significative, indiquant qu'il n'y a aucun rapport direct entre la concentration en oxygène dissous et la concentration en oxygène dissous à saturation. En revanche, durant la période hivernale, les observations ne s'ordonnent pas de la même façon et

nous pouvons mettre en évidence un lien entre la concentration en oxygène dissous et la concentration à saturation. Cela montre que l'oxygène dissous dépend de la température et de la réaération, principaux facteurs de l'oxygène à saturation. A contrario, la période estivale est influencée par la mise en place d'autres facteurs contrôlant la concentration en oxygène dissous tels que la production et la consommation par l'activité biologique.

4.3 Sensibilité à la température.

Afin d'être sûr que les journées sélectionnées pour calibrer le modèle soient bien représentatives, une étude de sensibilité à la température est effectuée. Pour ce faire, nous sélectionnons les températures en entrées pour simuler la journée du 20 juillet 2004 et nous faisons varier la température de plus ou moins 5°C.

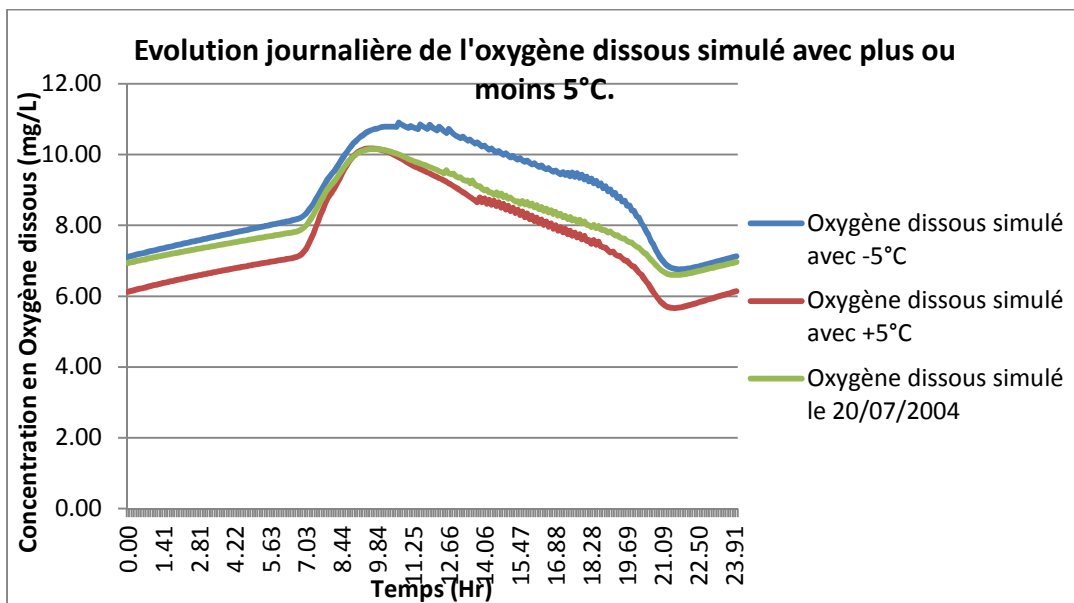


Figure 12: Graphique des variations de la concentration en oxygène dissous journalière avec une variation de température de plus ou moins 5°C.

