

École des Ponts

ParisTech

ET

le cnam

CERTIFICAT DE COMPETENCE

« EAUX ET SOLS »

2010-2011

RAPPORT DE STAGE

**LA RESSOURCE EN EAU DU BASSIN VERSANT DE
L'ARROUX**

Présenté par : Stéphane RENAUD

Encadré par : Olivier FOUCHÉ

LABORATOIRE EAU ENVIRONNEMENT ET SYSTEMES URBAINS

Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement mon responsable de mémoire, Monsieur Olivier Fouché pour tout le temps qu'il a bien voulu m'accorder et tous les précieux conseils et orientations qu'il m'a donnés.

Je remercie également Monsieur Bruno Bouchard, de MétéoFrance, pour les informations et nombreux conseils qu'il m'a apportés et sans lesquels je n'aurais pu aboutir à mes résultats.

Enfin je remercie Monsieur Laurent Denave pour sa relecture et ses remarques pleines d'intérêt, et Mademoiselle Emilie Cornic pour son soutien permanent.

SOMMAIRE

<u>D)</u>	<u>INTRODUCTION</u>	p 7
1)	<u>Présentation générale du mémoire</u>	p 7
2)	<u>Textes réglementaires</u>	p 7
	a) <u>Au niveau européen</u>	p 7
	b) <u>La transposition en droit français et les institutions qui en découlent</u>	p 7
3)	<u>Présentation du territoire étudié</u>	p 8
	a) <u>Eléments de décision pour le choix du périmètre</u>	p 8
	b) <u>Présentation des cartes du périmètre de l'étude</u>	p 9
<u>II)</u>	<u>HYDROLOGIE DU TERRITOIRE D'ETUDE</u>	p 12
1)	<u>Le cycle de l'eau</u>	p 12
2)	<u>Le bilan hydrologique sur le territoire étudié</u>	p 12
	a) <u>Définitions</u>	p 12
	- <u>Caractéristiques géométriques</u>	p 12
	- <u>Réseau hydrographique</u>	p 14
	- <u>Caractéristiques agro-pédo-géologiques</u>	p 16
	b) <u>Les sources d'informations relatives au bilan hydrologique</u>	p 17
	c) <u>L'estimation du bilan hydrologique</u>	p 17
3)	<u>Les prélèvements effectués au sein du bassin versant</u>	p 24
	a) <u>Les prélèvements pour l'alimentation en eau potable (AEP)</u>	p 24
	b) <u>Les prélèvements industriels et agricoles</u>	p 25
	c) <u>Les prélèvements des particuliers</u>	p 27
	d) <u>Les prélèvements pour l'alimentation du canal du centre</u>	p 28
4)	<u>La vulnérabilité de la qualité et de la quantité de la ressource</u>	p 28
	a) <u>Les activités susceptibles de polluer</u>	p 28
	b) <u>Les problèmes liés au manque d'eau en période d'étiage</u>	p 29
	c) <u>Etude de la réserve en eau du bassin versant à l'étiage</u>	p 30
5)	<u>Analyse des résultats obtenus</u>	p 34
<u>III)</u>	<u>HYDROGEOLOGIE DU BASSIN VERSANT</u>	p 36
1)	<u>Introduction</u>	p 36
2)	<u>La géologie</u>	p 37
	a) <u>Histoire géologique de la région</u>	p 39
	b) <u>Présentation de quelques coupes géologiques</u>	p 41

3) <u>Etendue des alluvions superficielles</u>	p 43
a) <u>L'Arroux</u>	p 43
b) <u>La Bourbince</u>	p 43
c) <u>L'Oudrache</u>	p 44
4) <u>Les nappes en présence et la nature des aquifères</u>	p 44
a) <u>les nappes alluviales</u>	p 44
- Les paramètres hydrodynamiques de ces nappes	p 44
- La relation nappe rivière	p 44
b) <u>les nappes des massifs granitiques</u>	p 46
- L'étendue du massif granitique sur le territoire étudié	p 46
- Les recherches effectuées pour la détermination de failles/fractures intéressantes	p 46
c) <u>les nappes du bassin du Stéphano-Permien</u>	p 47
- Les sources d'informations	p 47
- Les conclusions des études effectuées	p 48
<u>IV) CONCLUSIONS</u>	p 51
1) <u>Rappel de la problématique</u>	p 51
2) <u>Les éléments de réponse</u>	p 51
3) <u>Les préconisations</u>	p 52
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	p 55
<u>SITES INTERNET</u>	p 56
<u>ANNEXES</u>	

D) INTRODUCTION

1) Présentation générale du mémoire

Dans le cadre de l'unité d'enseignement « Projet-Travaux-Environnement » du Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris (CNAM), il m'a été accordé de choisir un sujet de mémoire sur le thème de la ressource en eau souterraine du bassin versant de l'Arroux. L'Arroux est un affluent bourguignon de la Loire sur sa rive droite et dont le parcours est presque entièrement contenu dans le département de la Saône-et-Loire.

La problématique retenue pour ce mémoire est la suivante : *du fait de la généralisation des prélèvements d'eau pour l'alimentation en eau (potable ou non), dans les réservoirs et nappes superficiels au sein du bassin versant de l'Arroux, et compte tenu de la vulnérabilité de ces ressources, tant du point de vue qualitatif que du point de vue quantitatif, il semble opportun d'étudier les capacités des autres ressources souterraines existantes dans le bassin versant pour palier un possible manque.*

2) Textes réglementaires

Si les premiers textes relatifs au droit de l'eau, en France, remontent au code Napoléon, la prise de conscience d'une nécessité de la gestion de l'eau est plus récente. La première loi sur l'eau d'importance date du 16 décembre 1964, elle organise la gestion décentralisée de l'eau par bassin versant et crée les agences de l'eau et les comités de bassin. La seconde grande loi d'importance est celle du 3 janvier 1992 : elle renforce l'impératif de protection de la qualité et de la quantité des ressources en eau en mettant en place des outils de gestion des eaux par bassin, un Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) pour chacun des six grands bassins versants nationaux, et les Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE), actuellement en cours d'élaboration pour le SAGE Arroux-Bourbince, pour les sous-bassins.

a) Au niveau européen

Un des premiers textes européens concernant la protection des eaux souterraines est la Directive 80/68/CEE du Conseil de l'Europe du 17 décembre 1979. Le texte qui définit la réglementation de base sur l'eau est la Directive Cadre Européenne 2000/60/CE du 23 octobre 2000, directive fortement inspirée par le droit français en matière de protection de l'eau. Cette dernière, appuyée par la Directive 2006/118/CE du 12 décembre 2006, fixe pour objectif d'atteindre un bon état écologique général des masses d'eaux superficielles et souterraines au sein de la Communauté Européenne à l'horizon 2015.

b) La transposition en droit français et les institutions qui en découlent

En droit français, la loi n° 2004-338 du 21 avril 2004 est la transposition de la directive 2000/60/CE. Elle définit les objectifs de gestion, en qualité et quantité des eaux, que visent les SDAGE. Ces objectifs sont:

- Pour les masses d'eaux de surface, à l'exception des masses d'eau artificielles ou fortement modifiées par les activités humaines, un bon état écologique et chimique.
- Pour les masses d'eau artificielles ou fortement modifiées par les activités humaines un bon potentiel écologique et un bon état chimique.
- Pour les masses d'eaux souterraines, un bon état chimique et un équilibre entre le prélèvement et la capacité de renouvellement de chacune d'entre elles.
- La prévention de la détérioration de la qualité des eaux.
- Des exigences particulières afin de réduire le traitement nécessaire à la production d'eau destinée à la consommation humaine.

Le bassin versant de l'Arroux est un sous-bassin du bassin versant Loire-Bretagne : il est donc orienté par le SDAGE élaboré par le comité de bassin de Loire-Bretagne. La Commission Locale de l'Eau (CLE) est la commission en charge d'élaborer et de mettre en oeuvre le SAGE au niveau du bassin Arroux-Bourbince.

Enfin, le 30 décembre 2006 a été promulguée la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (LEMA) qui élargit les compétences et les moyens de protection définis par la loi n° 2004-338 du 21 avril 2004, des agences de l'eau et des communes.

3) Présentation du territoire étudié

Le bassin versant de l'Arroux présente une superficie d'environ 3166 km², il est situé en Bourgogne et se trouve à la limite de partage des eaux de trois bassins versants français : celui de la Seine au nord, celui du Rhône à l'est et celui de la Loire dont il fait partie. Si l'Arroux prend sa source en Côte d'Or, elle fait la majeure partie de son parcours dans le département de la Saône-et-Loire suivant une orientation du nord/nord-est vers le sud/sud-ouest, pour se jeter dans la Loire au niveau de Digoin. Son principal affluent est la Bourbince, en rive gauche, dont le bassin versant, qui se trouve entièrement en Saône-et-Loire, a une superficie d'environ 845 km². L'orientation principale de la Bourbince est, elle aussi, du nord/nord-est vers le sud/sud-ouest, avant d'obliquer plein ouest à quelques kilomètres de sa confluence avec l'Arroux, elle-même située à quelques kilomètres de la confluence de l'Arroux avec la Loire.

Le canal du centre relie le bassin de la Loire à celui du Rhône et son tracé suit le cours de la Bourbince.

a) Eléments de décision pour le choix du périmètre

Ce mémoire est construit en deux parties. La première est l'étude hydrologique du bassin versant de l'Arroux, pour laquelle le territoire étudié sera celui défini par le SAGE Arroux-Bourbince, correspondant exactement au bassin hydrologique.

La seconde partie relative à l'hydrogéologie sera effectuée sur un territoire plus restreint que nous définissons en excluant la partie nord du bassin versant.

En effet, cette partie nord du bassin appartient essentiellement au massif du Morvan, dont une particularité par rapport au reste du bassin est d'être abondamment arrosé et dont l'étude géologique se rapprocherait de celle des granites de Luzy que l'on développera plus loin.

Nous excluons également du domaine de l'étude hydrogéologique la masse d'eau souterraine du bassin Stéphano-Permien de l'Autunois qui se trouve légèrement au

nord de la commune d'Autun et qui s'étend d'est en ouest. Cette masse d'eau souterraine sera à rapprocher de celle du bassin du Stéphano-Permien de Blanzay dont on développera l'étude plus loin.

Du point de vue socio-économique, il ressort, comme c'est souvent le cas du fait de la plus forte abondance de la ressource en eau lorsque l'on s'approche de l'exutoire du bassin versant, que le tissu économique est surtout développé sur la partie aval du bassin versant. Toutefois, la richesse minière du sous-sol a favorisé le développement démographique de certaines villes dépourvues de grandes richesses hydriques, Montceau-les-Mines, Le Creusot, Autun en sont des exemples.

b) Présentation des cartes du périmètre de l'étude

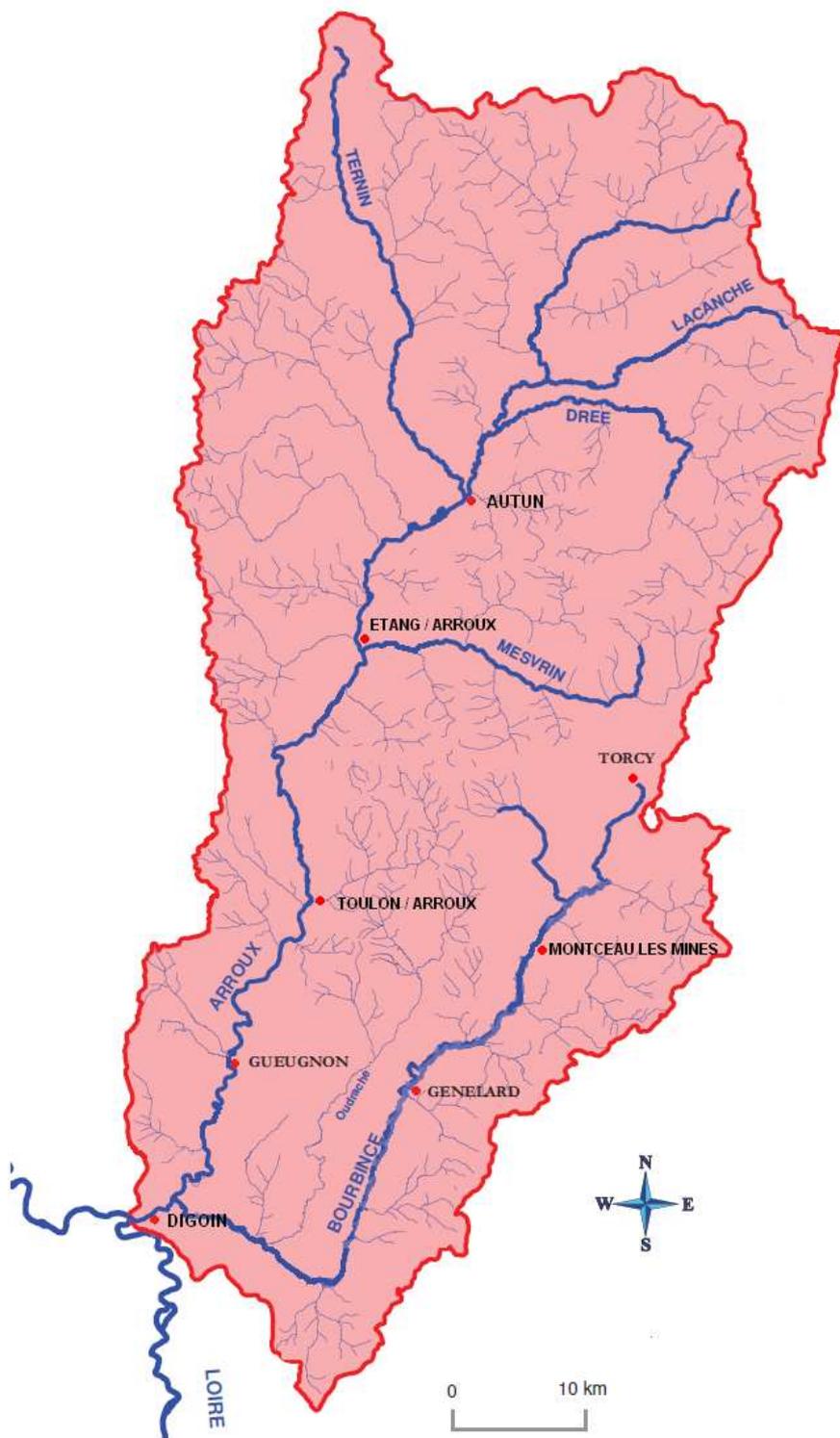
Le bassin versant de l'Arroux, en vert sur la figure 1, se situe à l'extrême est du grand bassin versant Loire-Bretagne, auquel il appartient. De par sa position sur le territoire, il est soumis à un climat tempéré à légère tendance continentale.



(Source : site Gest'eau -BD Carthage)

Figure 1. Localisation géographique

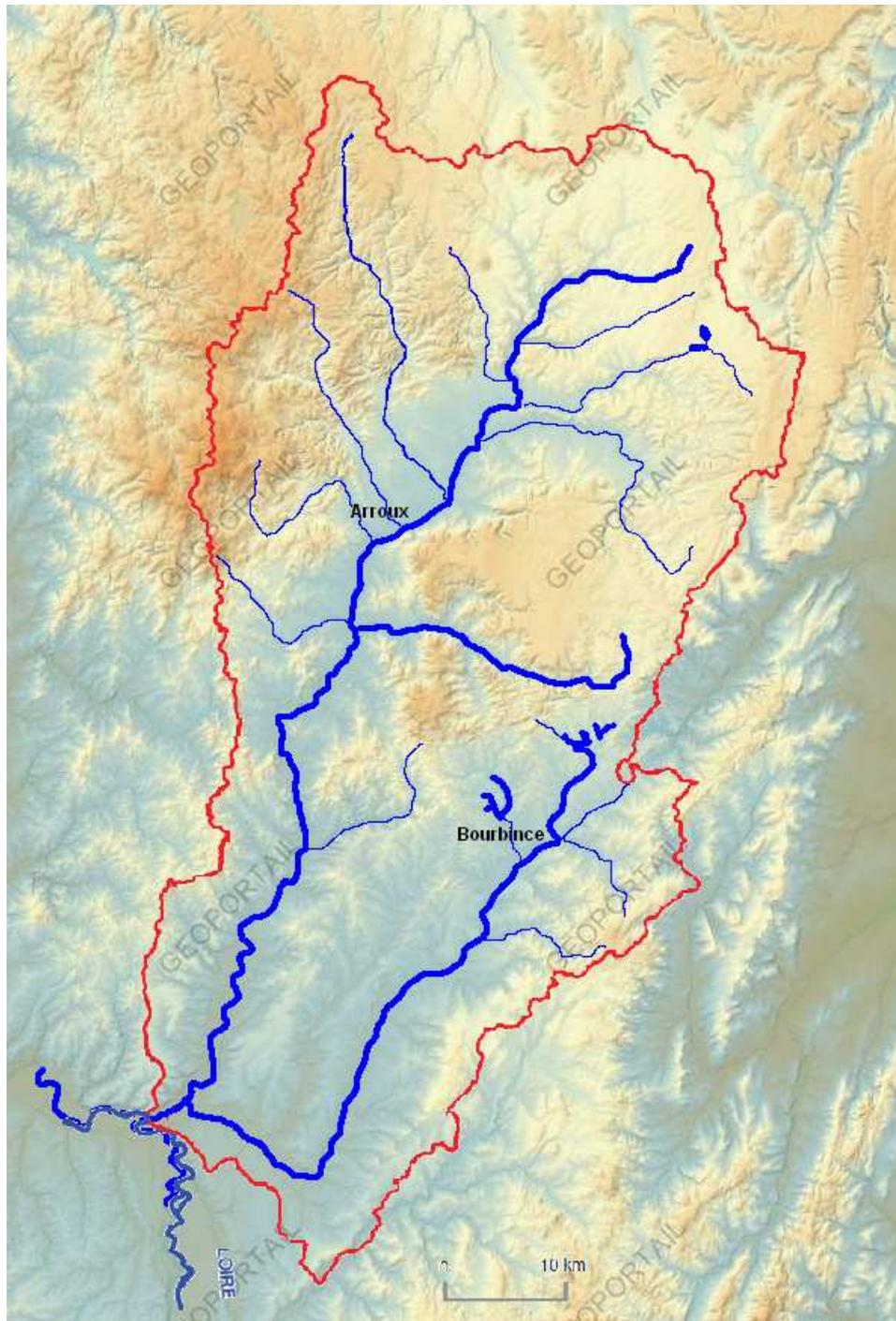
La figure 2 présente le bassin versant de l'Arroux, avec ses principaux affluents.



(Source : Dossier préliminaire SAGE Arroux Bourbince)

Figure 2. Réseau hydrographique du bassin versant

Sur la figure 3, on a fait ressortir les deux principales rivières du bassin versant que sont l'Arroux et la Bourbince sur un fond de carte représentant la topographie du bassin versant. On remarque le contraste de relief entre l'amont du bassin versant (caractérisé par le massif du Morvan et des sommets à plus de 800 mètres d'altitude) et l'aval beaucoup moins vallonné.



(Fond de carte : <http://www.geoportail.fr>)

Figure 3. Relief du bassin versant

II) HYDROLOGIE DU TERRITOIRE D'ETUDE

1) Le cycle de l'eau

Sous l'effet du rayonnement solaire, l'eau des océans et des surfaces terrestres passe en phase gazeuse et s'élève dans l'atmosphère où elle se condense sous forme de gouttelettes. Elle retombe sur les océans et sur les continents sous forme de précipitations liquides ou neigeuses. Une partie des précipitations peut être interceptée par le couvert végétal et rejoindre l'atmosphère par évaporation et transpiration. L'autre partie des précipitations s'infiltré dans le sol pour rejoindre les nappes d'eau souterraines, ou ruisselle sur le sol pour former les cours d'eau et réserves d'eau de surface.

L'évaporation des eaux de surface et la transpiration des végétaux sont regroupées sous le terme d'évapotranspiration. Parmi les eaux de surface, les principales retenues d'eau sur le bassin versant, pouvant favoriser l'évaporation, constituent une surface totale d'environ 650 ha. Les deux principales sont la retenue de la Somme avec 230 ha et la retenue de Torcy Neuf avec 159 ha. Ces deux retenues appartiennent au sous-bassin de la Bourbince.

Sur une portion de territoire déterminée, le bassin versant de l'Arroux dans notre cas, et pour une période donnée relativement longue, on a l'égalité suivante:

$$P = Q + ET + \Delta R \quad (1)$$

Avec, pour la période de référence et pour l'ensemble du bassin versant, P les précipitations tombées, Q la quantité d'eau écoulee à l'exutoire, ET l'évapotranspiration totale réelle estimée et ΔR la variation des réserves d'eau de surface et souterraines entre le début et la fin de la période observée. Afin de rendre négligeable ce terme ΔR , il est intéressant de choisir comme période un cycle pluriannuel.

2) Bilan hydrologique du territoire étudié

a) Définitions

Les caractéristiques physiographiques du bassin versant influencent la réponse hydrologique, notamment le régime des écoulements en période de crue et d'étiage, ainsi que sa capacité d'infiltration.

- Caractéristiques géométriques

La surface du bassin versant est l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau : les débits sont donc reliés à sa superficie. Plus un bassin versant sera vaste et plus les quantités récoltées seront importantes. Celui de l'Arroux a une superficie d'environ 3166 km², ce qui en fait un bassin relativement important pour la France.

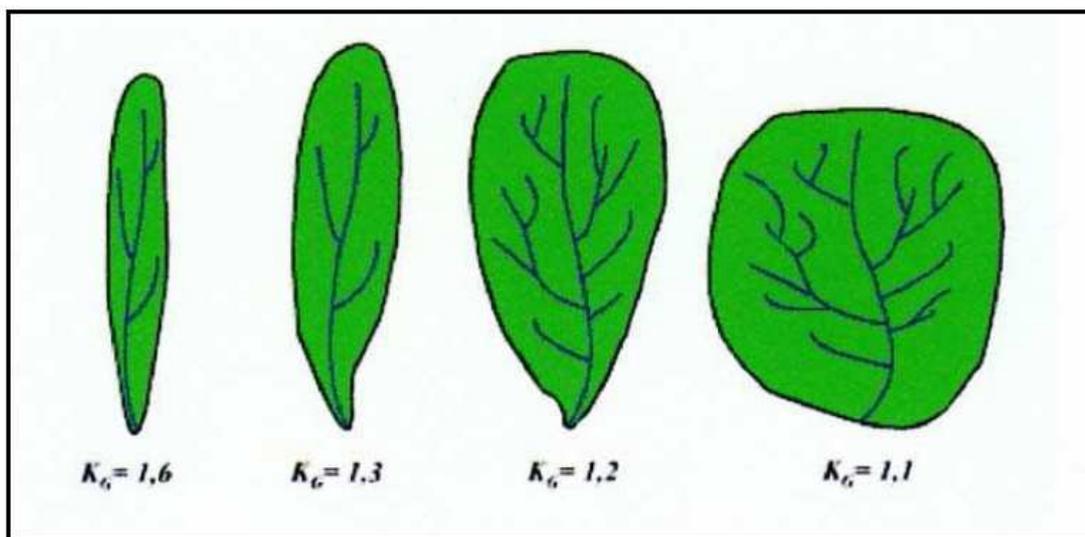
La forme du bassin versant joue un rôle dans la réponse hydrologique à la sollicitation qu'est une averse, mesurée par la quantité d'eau qui s'écoule à l'exutoire au cours du temps. La représentation graphique de l'évolution du débit Q en fonction du temps est

l'hydrogramme de crue. Par exemple, une forme allongée favorise un faible débit de pointe de crue à l'exutoire du fait de l'étalement du ruissellement et de l'acheminement à l'exutoire. On parle de temps de concentration pour définir la durée nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le plus long chemin hydrologique entre un point du bassin et son exutoire. A l'inverse, les bassins ayant une forme d'éventail auront les plus forts débits de pointe par effet de cumul, du fait que les chemins hydrologiques sont de longueurs semblables sur l'ensemble du bassin. L'indice de compacité de Gravelius (K_G) permet de caractériser un bassin : il est défini comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même aire. Plus ce coefficient est proche de 1, plus la forme du bassin est circulaire. A l'inverse, plus l'indice est proche de 2, plus la forme est allongée.

$$K_G = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot A}} \approx 0,28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (2)$$

avec A : aire du bassin versant en km^2 , soit 3166 km^2 .
 P : périmètre du bassin en km, soit 280 km environ.