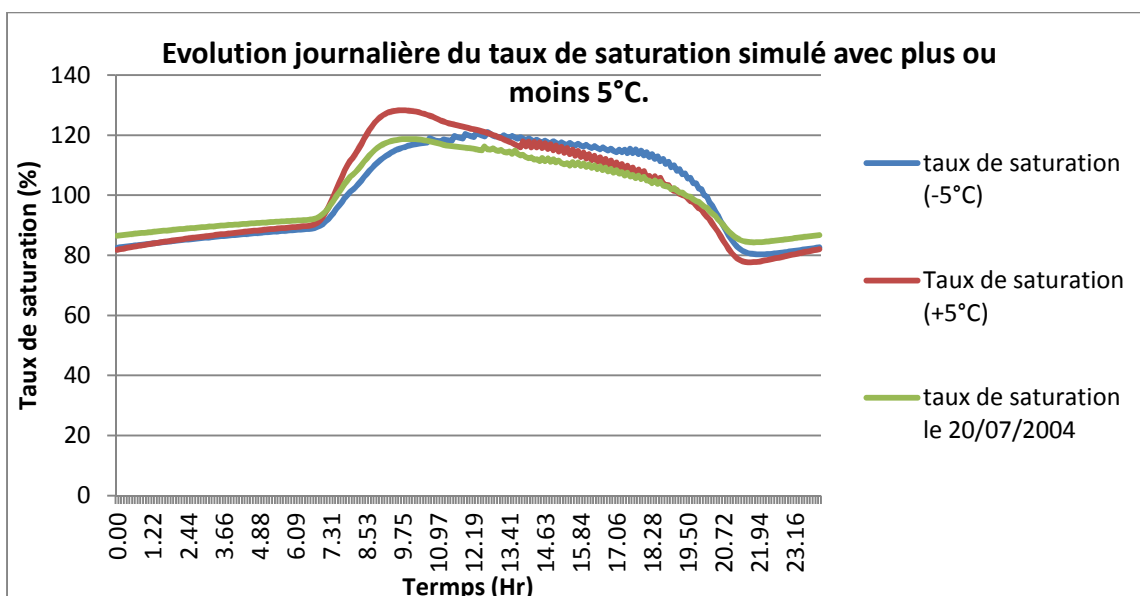


Figure 13: Graphique des variations du taux de saturation journalier avec une variation de température de plus ou moins 5°C.

La Figure 12 nous montre les variations entre l'O₂ simulé pour le 20 juillet 2004 et l'oxygène dissous simulé à plus ou moins 5°C. Ces amplitudes de variations sont toujours inférieures ou égale à 1 mg/L. En ce qui concerne les taux de saturations présents en Figure 13, l'écart est cette fois-ci toujours inférieur ou égal à 10%.

4.4 Scénarios futures.

La modélisation et l'estimation des températures pour une journée estivale à l'horizon 2070 (Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement, 2011), simule une augmentation des températures moyenne d'environ 3°C. De même, la modélisation des débits d'étiages simule une baisse d'intensité d'environ -50%. Le modèle a donc été de nouveau paramétré, sur la base de la journée du 20 juillet 2004 à laquelle nous avons ajouté 3°C à chacune des valeurs de température (air et eau) et à laquelle nous avons enlevé 50% de l'intensité des débits au départ de chaque « headwater ».