On obtient un coefficient de Gravelius de **1,4** pour le bassin versant de l'Arroux qui confirme une forme plutôt allongée du bassin (figure 4) comme le montrait la carte (figures 2 et 3). On devrait donc avoir des hydrogrammes relativement étalés.



(Source : <http://hydram.epfl.ch/e-drologie>, André Musy)

Figure 4. Exemple d'indices de compacité

Le relief influence également l'hydrologie. L'altitude joue un rôle dans le régime pluviométrique : l'amont du bassin versant se situe dans le massif du Morvan qui culmine à 902 m au Haut-Folin, à proximité duquel on relève des précipitations plus abondantes que sur le reste du territoire avec une moyenne annuelle maximale de l'ordre de 1500 mm (à la station pluviométrique de Saint-Prix). La pente importante du réseau hydrographique en amont du bassin, associée à des fortes précipitations d'origine océanique vient contrecarrer les effets de l'allongement du bassin versant exprimé par le coefficient de Gravelius. La pente augmente la vitesse d'écoulement, réduit la capacité d'infiltration des sols en favorisant le ruissellement, écourte le temps

de concentration de cette partie du territoire et favorise des pointes de crue plus élevées que ce à quoi l'on s'attendrait d'après le coefficient K_G .

- le réseau hydrographique

Il est défini par l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement. Afin de définir la structure du réseau hydrographique, on utilise la classification de Strahler qui se base sur les règles suivantes d'amont en aval :

- tout cours d'eau dépourvu de tributaire est d'ordre un ;
- le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau d'ordre différent prend l'ordre du plus élevé des deux ;
- le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau de même ordre est augmenté de un.

En appliquant ce principe de classification au bassin versant de l'Arroux, on trouve un ordre de 5 à l'exutoire. Par définition, le bassin versant a le même ordre que le plus élevé de ses cours d'eau. Cette classification nous permet de définir le réseau du bassin versant de l'Arroux comme un réseau arborescent dendritique simple.

La pente moyenne de l'Arroux détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin. Cette variable influence donc le débit maximal observé, une pente abrupte favorise et accélère l'écoulement superficiel, tandis qu'une pente douce donne à l'eau le temps de s'infiltrer. Le calcul de la pente moyenne s'effectue par la relation suivante :

$$P_{moy} = \frac{\Delta H_{max}}{L} \quad (3)$$

avec : P_{moy} = Pente moyenne.

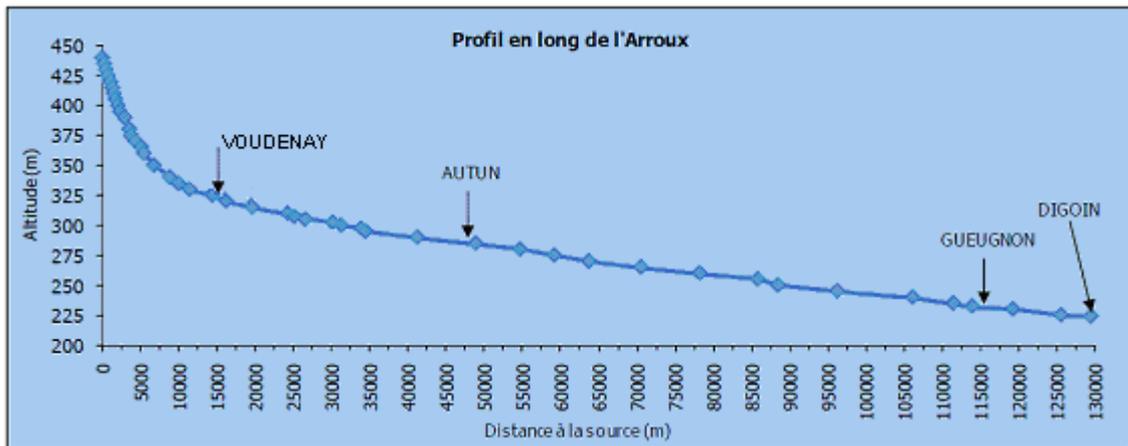
ΔH_{max} = Dénivellation maximale (en mètre) entre la source (420 m à Culètre et l'exutoire, 222 m à Digoin).

L = Longueur totale curviligne de l'Arroux entre la source et l'exutoire, soit environ 137 km.

Ce qui donne : $P_{moy} = (420 - 222) / 137 = 1,45 \text{ m/km}$

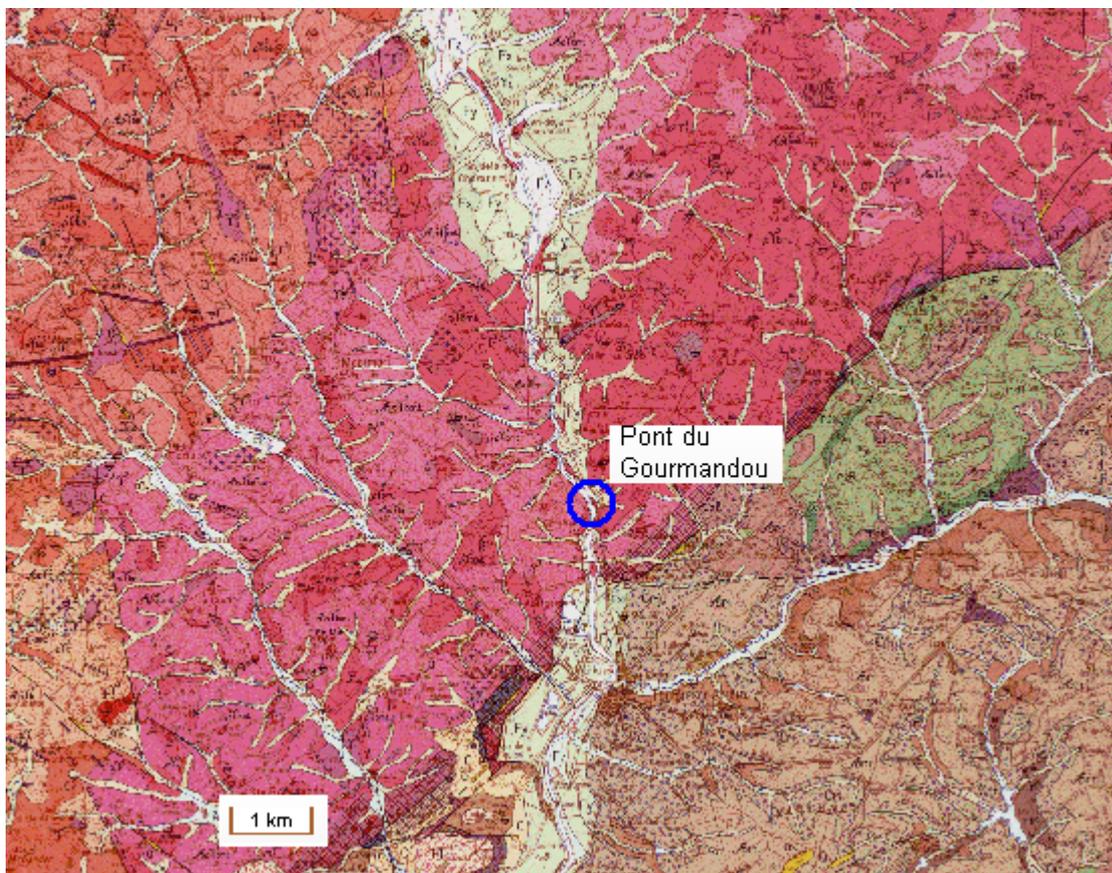
La pente moyenne de l'Arroux est de 1,45 mètre par kilomètre, soit 0,14 %.

Sur la figure 5 est représenté le profil en long de l'Arroux : il apparaît une certaine hétérogénéité entre l'amont et l'aval du cours d'eau.



(Source : Schéma Départemental de vocation piscicole de Saône et Loire)
Figure 5. Profil en long de l'Arroux

On note un petit décrochement aux environs du kilomètre 87 qui correspond à un rétrécissement de la vallée, encaissée dans le massif granitique (figure 6), avec un écoulement qui se limite seulement au cours d'eau (absence de nappe alluviale à cet endroit). Cet effet goulot implique une hausse du niveau de la rivière à l'amont et une baisse à l'aval quand le lit mineur s'élargit et que les alluvions peuvent à nouveau décharger une partie de l'eau de l'Arroux dans la nappe alluviale. D'après les informations recueillies auprès de la fédération de la pêche, ce phénomène se situerait à environ quatre kilomètres en amont de la commune de Toulon-sur-Aroux, au niveau du pont du Gourmandou.



(Source : <http://infoterre.brgm.fr/>)
Figure 6. Carte géologique au niveau de Toulon-sur-Aroux

On peut calculer la pente moyenne en amont de la ville d'Autun et en aval de cette même ville afin d'affiner l'analyse. La ville d'Autun se situe à environ 47 km de la source de l'Arroux, laquelle a une altitude d'environ 280 m à ce niveau. On a donc :

$$P_{\text{moy amont}} = (420 - 280) / 47 = 3 \text{ m/km soit } 0,3 \text{ \%}$$

Cette pente est associée au parcours de l'Arroux au sein du massif du Morvan. On peut noter que l'Arroux est en phase érosive sur cette partie du bassin versant.

$$P_{\text{moy aval}} = (280 - 222) / (137 - 47) = 0,63 \text{ m/km soit } 0,06 \text{ \%}$$

Cette faible pente est associée à la plaine qui constitue l'essentiel du parcours de l'Arroux en aval de la ville d'Autun. A ce niveau on parle plutôt de phase sédimentaire.

On remarque sur le profil en long que l'essentiel de la pente est concentrée dans les dix premiers kilomètres du parcours.

- Caractéristiques agro-pédo-géologiques

La couverture du sol et sa nature ont une influence sur l'écoulement en surface.

La partie amont du bassin versant, à l'amont de la ville d'Autun, est caractérisée par le massif du Morvan avec une forte ruralité et une dominance de l'activité sylvicole. Toutefois, malgré cette forte présence de forêts, propice à ralentir les écoulements et le phénomène de battance du sol, il apparaît que la nature du sous-sol, constitué pour l'essentiel de roches magmatiques du socle hercynien, est moins propice à l'infiltration et au stockage des eaux de pluie que les roches sédimentaires. Le ruissellement est prédominant.

Pour la partie aval du bassin versant, malgré la présence de quelques villes moyennes dont les principales sont Montceau-les-Mines, Le Creusot et Autun, la principale caractéristique du territoire est sa ruralité. L'élevage bovin (de race charolaise) est prédominant sur des terrains au faible relief constitués de prés et de haies sur des sols sédimentaires favorisant des écoulements lents et l'infiltration des eaux de pluies.

b) Les sources d'informations relatives au bilan hydrologique

Pour ce qui est des variations de stock, le site ADES (Accès aux Données sur les Eaux souterraines) regroupe des données qualitatives (qualitomètres) et quantitatives (piézomètres) des eaux souterraines. Au niveau du bassin versant de l'Arroux, il existe peu de piézomètres ayant des données sur la durée de la période choisie (2000-2009).

Les précipitations sont les données accessibles dans la rubrique climathèque du site internet de MétéoFrance qui regroupe un nombre relativement important de stations météo au niveau national. Pour le bassin versant de l'Arroux, il existe une vingtaine de stations à l'intérieur du territoire. Notons que ces informations sont payantes.

Enfin, un certain nombre de stations hydrologiques sont présentes sur le bassin versant : les données (mesures de hauteur d'eau et débits associés) sont accessibles sur le site internet HYDRO dépendant du MEEDDM, et sont relativement complètes et à jour. Sur le linéaire de l'Arroux, il existe 4 stations hydrologiques, dont une se trouve à Digoin, représentant l'exutoire du bassin versant. La Bourbince dispose de 3 stations.

c) L'estimation du bilan hydrologique

Rappelons tout d'abord que, pour une période suffisamment longue, la pluie précipitée sur un bassin versant se décompose suivant la relation :

$$P = Q + ET + \Delta R \quad (1)$$

avec : P, la lame d'eau précipitée (exprimée en mm)
Q, la lame d'eau écoulée à l'exutoire (exprimée en mm)
ET, la lame d'eau évapotranspirée (exprimée en mm)
 ΔR , la variation des stocks (exprimée en mm).

Afin d'étudier le fonctionnement des systèmes hydrologiques, on effectue des mesures et des bilans, en quantifiant les entrées et les sorties d'eau afin d'évaluer les volumes d'eau circulant dans les différents réservoirs du cycle.

Les termes P et Q, représentant respectivement les précipitations et l'écoulement à l'exutoire font l'objet d'une approche quantitative satisfaisante, même si elle reste peu précise.

On définit la **pluie efficace (PE)** comme la pluie réellement disponible pour alimenter le ruissellement et l'infiltration. De cette définition, il ressort que le volume de pluie efficace est théoriquement égal au volume total d'eau écoulé à l'exutoire du bassin versant, d'où : $PE = Q$. L'infiltration n'apparaît pas directement mais est intégrée au terme Q qui inclut les écoulements souterrains.

Cependant, Q n'est pas facile à évaluer : une partie de l'eau circule en souterrain et peut être évacuée du système de façon occulte. Au niveau de la station hydrologique de Digoin (qui mesure le débit à l'exutoire du bassin versant de l'Arroux), la nappe alluviale draine une partie de l'eau souterraine au droit de la station hydrologique. Cette dernière fait une correspondance entre la hauteur de la rivière et un débit exprimé en mètre cube par seconde. L'incertitude sur la prise en compte de l'écoulement souterrain est levée après avoir interrogé, à ce sujet, la DIREN (DIRECTION Régionale de l'ENVironnement), producteur des données pour cette station : l'écoulement de la nappe alluviale au droit de la station n'est pas considéré dans les débits publiés.

On peut définir le débit d'une nappe comme le volume d'eau traversant une section transversale de l'aquifère en une unité de temps. Son calcul est délicat ; il faut connaître l'épaisseur de l'aquifère, sa largeur au droit de la station hydrologique et l'écartement des courbes isopiézométriques.

Une autre méthode pour définir le débit de la nappe est de mesurer la vitesse de l'écoulement souterrain. Pour cela, il faut expérimenter *in situ* avec la pose de piézomètres (avec une distance bien définie entre les deux), disposés dans le sens de l'écoulement souterrain. Il faut ensuite marquer l'eau sur le piézomètre amont et mesurer le temps pour que l'eau marquée parcoure la distance entre les deux piézomètres. Une fois cette vitesse définie, il suffit de faire le produit de cette vitesse par la section d'alluvion noyée pour obtenir le débit.

Suivant la vitesse d'écoulement, il sera opportun ou non de prendre en compte ce débit et de l'associer à celui de la rivière. A titre d'exemple, en considérant la largeur de la nappe alluviale égale à un kilomètre et la puissance à deux mètres (ce qui semble raisonnable dans le cas de la station hydrologique de Digoin), et si la vitesse d'écoulement est de l'ordre de 10^{-3} m/s, alors le débit de la nappe serait de $2 \text{ m}^3/\text{s}$ (soit

environ une lame de 20 mm écoulée en plus annuellement). En revanche, si la vitesse d'écoulement est de l'ordre de 10^{-5} m/s, alors le débit de la nappe serait négligeable par rapport à celui de la rivière.

Une autre difficulté importante est l'estimation de la variation de stock d'eau souterrain qui est la composante principale du ΔR (un autre de ses composants étant le stock d'eau de surface, les retenues par exemple). Afin de connaître la variation de stock d'eau souterraine, il est nécessaire de connaître les géométries des différents aquifères présents sur le bassin versant, les superficies et les puissances de chacun d'entre eux ainsi que leurs caractéristiques propres, l'homogénéité des aquifères, leur porosité, leur perméabilité, leur fracturation éventuelle, les caractéristiques hydrodynamiques, autant de paramètres difficile à estimer.

Ce bilan s'effectue sur un cycle annuel ou pluriannuel pour que les variations des réserves (ΔR) soient minimales, voire négligeable. Afin de rendre notre étude la plus représentative possible, nous choisissons la période : de 2000 à 2009.

Des différentes parties du cycle de l'eau, l'évapotranspiration (ET) est la plus délicate à évaluer du fait de la difficulté à mesurer le flux de vapeur d'eau dans l'atmosphère. L'évapotranspiration dépend de la température du sol, de l'air et de l'eau, de l'hygrométrie de l'air, de la quantité d'eau contenue dans le sol, du rayonnement solaire, du vent, de la pression atmosphérique, de la nature et l'état de la végétation, de la topographie et de l'exposition.

Diverses formules permettent d'évaluer l'évapotranspiration. Il convient de différencier :

- l'évapotranspiration potentielle (ETP), qui est définie comme l'ensemble des pertes en eau par évaporation et transpiration d'une surface de gazon de hauteur uniforme, couvrant totalement le terrain, en pleine période de croissance et abondamment pourvue en eau.
- l'évapotranspiration réelle, qui est la quantité d'eau réellement évaporée et qui dépend des conditions naturelles et de la quantité d'eau disponible dans le sol aussi appelé réserve utile (RU).

L'évapotranspiration potentielle (ETP) peut être évaluée à l'aide de nombreuses formules (Thornthwaite, Turc, Penman...) que nous ne détaillerons pas ici.

Comme l'évapotranspiration est le terme le plus délicat à évaluer dans le bilan, on va chercher à l'exprimer en fonction des autres termes, ce qui donne :

$$ETR = P - Q - \Delta R \quad (4)$$

En faisant l'hypothèse que la variation de stock est nulle sur la période étudiée, il résulte :

$$ETR = P - Q \quad (5)$$

Commençons par déterminer la moyenne annuelle de la lame d'eau précipitée sur le bassin versant de l'Arroux. Pour cela, nous utiliserons la méthode des polygones de Thiessen que nous appliquerons aux stations pluviométriques de Saint-Prix, Epinac, Toulon-sur-Arroux, Saint-Bonnet-de-Joux, La-Petite-Verrière et Saint-Yan, pour lesquelles nous avons les valeurs des précipitations mensuelles de 2000 à 2009 (obtenues auprès de MétéoFrance).

Cette méthode permet d'estimer des valeurs pondérées en prenant en considération chaque station pluviométrique. Elle affecte à chaque pluviomètre une zone d'influence dont l'aire, exprimée en pourcentage, représente le facteur de pondération de la valeur locale. Les différentes zones d'influence sont déterminées par découpage géométrique du bassin versant par planimétrie (cf. annexe 1). La précipitation moyenne pondérée P_{moy} pour le bassin se calcule alors en effectuant la somme des précipitations P_i de chaque station, multipliées par leur facteur de pondération (aire A_i), le tout divisé par la surface totale A du bassin. La précipitation moyenne sur le bassin s'écrit :

$$P_{moy} = \frac{\sum A_i \cdot P_i}{A} \quad (6)$$

Avec : P_{moy} : précipitation moyenne sur le bassin (en mm),
 A : aire totale du bassin ($= \sum A_i$),
 P_i : précipitation enregistrée à la station i (en mm),
 A_i : superficie du polygone associé à la station i .

Tableau 1. Calcul par la méthode des polygones de Thiessen

Poste pluviométrique	Nombre d'unités sur le Polygone de Thiessen (annexe 1)	Pourcentage de la superficie du bassin versant	Moyenne annuelle de pluviométrie sur la période 2000-2009 (en mm)	Lame d'eau précipitée à la station pondérée par le % de la superficie
Saint-Yan	916	8,71%	801,5	69,84
Saint-Prix	1320	12,56%	1533,6	192,58
Epinac	3035	28,87%	787,7	227,42
Toulon-sur-Arroux	1958	18,63%	872,8	162,57
La-Petite-Verrière	1776	16,89%	1106,3	186,91
Saint-Bonnet-de-Joux	1507	14,34%	943,1	135,20
TOTAL	10512	100,00%	Total du bassin versant (en mm)	974,52

La lame d'eau précipitée moyenne annuelle entre 2000 et 2009 établie par la méthode des polygones de Thiessen pour le bassin versant de l'Arroux est de **974,52 mm**.

Ce résultat semblant légèrement supérieur à ce que l'on peut trouver dans la littérature, nous nous sommes adressés à MétéoFrance pour obtenir la carte des isohyètes sur le territoire étudié (figure 7) ainsi que le fichier des données en point grille associé à la carte.

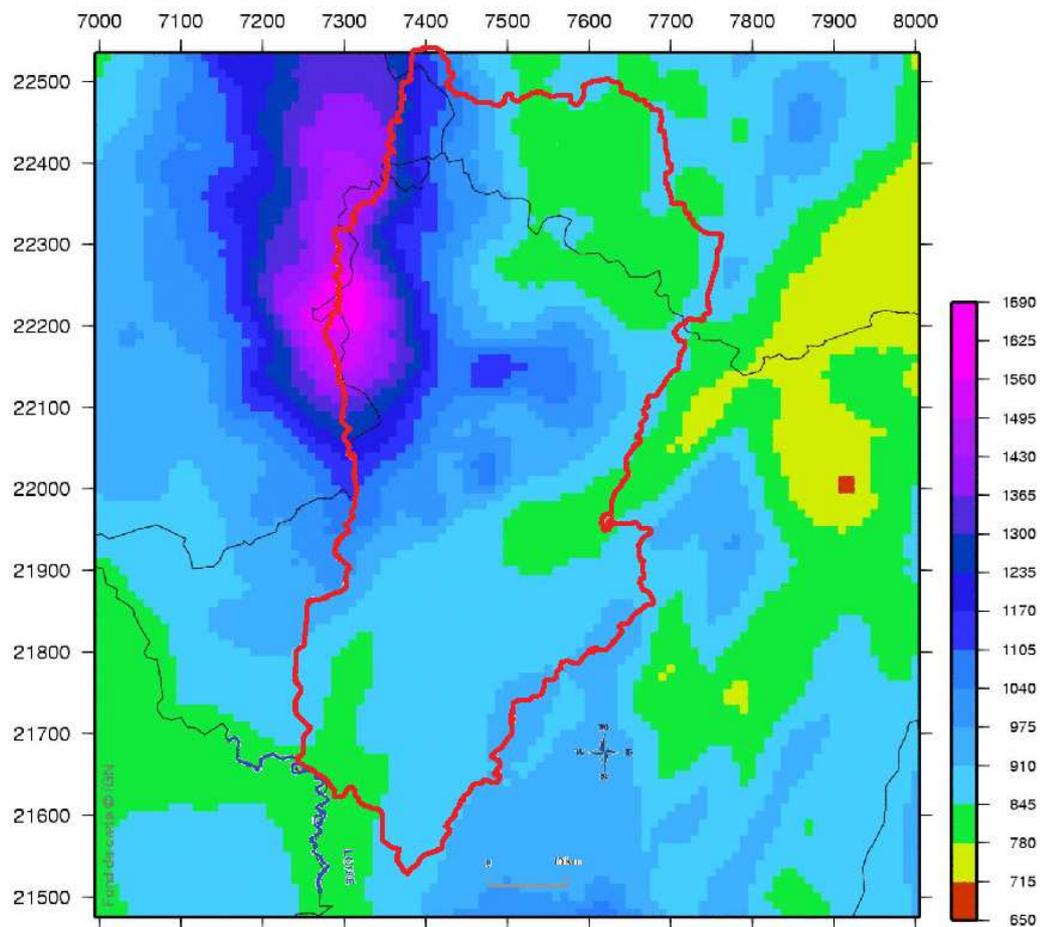
La définition de la carte est de 1500 x 1500 pixels : c'est le maximum que peut fournir MétéoFrance. Les données sont relatives à la période 2000-2009. Si la carte donne un aperçu intéressant de la répartition des précipitations sur le territoire, le calcul de la lame précipitée moyenne sur le bassin versant pour la période 2000-2009 ne peut se faire qu'à partir des données du fichier point grille associé à cette carte.