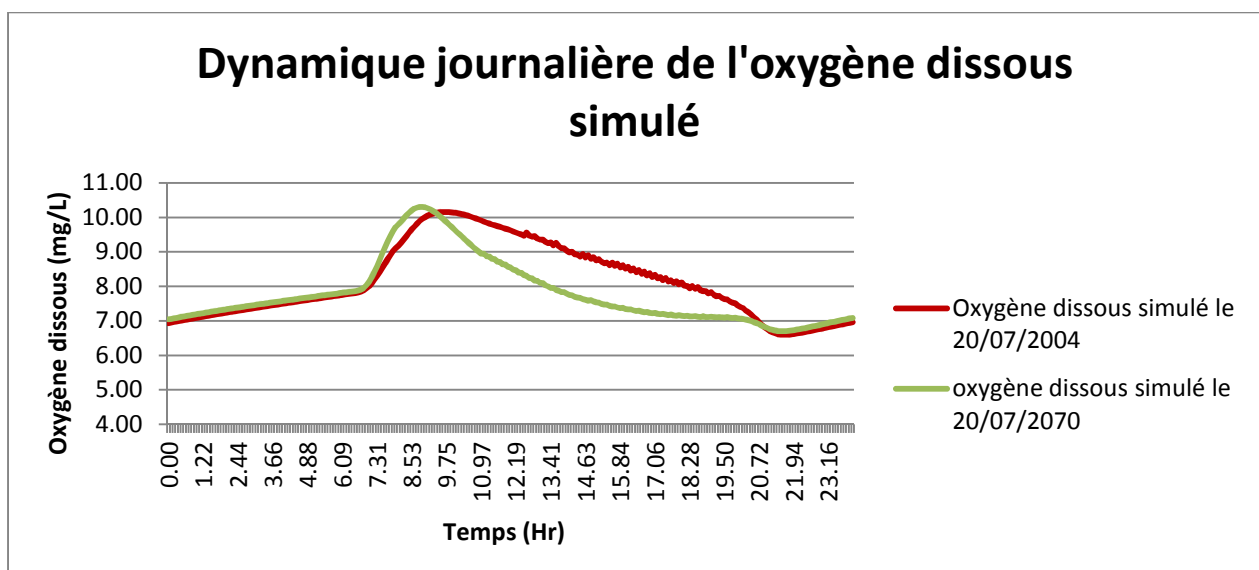


Figure 14: Graphique de la dynamique journalière simulée en O₂ dissous pour les journée du 20 juillet 2004 et 2070.

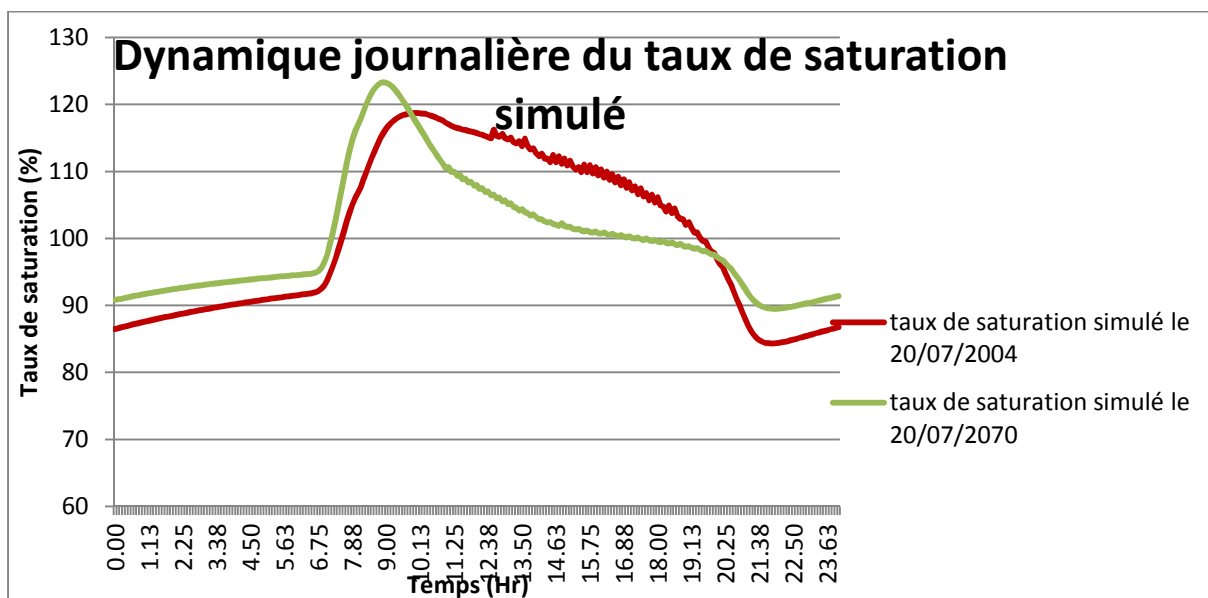


Figure 15: Graphique de la dynamique journalière simulée du taux de saturation pour journée du 20 juillet 2004 et 2070.

La Figure 14 et la Figure 15 représentent cette modélisation à l'horizon 2070. Nous pouvons mettre en évidence une perturbation du cycle diurne par rapport au cycle du 20 juillet 2004. La Figure 14 suggère une perturbation en journée avec des concentrations plus faibles dans la journée pour 2070. En revanche, la Figure 15 indique un meilleur taux de saturation nocturne d'environ 5% pour 2070 et un taux de saturation en journée plus faible d'environ 10% par rapport à 2004. Il reste néanmoins important de préciser que les valeurs en oxygène dissous restent relativement proches des valeurs en oxygène dissous à saturation et donc que le cycle global ne semble pas connaître une perturbation trop importante.