Après une première transformation du fichier file.data initial en fichier Excel, il a été nécessaire de faire un tri dans les données pour ne garder que les points grille représentant le bassin versant. Après ce travail de sélection, la moyenne des précipitations a été calculée sur la base des 3151 points grille du bassin versant.

Chaque point grille correspondant à une superficie de 1 km², il aurait fallu obtenir 3166 points pour avoir une représentation parfaite. L'erreur commise est donc seulement de 0,5%, on la négligera par la suite. La lame d'eau précipitée moyenne annuelle entre 2000 et 2009 établie par moyenne arithmétique de cet ensemble de données est de **957,29 mm**.

On retiendra par la suite cette dernière valeur légèrement inférieure à celle calculée par la méthode des polygones de Thiessen. On peut toutefois noter la relativement bonne précision de la méthode de Thiessen.

Calculons à présent la lame d'eau écoulee annuellement en moyenne à l'exutoire. Pour cela, nous avons réuni les débits mensuels à la station hydrologique de Digoin (exutoire du bassin versant) sur la période 2000-2009 (cf. annexe 2). Certaines données étant manquantes, afin de compléter le tableau, une extrapolation a été faite à partir des deux stations hydrologiques précédentes, une sur l'Arroux (à Rigny-sur-Arroux) et la seconde sur la Bourbince (à Vitry-en-Charollais). Pour les 3 stations considérées, nous disposons de données complètes pour 6 des 10 années de la période, les 4 autres années présentant des lacunes. Nous avons donc effectué une extrapolation linéaire en fonction des saisons où les lacunes sont présentes. Ces valeurs extrapolées sont notées en rouge dans le tableau de l'annexe 2. On trouve ainsi une moyenne annuelle de la lame d'eau écoulee à la station hydrologique de Digoin (exutoire du bassin versant de l'Arroux) de **304,65 mm**.



(Source : MétéoFrance)

Figure 7. Carte des isohyètes du bassin versant de l'Arroux pour la période 2000-2009

De fait, en supposant que la variation de stock des réserves souterraines est négligeable sur l'intervalle de temps considéré (2000-2009), il ressort une lame d'eau évapotranspirée de :

$$ETR = P - Q$$

$$ETR = 957,29 - 304,65 = \mathbf{652,64 \text{ mm}}, \text{ soit plus de } \mathbf{68\%} \text{ de la lame d'eau précipitée.}$$

Peu d'informations sont publiées concernant des valeurs d'évapotranspiration réelle en Bourgogne, il est donc difficile de comparer cette valeur de 68% à des valeurs expérimentales connues. Toutefois, la valeur obtenue semblant, à priori, légèrement excessive, nous allons la comparer aux résultats des formules empiriques.

L'ETR, tel que nous l'avons définie, peut être rapprochée de la définition du **déficit d'écoulement** qui est égal à la différence entre le volume d'eau entrant dans le bassin versant et le volume d'eau sortant. Turc a établi une relation entre la lame d'eau précipitée sur un bassin versant, la température moyenne de ce bassin et le déficit d'écoulement :

$$D = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (7)$$

Avec D : Déficit d'écoulement (en mm),
P : Lamme d'eau précipitée moyenne annuelle (en mm),
T : Température moyenne annuelle (°C),
 $L = 300 + 25 T + 0,05 T^3$

Avec P égal à 957,29 mm et T égal à 10,8 °C (d'après MétéoFrance, en Saône-et-Loire), on trouve un déficit d'écoulement de **536,21 mm** (soit **56%** de la lame précipitée moyenne annuelle), à comparer à **68%** (652,64 mm) obtenu par le bilan hydrique.

La formule de Coutagne est une autre méthode pour calculer le déficit d'écoulement, elle s'exprime par la relation suivante :

$$D = P - m.P^2 \quad (8)$$

Avec : D : Déficit d'écoulement (en m),
P : Lamme précipitée moyenne annuelle (en m),
T : Température moyenne annuelle (°C),
m : Coefficient régional = $1 / (0,8 + 0,16.T)$.

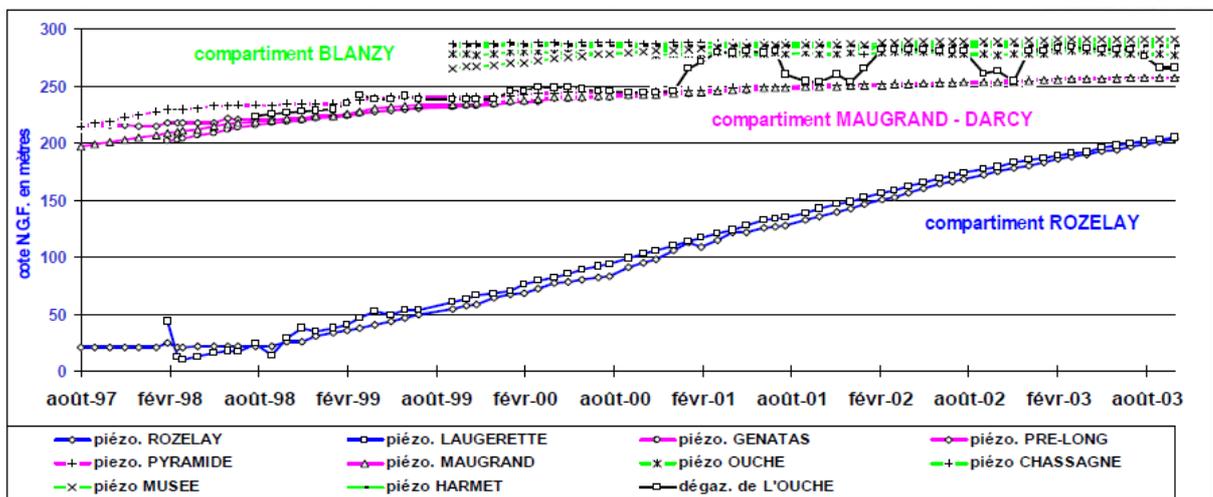
Avec T égal à 10,8°C, on trouve $m = 0,40$, et avec P égal à 0,957 mètre, on trouve un déficit d'écoulement de **591 mm** (soit **62%** de la lame précipitée moyenne annuelle).

En résumé, le résultat obtenu par la formule de Coutagne est plus proche de ce que l'on a obtenu par le calcul « direct » que le résultat de la formule de Turc. Au vu de ces résultats, on peut dire que le résultat du calcul du déficit d'écoulement sur le bassin versant est très légèrement supérieur aux résultats empiriques. Ceci peut s'expliquer par plusieurs points.

D'abord, n'ayant pas eu les erreurs de mesures associées aux données de MétéoFrance et de la DIREN, celles-ci ont été négligées lors des calculs de lame d'eau précipitée et de lame d'eau écoulée à l'exutoire. De plus, comme nous l'avons déjà signalé, il y a

une incertitude concernant l'estimation du débit à l'exutoire, car on ne connaît pas la valeur du débit de la nappe au droit de la station hydrologique. Le tableau des valeurs des débits mensuels (cf. annexe 2) a été complété par extrapolation, d'où une possibilité supplémentaire d'erreur. Cette valeur de lame écoulee peut donc être sous-estimée et par conséquent le déficit d'écoulement surestimé.

Des pertes occultes peuvent également exister au sein du bassin versant. Le long du tracé de la Bourbince, certains calcaires sont à l'affleurement avec des pertes qui sont répertoriées sur le site internet du BRGM, dans la rubrique Infoterre (exemple de la Perte des Gouttes située à Saint-Vincent-Bragny mais dont aucune information n'est donnée sur les résurgences connues ou possibles). D'autre part, l'arrêt des travaux miniers du bassin houiller de Blanzay – Montceau, a entraîné une remontée de la nappe dans les différents compartiments exploités. Une étude réalisée par Yves Paquette pour le compte d'INERIS, a montré que dans les compartiments de Rozelay et de Laugerette, les niveaux piézométriques continuaient d'augmenter de manière significative entre 2000 et 2003 (période comprise dans la période choisie pour notre étude). La figure 8 montre l'évolution des différentes nappes au sein du bassin houiller sur la période 1997 – 2003.



(Source : INERIS, Méthodologie pour la réalisation des dossiers d'arrêt définitif de travaux miniers, Yves Paquette)

Figure 8. Piézométrie des différents compartiments du bassin houiller

Tous ces points sont autant d'éléments qui permettent d'expliquer éventuellement la part légèrement excessive du déficit d'écoulement dans le bilan hydrique.

En conclusion, on peut dire que la valeur de l'évapotranspiration réelle du bassin versant est certainement inférieure au déficit d'écoulement calculé, du fait des probables pertes occultes au niveau du bassin. En outre, une étude hydrologique partitionnant le bassin versant en plusieurs sous-bassins permettrait d'évaluer plus précisément l'évapotranspiration et le déficit d'écoulement. L'hypothèse faite sur la nullité des variations de stocks au sein du bassin versant peut également être une source d'erreur.

Afin de rendre l'étude la plus précise possible, il serait nécessaire de choisir une période débutant après la fin de la remontée de toutes les nappes du bassin houiller. Pour cela, il faudrait avoir connaissance du suivi de la piézométrie complète.

Concernant les pertes occultes, une étude complète sur le bassin versant serait nécessaire pour répertorier chaque perte et effectuer des traçages pour connaître les

points de résurgences (ceci particulièrement pour les terrains karstiques du sud-est du bassin versant).

Enfin pour la prise en compte des erreurs, elle serait principalement intéressante pour relativiser les valeurs trouvées.

3) Les prélèvements effectués au sein du bassin versant

Les prélèvements effectués peuvent être différenciés suivant quatre secteurs, d'abord, ceux relatifs à l'alimentation en eau potable, ensuite les prélèvements industriels et agricoles, les prélèvements effectués par les particuliers pour un usage domestique et enfin, les prélèvements pour l'alimentation en eau du canal du centre.

Les prélèvements effectués sur les réserves peuvent être remises dans le cycle après utilisation (par exemple un prélèvement pour un usage industriel ne sera pas totalement utilisé et sera réinjecté en rivière). Il est donc important de connaître non seulement les quantités prélevées, mais également les quantités rejetées après utilisation afin de ne pas comptabiliser deux fois les mêmes volumes au cours du cycle de l'eau au sein du bassin versant.

a) Les prélèvements pour l'adduction en eau potable (AEP)

Ces prélèvements sont les plus connus, ils dépendent de syndicats intercommunaux ou directement des communes, lorsque celles-ci sont peu peuplées.

On peut noter que, pour un certain nombre de communes du sud du bassin versant de l'Arroux, les prélèvements s'effectuent par le biais de champs captants dans les nappes alluviales de l'Arroux et de la Bourbince. Ces champs captants sont situés à l'amont des villes concernées afin d'éviter de pomper les eaux rejetées par ces villes. Ils sont constitués de puits de faible profondeur, moins de dix mètres en général, du fait de la proximité des nappes alluviales par rapport au sol. A titre d'exemple, le champ captant de Vendennes-sur-Arroux, commune du sud du bassin versant, rassemble des puits ayant des débits spécifiques de 15 à 90 m³/h/m, ce qui permet l'alimentation en eau potable d'une douzaine de communes. Le syndicat de Palignes exploite un champ captant dans la nappe alluviale de la Bourbince qui prélève 1200 m³/jour pour fournir à la population la totalité de ses besoins. Le syndicat intercommunal Arroux-Braconnne approvisionne 1300 m³/jour au secteur d'Etang-sur-Arroux par le pompage de trois puits situés dans la nappe alluviale de l'Arroux.

Autun, qui est la principale ville de la vallée de l'Arroux, est alimentée par des prélèvements effectués sur les étangs successifs de Paillard, la Toison, et Cloix (prenant leurs sources dans le massif cristallin sur les hauteurs du plateau d'Antully surplombant la ville d'Autun). En plus de cet approvisionnement qui assure 20 à 80% des besoins de l'agglomération, la ville effectue des pompages dans la retenue de Pont-du-Roi pour compléter les besoins et revend une partie de cette production à des communes environnantes. La consommation autunoise totale revient à 4000 m³/jour. A l'horizon 2011, la production de l'eau potable appartiendra au syndicat SMEMAC. Nombreuses sont les petites communes qui s'alimentent par le captage de sources dans le nord de la vallée de l'Arroux, citons Mesvres avec un débit de 100 m³/jour par quatre sources, La Chapelle-sous-Uchon avec 145 m³/jour grâce à deux sources ou encore La-Grande-Verrière avec 40 m³/jour obtenu par une seule source. Tous ces prélèvements par sources sont issus des massifs cristallins.

D'après les données fournies par le site de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne (cf. annexe 3), et en supposant que la liste soit exhaustive, on obtient un volume moyen annuel prélevé au sein du bassin versant de l'Arroux de : **17 millions de m³**. Cette moyenne annuelle est calculée sur la période 1999-2007. Au vu de ces données, la tendance est à la baisse depuis 2001.

b) Les prélèvements industriels et agricoles

Qu'ils soient agricoles ou industriels, les prélèvements d'eau se font presque exclusivement dans les réserves superficielles, dans les nappes alluviales, directement dans les cours d'eau ou dans les retenues.

Les prélèvements pour le secteur agricole sont peu nombreux du fait, d'une part, d'une ruralité plus tournée vers l'élevage que vers l'agriculture, et d'autre part, d'une possible clandestinité des prélèvements agricoles comme ceci a été largement reconnu par le passé. Le besoin d'irrigation est donc moins élevé que dans d'autres régions de France. D'après les données recueillies sur le site de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, on a pour la période 1999-2008 un volume annuel moyen de prélèvements de **34 000 m³** (cf. annexe 4). Cette consommation est très variable en fonction des années, en effet, pour la seule année 2003, la consommation annuelle était de **107 000 m³**, soit près de trois fois plus que la consommation moyenne annuelle. Logiquement, plus l'année est sèche et plus les prélèvements agricoles sont importants, ce qui est aggravant pour la réserve en eau globale d'un bassin versant. Toutefois, le faible développement de l'agriculture et de l'irrigation dans la région implique un faible impact sur la réserve en eau, même lors des années sèches.

D'après les données fournies par l'Agence de l'eau Loire-Bretagne (cf. annexe 5a), il ressort que sur la période 1998-2008, la moyenne annuelle des prélèvements industriels pour l'ensemble du bassin versant est de l'ordre de **8,5 millions de m³**. Toutefois, on peut constater une décroissance notable du volume de ces prélèvements entre 2000 et 2008. La tendance actuelle serait donc à des prélèvements inférieurs à cette moyenne. Le volume prélevé pour l'année 2008 est d'environ **5 millions de m³**. Une étude effectuée en 2002 par Panistat France pour le compte du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable montre que pour la plupart des industries, l'eau étant un facteur de production, elle est présente tout au long de la chaîne de transformation des produits, elle est également employée pour le nettoyage des ateliers, des machines et des produits finis. Elle implique des prélèvements très importants mais en restitue l'essentiel pour ne représenter qu'un faible pourcentage de la consommation nette.

Le graphique suivant présente l'évolution des prélèvements industriels sur le bassin versant entre 1998 et 2008, hors usine d'électricité de Montceau-les-Mines (Lucy), qui à elle seule prélève environ 3,7 millions de m³ par an.

Evolution des prélèvements industriels 1998-2008

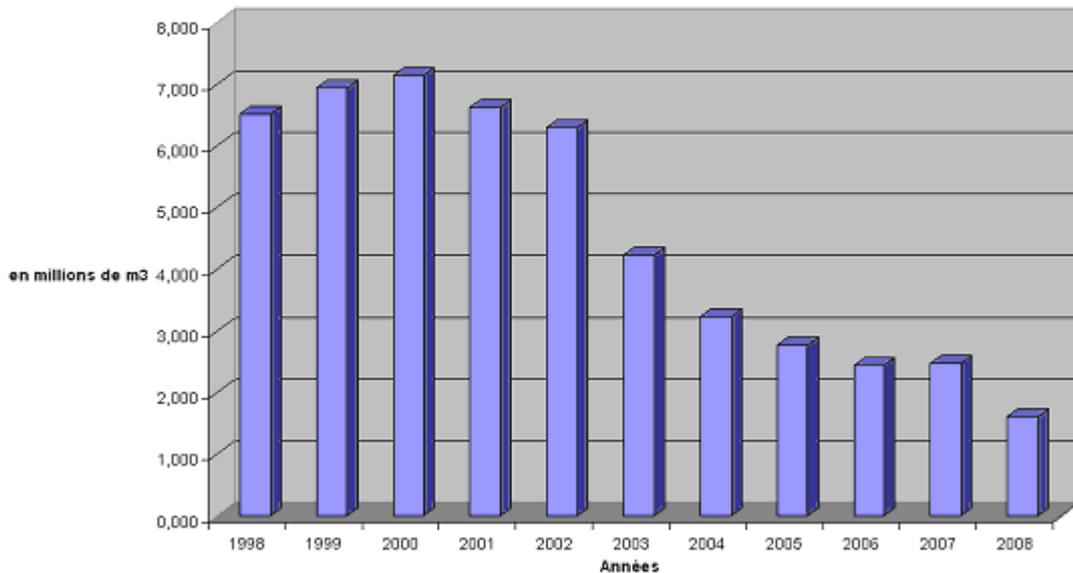


Figure 9. Evolution des prélèvements industriels entre 1998 et 2008

De prime abord, on pourrait penser que la baisse des prélèvements est liée à une baisse de l'activité industrielle de la région. Après obtention des chiffres de l'emploi salarié de l'Insee que l'on relie à l'activité sur le territoire étudié (cf. annexe 5b), il ressort que l'évolution des prélèvements industriels suit la tendance de l'activité industrielle (du salariat industriel). Toutefois, si la tendance est comparable, les vitesses de progression sont très différentes (les prélèvements baissent de 65% entre 2000 et 2007, alors que l'emploi industriel ne baisse « que » de 15% sur la même période).

Après avoir interrogé ArcelorMittal (principal consommateur du bassin versant, situé à Gueugnon) sur la baisse de leur consommation en eau brute, il vient que cette réduction émane d'une volonté propre de l'entreprise pour une meilleure gestion de leur consommation. A partir de 2000, la consommation de l'entreprise était alors de plus de 6 millions de m³, la politique a été de réduire la consommation par des mises en circuit fermé. A partir de 2004, la politique s'est tournée vers la sensibilisation des salariés à économiser l'eau. La consommation brute actuelle s'est stabilisée à 1 million de m³ par an.

Il est difficile de connaître les quantités rejetées après utilisation : si les industriels sont tenus d'équiper leurs prises d'eau de compteurs volumétriques pour payer leurs redevances, en revanche, pour ce qui est des rejets, il n'y a pas de réglementation concernant les volumes.

Au-delà de la quantité rejetée, c'est la qualité des eaux après utilisation qui doit être surveillée. La dégradation de la ressource est effective après usage et il est nécessaire de contrôler cette pollution et de la rendre acceptable.

La centrale électrique Lucy de Montceau-les-Mines, qui prélève son eau brute dans le canal du centre, rejette, après utilisation, une eau avec une température plus élevée dans ce canal. La partie consommée par évaporation est complétée par de l'eau prélevée dans la Bourbinche. L'augmentation de la température augmente l'évaporation du canal et a un impact sur la biomasse à l'aval de ce rejet.

c) Les prélèvements des particuliers

A ces deux premiers types de prélèvements viennent s'ajouter ceux effectués par les particuliers par le biais de puits individuels. Même si ces prélèvements peuvent sembler négligeables au premier abord, il paraît évident que le cumul de toutes ces ponctions individuelles a un impact sur les réserves d'eaux souterraines au niveau du bassin versant.

La législation impose aux particuliers créant un puits de faire une déclaration à la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement, et du Logement, la DREAL (anciennement nommée la DRIRE), ou auprès de leur commune. Toutefois, peu de gens effectuent ces démarches.

Une étude relative au développement des forages individuels, menée conjointement par le BRGM et le Cemagref a été présentée au salon HYDROTOP en 2003. Il ressort de cette étude, réalisée sur la commune de Canet dans la vallée de l'Hérault, que suite à la hausse du prix de l'eau potable, on note une baisse de la consommation sur le secteur étudié. Une enquête de terrain réalisée auprès de foreurs et auprès des ménages directement semble montrer que si cette baisse est parfois due à une restriction réelle de la consommation d'eau par certains ménages, il semble que la consommation réelle totale n'ait pas diminué, voire, ait augmenté en substituant à l'eau potable du réseau public l'eau de pompage de puits individuels. Ceci particulièrement quand l'eau souterraine est facilement captable du fait de la proximité de la nappe avec le sol. C'est le cas sur les nappes alluviales de l'Arroux et de la Bourbince et les conclusions de l'étude en Hérault sont peut-être valables ici.

La récupération d'eau de pluie s'est elle aussi développée durant cette dernière décennie. Elle est, au même titre que les forages, considérée comme une consommation alternative à l'eau potable du réseau public.

D'après les chiffres de l'INSEE, la démographie est stable entre 1999 et 2009 sur l'ensemble du département de la Saône et Loire. De ce fait, on fait l'hypothèse que la consommation totale d'eau est stable durant cette période sur le bassin versant. La consommation déclarée connue en 2001, année à partir de laquelle la consommation déclarée a commencé à décroître du fait du développement des prélèvements alternatifs, était de 20 millions de m³ sur le bassin versant. On peut donc faire l'hypothèse que la consommation totale est restée stable à ce niveau sur l'ensemble de la décennie. Ayant calculé une consommation moyenne annuelle de 17 millions de m³ on peut faire l'hypothèse que la consommation moyenne annuelle des prélèvements alternatifs est de **3 millions de m³**

Si ces pratiques de consommation ont un intérêt économique certain pour les ménages, en revanche, elles ont un impact néfaste pour les collectivités qui sont privées d'un revenu nécessaire au bon fonctionnement et bon entretien de leur réseau de distribution et de traitement. De plus, une partie de ces eaux est rejetée dans le réseau d'assainissement sans être prise en compte pour le coût que cela génère.

La consommation d'eau de pluie est particulière. En effet l'utilisation ultérieure de cette réserve d'eau peut se faire de diverses façons. Par exemple, une utilisation pour les sanitaires impliquera un retour de la quantité d'eau dans le circuit classique des écoulements après traitement en station d'épuration alors que l'arrosage du jardin en saison plus sèche aura pour effet de rejoindre le cycle de l'évapotranspiration (il y aura donc un transfert au niveau de l'équation du bilan hydrologique d'une quantité d'eau destinée au ruissellement à une quantité d'eau destinée à l'évapotranspiration).