4.4 Discussion.

Le cycle journalier de l'oxygène dissous en hiver est corrélé à l'oxygène à saturation, les principaux paramètres de contrôle de l'oxygène dissous en hiver sont donc la température et la réaération. En revanche en été, il n'y a pas de corrélation directe entre l'oxygène dissous et l'oxygène à saturation, impliquant alors la mise en œuvre d'autres facteurs biologiques de production et de consommation (photosynthèse et respiration) d'oxygène, augmentant l'amplitude du cycle journalier estival.

Le guide technique de l'évaluation de l'état des eaux douces de surfaces de métropole (ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire, 2009) nous indique les limites de classes d'état des cours d'eau en ce qui concerne l'oxygène dissous. La limite entre état moyen et bon état se situe à 6 mg/L et la limite entre bon état et très bon état se situe à 8 mg/L. L'Arroux est donc considéré en bon état (en termes d'oxygène dissous) en hiver et oscille entre bon état et état moyen durant l'été suivant le jour ou la nuit.

Compte tenu de l'état écologique du cours d'eau et du faible impact anthropique en termes d'apport de nutriments et de rejet d'eau usés, l'Arroux semble donc être un cours d'eau soumis aux processus naturels de contrôle de l'oxygène dissous.

L'étude de sensibilité à la température nous révèle une faible amplitude de variation lors d'une modification de la température de plus ou moins 5°C. Bien que majoritairement dépendant de la température (et principalement en hiver), l'oxygène dissous s'avère donc beaucoup moins sensible à ce dernier paramètre qu'à l'apparition de l'activité biologique (comme observé en été).

Lors de la modélisation de la qualité en O₂ de l'Arroux à l'horizon 2070, nous pouvons mettre en évidence une perturbation dans la dynamique journalière de l'oxygène dissous. Cette perturbation concerne principalement les valeurs de journée ce qui soulève donc l'apparition d'un phénomène de consommation de l'oxygène dissous ou une perturbation de l'apport en l'oxygène dissous par la photosynthèse.

Il reste également important de soulever la pertinence du modèle puisque bien calibré en été, le modèle semble surestimer les valeurs observées en hiver, nous pouvons alors nous poser la question de la pertinence du modèle quant à la simulation dans le futur.

5. Conclusion.

L'étude de la qualité des eaux de surfaces en Bourgogne, en réponse au changement climatique qui interviendra dans les prochaines années, est un enjeu prioritaire pour les décideurs publics. L'implémentation du modèle Q2K sur l'Arroux, à travers l'organisation du réseau hydrographique en segments, la récupération des variables climatique et de qualité des eaux et enfin la calibration du modèle, nous a permis de simuler l'oxygène dissous dans l'Arroux. Nous avons ainsi pu montrer que la concentration en oxygène dissous en hiver est contrôlée par la température et la réaération tandis qu'en été, des facteurs biologiques (respiration et photosynthèse) entre en jeux. Mais aussi que l'oxygène dissous n'est pas très sensible à la température, puisque corrélé à l'oxygène à saturation durant l'hiver (et donc à la température), c'est majoritairement l'apparition ou non de facteurs de contrôle biologiques qui occasionne les plus grosses variations en O₂ dans l'Arroux. Enfin nous avons également pu montrer, lors de l'étude d'un scénario future sur l'impact du changement climatique en région bourguignonne dans les années 2070, que l'Arroux ne rencontrera pas de changement important dans sa dynamique globale en oxygène dissous. Bien que la pertinence du modèle quant à sa calibration sur plusieurs journées reste encore sujette à questionnement.

Une recalibration du modèle avec des valeurs horaires récupérée sur le terrain pourrait alors être envisagée afin d'affiner le modèle. Une perspective de travail future pourrait également être envisagée en complétant les valeurs obtenues à partir du modèle QUAL2K avec d'autres modèles de qualité des eaux afin de confirmer la pertinence du travail effectué sur l'Arroux.