Un récupérateur d'eau de pluie peut, dans des conditions optimales (récupérateur d'eau de pluie vide avant un épisode pluvieux intense), retirer une quantité d'eau

intéressante du réseau d'assainissement ou du réseau d'eau pluviale venant alimenter le débit des cours d'eau, au niveau d'un bassin versant. Cette technique peut donc jouer un rôle d'écrêteur de crue.

d) Les prélèvements pour l'alimentation du canal du centre

Le canal du centre, dont la construction date de la fin du 18^{ème} siècle, relie la vallée de la Loire à celle de la Saône. Le bief de partage de ce canal se situe sur le territoire du bassin versant de l'Arroux, le canal suit le cours de la Bourbince entre le bief de partage et la vallée de la Loire. Il est alimenté par les étangs de Torcy-Neuf (159 ha), Torcy-Vieux (55 ha), Berthaud (47 ha), Montchanin (21 ha), Longpendu (22 ha) et Le Plessis (29 ha). Tous ces étangs font partie du sous-bassin versant de la Bourbince. Les exutoires, de part et d'autre de ce canal, se situent à l'extérieur du bassin versant : le volume qui est prélevé pour l'alimentation du canal est donc une perte nette au niveau du bilan hydrique du bassin versant.

Malgré la grande complexité du réseau d'alimentation du canal du centre, les besoins en alimentation sont relativement bien connus. Pendant la période hivernale, la Bourbince fournit des débits relativement importants dont une partie est détournée pour les besoins du canal. Pendant cette période, les étangs nommés au dessus sont en phase de recharge, cette recharge servant pour l'alimentation estivale lorsque les débits de la Bourbince sont trop faibles. La capacité totale de stockage des étangs est d'environ 18 millions de m³, dont 6 millions ne peuvent être déstockés, ceci pour assurer la pérennité des ouvrages. Le volume annuel total disponible pour la période de mai à octobre est donc de **12 millions de m³**. Les Voies Navigables de France (VNF) sont les gestionnaires de ce canal, ils sont tenus d'assurer un débit minimum à la Bourbince tout au long de l'année en fournissant un débit supplémentaire lorsque cela est nécessaire. D'après les renseignements recueillis auprès de VNF, nous pouvons faire une estimation des besoins à environ 100 000 m³ par jour, soit une consommation annuelle totale de **36 millions de m³**.

Certaines industries du bassin versant de l'Arroux situées sur le tracé de ce canal y prélèvent directement leurs besoins en eau brute : c'est le cas entre autre de la centrale thermique Lucy de Montceau-les-Mines. Cette dernière prélève ses besoins dans le canal du centre puis restitue l'eau après utilisation, en complétant le volume perdu par évaporation par un prélèvement dans la Bourbince.

4) La vulnérabilité de la qualité et de la quantité de la ressource

Comme nous l'avons vu précédemment, les prélèvements pour l'adduction en eau potable se font, au sein du bassin versant, dans des réservoirs ou nappes superficielles. Ces réserves sont vulnérables vis-à-vis des pollutions, du fait de leur proximité avec les sources de pollution et de leur faible niveau de protection naturel.

a) Les activités susceptibles de polluer

Les activités polluantes sont le fait des mondes agricole et industriel principalement. Comme nous l'avons déjà mentionné, l'élevage bovin est la principale activité agricole du bassin versant. Contrairement à l'agriculture céréalière, l'utilisation de pesticides et d'engrais est peu courante, les engrais étant relativement peu utilisés pour la production du fourrage. La pollution agricole due au surdosage d'apport de produits

chimiques est donc moins marquée que dans d'autres régions de France où l'agriculture céréalière prédomine.

Les industriels rejettent leurs eaux après utilisation dans les réseaux collectifs, après traitement ou non. Les études au niveau national semblent montrer que ces eaux rejetées sont souvent chargées de produits polluants tels que des métaux lourds, des produits chlorés, des hydrocarbures, des solvants... Au-delà des rejets directs chargés en polluants, les industriels sont souvent responsables d'une pollution plus diffuse par infiltration lente. Les mêmes polluants sont souvent retrouvés dans les nappes souterraines au droit et à l'aval des installations industrielles. Celles-ci sont tenues, par la DRIRE (nouvellement rebaptisée DREAL), d'effectuer des études de sol du fait de leur appartenance aux Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE). Parmi les installations les plus polluantes, il y a les stations services (en activité ou non) présentes sur l'ensemble du territoire du bassin versant (comme sur l'ensemble du territoire français) et dont les cuves enterrées de carburant sont souvent percées, répandant lentement leur contenu dans le sous-sol et dans les nappes d'eaux souterraines les plus proches (constats faits par moi-même au cours de nombreux diagnostics de pollutions effectués en bureau d'étude). Une base de données de l'inventaire historique de sites industriels et activités de service avec possibilité d'effectuer des recherches par département est accessible sur le site Basias.brgm.fr.

Une autre source de pollution, d'ordre domestique, est l'utilisation excessive de produits chimiques. Les lessives et autres produits ménagers fournissent aux réseaux d'assainissement des substances polluantes difficiles à traiter. Nombreuses sont les stations d'épuration qui ne correspondent plus aux normes actuelles et qui méritent d'être renouvelées. Les produits pharmaceutiques se retrouvent dans des concentrations de plus en plus fortes dans le milieu naturel et ne sont pas traités actuellement par les stations d'épuration du bassin versant de l'Arroux.

b) Les problèmes liés au manque d'eau en période d'étiage

Les restrictions de consommation de l'eau, potable ou non, par arrêté préfectoral ne sont pas rares dans le département de la Saône-et-Loire. Le bassin versant de l'Arroux est bien concerné par ces arrêtés préfectoraux. Ceci montre la vulnérabilité de la ressource en période d'étiage en termes de quantité. Comme nous l'avons déjà mentionné, les prélèvements se font presque exclusivement dans les réserves superficielles (nappes alluviales, réservoirs de surface ou directement en rivière) d'où une fragilité quand la recharge des nappes alluviales n'est pas suffisante par manque de précipitations hivernales. En période d'étiage, les nappes alluviales alimentent les cours d'eau, d'où la nécessité que celles-ci soient les plus importantes possibles à l'approche de la saison sèche.

Une autre conséquence de la diminution de la quantité de la réserve en eau est l'augmentation de la concentration des éléments polluants en solution, surtout si la diminution de la réserve est consécutive en partie à l'évapotranspiration.

c) Etude de la réserve en eau du bassin versant à l'étiage

Le hasard climatique et les saisons font qu'il y a rarement concomitance entre les ressources en eau et les besoins, les plus forts besoins sont souvent l'été lorsque la disponibilité est moindre.

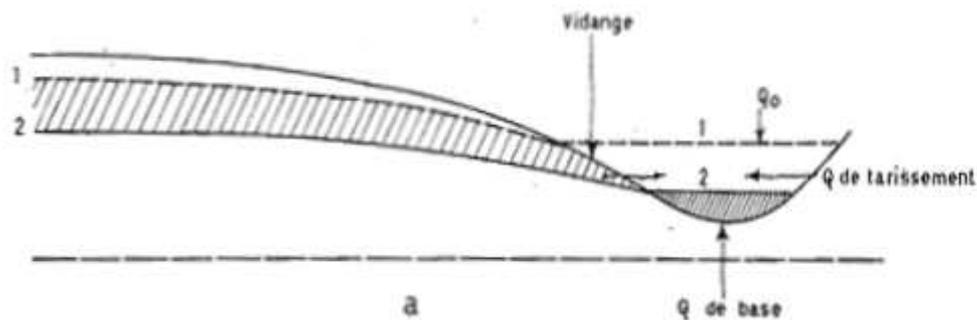
Il est fondamental de fixer une utilisation maximum permettant de garantir le maintien de conditions convenables dans les rivières pendant la période de basses eaux. Le

maintien de débits minimaux dans les cours d'eau permet de garantir la vie aquatique et d'assurer des taux de dilution suffisants de manière à atténuer les effets nuisibles de la pollution chimique et organique. Par ailleurs, la faible profondeur de l'eau associée à une faible vitesse d'écoulement (conditions réunies à l'étiage), provoque, d'une part l'augmentation de sa température et favorise l'évaporation, et d'autre part, accroît le temps de séjour des polluants dans le cours d'eau et rend la rivière impropre à la vie de nombreuses espèces aquatiques.

En résumé, la connaissance des étiages est indispensable pour assurer une exploitation équilibrée des eaux tout en maintenant les conditions vitales des rivières.

Au-delà du bilan hydrique général, la question de la ressource doit donc se porter sur la réserve régulatrice telle que l'a définie Gilbert Castany. Elle représente le volume d'eau gravifique stocké dans l'aquifère au cours d'une recharge et libérable ensuite par vidange. Si la période correspondant à cette vidange est marquée par un déficit pluviométrique, on parle de régime *non-influencé*.

Un cours d'eau, en absence de précipitation, est alimenté par les eaux souterraines correspondant aux réserves régulatrices des horizons aquifères de son bassin versant (figure 10). Il en résulte que **la courbe de tarissement** représente le volume d'eau libéré par les réserves régulatrices pendant la durée du tarissement, en d'autres termes, la courbe de tarissement représente le volume d'eau de la vidange des nappes en régime non-influencé au cours du temps.



(Source : BRGM, Gilbert Castany)

Figure 10. Coupe transversale du cours d'eau et de sa nappe

En période de déficit pluviométrique (absence d'infiltration efficace), la réserve régulatrice alimente le débit de tarissement. La courbe de tarissement permet de calculer le volume d'eau total des réserves régulatrices des horizons aquifères qui alimentent les cours d'eau. La courbe de tarissement est définie à partir de la fin de la courbe décroissante de l'hydrogramme.

Après étude de la pluviométrie sur le bassin versant de l'Arroux sur la période 2000-2009, il apparaît que le mois d'avril 2007 a été un mois très sec sur l'ensemble du territoire concerné. Les relevés de MétéoFrance donnent pour la station de Saint-Prix 14,4 mm de lame d'eau précipitée pour le mois d'avril et 18,3 mm pour la station de Toulon-sur-Arroux. Aucun des autres postes pluviométriques relevés ne donne de valeur supérieure à 20 mm. Nous choisissons donc d'effectuer notre étude en régime non-influencé sur ce mois d'avril 2007.

Nous effectuerons l'analyse de la courbe de tarissement sur deux tronçons de l'Arroux. D'abord sur la partie amont du cours d'eau, à la station hydrologique de Dracy-Saint-Loup caractérisant les réserves régulatrices des roches cristallines du massif du Morvan, ensuite à la station hydrologique de Rigny-sur-Arroux caractérisant

des roches hétérogènes sédimentaires et granitiques du sud du bassin versant. Rigny-sur-Arroux se trouve juste en amont de la confluence Arroux-Bourbince. La méthode utilisée sera celle de Castany (« Traité pratique des eaux souterraines », Dunod, 1963).

- Station de Dracy-Saint-Loup

La formule de Castany reliant Q_t (le débit à l'instant t) à Q_0 (le débit initial) en fonction du temps est définie par :

$$\log Q_t = \log Q_0 - \alpha t (\log(e)) \quad (9)$$

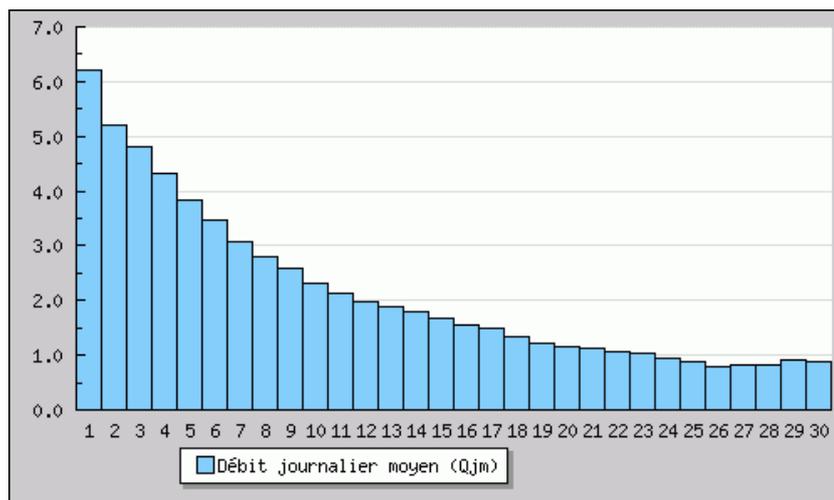
où α (le coefficient de tarissement) est une fréquence en jour⁻¹.