Liste Bibliographique:

BUTCHER J.B. et S. COVINGTON, 1995. Dissolved oxygen analysis with temperature dependence. *J. Environ. Eng.*, 121, 756-759.

Chapra, S.C., Pelletier, G.J. and Tao, H. 2008. QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality, Version 2.11: Documentation and User's Manual. Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford, MA.

Legras O.(2014) Evolution du bilan hydrique à l'échelle de bassins-versants en contexte de changement climatique - Mise en place d'une méthodologie.

Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire. (2009) guide technique évaluation de l'état des eaux de surface de métropole, 72pp.

Ministère de l'écologie, du développement durable des transports et du logement. (2011) Explore 2070- rapport d'étape n°3, 152pp.

Neitsch, S.L. J.G. Arnold, J.R. Kiniry, J.R. Williams August, 2009 SWAT Theoretical documentation version 2009.

Tetra Tech, inc, 2009 New River QUAL2K Water Quality Model for the New River Dissolved Oxygen TMDL Final Report September 25, 2009.

V. Villeneuve et al, 2006. / *Revue des Sciences de l'Eau* 19(4) (2006) 259-274

WILCOCK R.J., McBRIDE G.B., NAGELS J.W. et G.L. NORTHCOTT, 1995. Water quality in a polluted lowland stream with chronically depressed dissolved oxygen: Causes and effects. *New Zealand J. Mar. Freshwater Res.*, 29, 277-288.

Annexe 1:Données climatiques utilisées pour la paramétrisation du modèle Q2K le 05 janvier 2004.

Heure	Température du point de rosé (°C)	Force du vent (m/s)	Température de l'air (°C)
00h00	-3.7	3	-1.5
1h00	-3.2	3	-1.3
2h00	-3.4	3	-1.5
3h00	-3.1	4	-1.2
4h00	-2.9	3	-1.2
5h00	-2.6	4	-1.2
6h00	-2.2	4	-1.1
7h00	-2	3	-1
8h00	-1.6	3	-0.8
9h00	-1.4	4	-0.4
10h00	-0.9	5	0.2
11h00	-0.6	4	0.7
12h00	-0.4	4	1.1
13h00	-0.1	4	1.7
14h00	0.3	4	1.9
15h00	0.3	3	1.9
16h00	0.3	4	1.5
17h00	0.5	2	1.5
18h00	0.6	2	1.6
19h00	0.5	2	1.4
20h00	0.6	2	1.3
21h00	0.6	1	1.3
22h00	0.6	2	1.5
23h00	0.6	1	1.3

Annexe 2: Données de qualité des eaux et débits utilisées pour la paramétrisation du modèle Q2K le 05 janvier 2004

date	5 janvier2004	Débit (m3/s)/ Headwater (HW)
Matières en suspension (mgD/L)	4.8	HW 1: 0.678
Ammonium (mgN/L)	0.09	HW 2: 0.4354
Azote Kjeldahl (mgN/L)	1	HW 3: 0.21
Nitrates (mgN/L)	27.7	HW 4: 0.196
Nitrites (mgN/L)	0.09	HW 5: 0.35
Phosphore total (mgP/L)	0.05	HW 6: 0.498
DBO5 à 20°C (mgO2/L)	0.5	-
Oxygène dissous (mgO2/L)	13.6	-
Chlorophylle a (µgA/L)	-	-
pH (s.u.)	7.76	-
Conductivité (µmhos)	322	-
Alcalinité (mgCaCO3/L)	96.4	-

Annexe 3: Données des différentes journées hivernales utilisées pour la calibration du modèle Q2K le 05 janvier 2004.

Date	heure	DO (mgO ₂ /L)	T Eau (°C)	T Eau (°K)	DO sat (mgO ₂ /L)
05/01/2004	15h00	13,6	2,3	275,45	13,71783696
16/12/2003	18h00	12,3	4,7	277,85	12,8707704
05/02/2004	14h00	12,9	6,5	279,65	12,29217284
18/01/2002	11h00	9,2	2,2	275,35	13,75515904
11/02/2002	19h00	11,9	7,9	281,05	11,87246624
02/12/2002	14h00	11,7	7,5	280,65	11,98981212
27/01/2003	10h00	12,1	4,7	277,85	12,8707704
24/02/2003	10h00	12,4	2,8	275,95	13,53374488
07/12/2004	15h00	11,4	4,2	277,35	13,03981588
24/01/2005	15h00	12,2	2,6	275,75	13,60688174
21/02/2005	15h00	11,8	3,1	276,25	13,42527128
13/12/2005	16h00	13	1,9	275,05	13,86814936
01/02/2006	16h00	10,6	3,8	276,95	13,17778927
22/02/2006	17h00	10,9	5,3	278,45	12,67279773
21/12/2006	13h00	13,3	1,3	274,45	14,09882406
31/01/2007	15h00	11,9	3,5	276,65	13,28290138
13/02/2007	13h00	11,4	7,2	280,35	12,07915367
22/01/2008	12h00	7,9	6,7	279,85	12,23064987
01/12/2008	9h00	10,3	5,8	278,95	12,5117713
14/01/2010	13h00	9,8	2,6	275,75	13,60688174
02/02/2010	10h00	9,4	0,9	274,05	14,25616833
06/12/2010	11h00	13,3	1,7	274,85	13,94433912
20/01/2011	12h00	11,7	3,8	276,95	13,17778927
10/02/2011	12h00	11,4	3,6	276,75	13,24770686
07/12/2011	12h00	10,3	7,3	280,45	12,04924489
16/01/2012	15h00	13,24	2,1	275,25	13,79265117
16/02/2012	9h00	13,54	0	273,15	14,62097991
14/12/2012	8h00	13,2	2,1	275,25	13,79265117
26/02/2013	9h00	13,8	1,1	274,25	14,17713483
13/12/2013	8h00	13,8	0,4	273,55	14,45696687
20/02/2014	9h00	11,6	6,2	279,35	12,38546606

Implémentation du modèle de qualité des eaux QUAL2K sur le bassin versant de l'Arroux

L'étude de la qualité des eaux de surface en réponse au changement climatique moderne est un enjeu primordial en Bourgogne. L'Oxygène dissous est un témoin robuste de contrôle de la qualité des eaux d'écoulement. Ce pose alors les questions suivantes. Quel est la dynamique de l'oxygène dissous dans les cours d'eau ? Comment la simuler ? A quel point le changement climatique aura un impact sur l'oxygène dissous dans les cours d'eau bourguignons et donc sur la qualité de ces derniers ? Les facteurs contrôlant la concentration en oxygène dissous dans le cours d'eau peuvent être d'origine biologiques (respiration, photosynthèse), physique (Température, réaération, lumière) et chimique (Demande sédimentaire en oxygène, photolyse). Les modèle SWAT et QUAL2K utilisent un certain nombre de ces facteurs dans leurs équations de calcul de la concentration en oxygène dissous dans les cours d'eau, mais le modèle QUAL2K fonctionnant au pas de temps horaire est mieux adapté à l'étude de la dynamique en O_2 dans un bassin versant pilote en bourgogne, le bassin versant de l'Arroux. L'implémentation de ce modèle pour une journée estivale et une journée hivernale sur le bassin versant de l'Arroux nécessite l'organisation du réseau hydrographique en segments, la récupération des variables climatique et de qualité des eaux et enfin la calibration du modèle. Elle permet de simuler les cycles journalier et annuel de l'oxygène dissous et de montrer que L' O_2 dans l'Arroux est contrôlé par la température et la réaération en hivers auxquels vient s'ajouter l'activité biologique en été. Enfin la paramétrisation d'une journée type du climat estival bourguignon, estimé à l'horizon 2070, permet une première estimation de l'impact du changement climatique sur la ressource en eaux en bourgogne.

Mots Clefs:

SWAT - QUAL2K - Oxygène dissous – Modélisation – Bassin versant de l'Arroux – Bourgogne