Cette formule vient directement de la formule de Maillet définie par : $Q_t = Q_0 e^{-\alpha t}$

En remplaçant $\log(e)$ par sa valeur numérique 0,4343, on obtient :

$$\log Q_t = \log Q_0 - 0,4343 \alpha t \quad (10)$$

Les débits journaliers de la station hydrologique de Dracy-Saint-Loup pour le mois d'avril 2007 sont présentés dans l'hydrogramme suivant.



(Source : <http://www.hydro.eaufrance.fr>)

Figure 11. Débits journaliers en m³/s à Dracy-Saint-Loup

De la formule de Castany, il vient que l'on peut résoudre graphiquement l'équation en reportant sur un papier semi-logarithmique les débits journaliers en m³/s en fonction du temps en jours. On obtient le graphique de la figure 12.

Une fois la droite ajustée, on trouve graphiquement :

Pour $t = 0$, $Q_0 = 4,5 \text{ m}^3/\text{s}$

Pour $Q_t = 1$ (qui simplifie le calcul), on relève $t = 23$ jours

D'où :

$$\log 1 = \log 4,5 - (0,4343 \alpha) \times 23$$

ce qui donne $\alpha = 0,06539$ (par jour)

Finalement la formule de tarissement est :

$$Q_t = 4,5 e^{-0,06539 t} \text{ m}^3/\text{s} \quad (11)$$

Pour calculer le volume d'eau emmagasiné à $t=0$, d'après Castany, on a :

$$V = \int_{t_0}^{\infty} Q_t dt = \int_{t_0}^{\infty} Q_0 e^{-\alpha t} dt \quad (12)$$

avec t en secondes

d'où :

$$V = \frac{Q_0}{\alpha} \quad (13)$$

où Q_0 doit être exprimé en m^3/jour et V en m^3

Or, notre valeur de Q_0 n'était pas en m^3/jour comme il le faut ici, elle est en m^3/s .
d'où : $V = (4,5 \times 86400) / 0,06539 = 5\,945\,863 \text{ m}^3$, soit près de **6 millions de m^3** pour un sous-bassin versant de 776 km^2 , soit un indice d'emmagasinement (dW) au sens de Castany de $7\,000 \text{ m}^3/\text{km}^2$. Notons que la courbe de tarissement a été faite pour le mois d'avril, donc plutôt en période de hautes eaux : ce volume doit donc correspondre au volume maximal de la réserve régulatrice. On voit sur la figure 12 que la réserve totale disponible au début du mois d'avril 2007 est supérieure à la réserve régulatrice, puisque Q_0 est sous les points du début de la courbe. Ce n'est pas toujours le cas, bien sûr, et cela confirme la pertinence du choix fait.

Effectuons à présent ce même raisonnement pour la station hydrologique de Rigny-sur-Aroux (cf. annexes 6a et 6b).

Afin de ne prendre en compte que la vidange des aquifères situés entre les deux stations, il est nécessaire de soustraire les débits issus du bassin versant de Dracy-Saint-Loup des débits de la station de Rigny-sur-Aroux.

Une fois cette soustraction faite, on peut construire sur un papier semi-logarithmique la courbe de tarissement comme on l'a fait pour la station de Dracy-Saint-Loup. On trouve alors, après ajustement de la droite :

Pour $t = 0$, $Q_0 = 15 \text{ m}^3/\text{s}$

Pour $Q_t = 1$, $t = 66$ jours

D'où :

$\text{Log}1 = \text{log}15 - (0,4343 \alpha) \times 66$

ce qui donne $\alpha = 0,041$ (par jour)

Finalement la formule de tarissement est :

$$Q_t = 15 e^{-0,041 t} \text{ m}^3/\text{s} \quad (14)$$

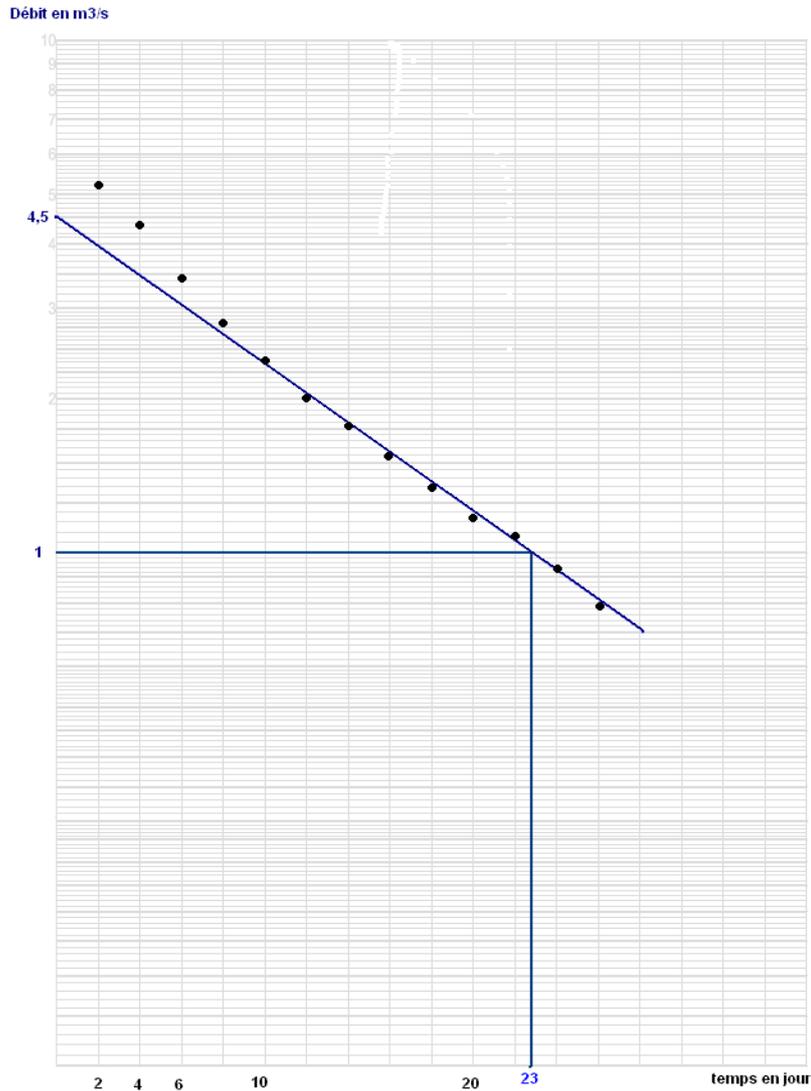


Figure 12. Résolution graphique des paramètres

Pour calculer le volume d'eau emmagasiné en to, on applique la relation :

$$V = \frac{Q_0}{\alpha} \quad (15)$$

d'où :

$V = (15 \times 86400) / 0,041 = 31\,609\,756 \text{ m}^3$, soit près de **32 millions de m³** pour un sous-bassin versant de $2277-776 = 1501 \text{ km}^2$, soit un dW au sens de Castany de $21\,000 \text{ m}^3/\text{km}^2$.

Il ressort donc que la réserve régulatrice, telle que nous l'avons définie au début de cette partie, est moins importante en terme de volume pour ce qui est des terrains cristallins que pour les terrains hétérogènes sédimentaire/cristallin du sud du bassin versant. Elle est de $7\,000 \text{ m}^3/\text{km}^2$ pour le bassin versant de Dracy-Saint-Loup, contre

21 000 m³/km² pour le bassin associé à la station de Rigny-sur-Arroux (le sous-bassin de Dracy-Saint-Loup ayant été soustrait).

Le dW au sens de Castany permet d'estimer le coefficient d'emménagement S à partir du dh mesuré dans les piézomètres associés sans avoir besoin d'un essai de pompage.

Avec la même méthode, on trouve, à la station hydrologique de Digoin (exutoire du bassin versant), un volume total de réserve régulatrice, au sens de Castany, de **60 millions de m³**. Le sous-bassin de Rigny-sur-Arroux totalise un volume de réserve régulatrice de 32 + 6 millions de m³, soit **38 millions de m³** pour 2277 km². A la confluence de l'Arroux et de la Bourbince, le bassin versant de l'Arroux représente une superficie de 2321 km², il vient donc que la réserve régulatrice du bassin versant de l'Arroux, en appliquant un produit en croix, est de $38 * 2321 / 2277 =$ près de 39 millions de m³. D'où par soustraction, la réserve régulatrice associée au bassin versant de la Bourbince est de 60 – 39 millions de m³, soit **21 millions de m³**.

En comparant les 2 sous-bassins versants de l'Arroux et de la Bourbince, on trouve un indice d'emménagement (dW) pour le bassin de l'Arroux de 39 millions de m³/2321 km², soit **16 800 m³/km²** contre **24 800 m³/km²** pour le bassin de la Bourbince (21 millions de m³/845 km²).

Cette différence d'indice d'emménagement entre les deux sous-bassins s'explique par la différence de la nature géologique. Les terrains sédimentaires qui caractérisent le sous-bassin de la Bourbince favorisent un emménagement plus important que les terrains métamorphiques et magmatiques du massif du Morvan. L'indice d'emménagement est relatif à la porosité efficace, à l'infiltration efficace, au coefficient de perméabilité ainsi qu'à la puissance de l'horizon aquifère.

5) Analyse des résultats obtenus

Nous avons vu qu'il est possible de donner un ordre de grandeur aux prélèvements d'eau effectués sur le bassin versant.

Pour la période étudiée, 2000-2009, les prélèvements industriels ont tendance à diminuer dans leur ensemble. Si cette tendance est en partie due à un certain affaiblissement de l'activité industrielle, on a vu, par l'exemple de l'entreprise ArcelorMittal, qu'il y a une volonté propre à l'entreprise de réduire la consommation afin de réduire les coûts de production, l'eau n'est plus considérée comme un bien inépuisable mais comme un facteur de production qui a un coût. On peut estimer que les prélèvements industriels actuels sont de l'ordre de **6 millions de m³ par an**. Les prélèvements pour le fonctionnement de la centrale thermique de Lucy à Montceau-les-Mines sont d'environ 3 millions de m³ par an actuellement et semblent optimisés.

Les prélèvements pour l'adduction en eau potable sont estimés à 17 millions de m³ par an en moyenne pour la période étudiée. On a vu par l'étude faite par le Brgm et le Cemagref dans l'Hérault que, à niveau constant de population, la consommation totale des ménages était constante, voire augmentait. Donc, si la tendance des prélèvements pour l'adduction en eau potable est à la baisse sur la période étudiée, il semble que les prélèvements alternatifs des ménages (notamment les prélèvements dans les puits individuels) compensent cette tendance baissière. L'ordre de grandeur de l'ensemble des prélèvements destinés à la consommation des ménages est estimée à **20 millions de m³ par an**.

A supposer que la liste diffusée par l'agence de l'eau Loire-Bretagne concernant les prélèvements du secteur agricole soit exhaustive, il apparaît que le volume prélevé en

moyenne annuelle, 34 000 m³, soit négligeable devant les autres prélèvements. Toutefois, l'impact peut se révéler plus important en période d'étiage.

Enfin, concernant l'alimentation en eau du canal du centre, les besoins en eau pour son fonctionnement au niveau du bief de partage sont d'environ **36 millions de m³ par an**. Ainsi, la moyenne annuelle des prélèvements en eau tous secteurs confondus au sein du bassin versant de l'Arroux est de 6 + 20 + 36, soit près de **60 millions de m³ par an**.

L'étude de la courbe de tarissement effectuée sur le mois d'Avril 2007, donc en période de hautes eaux, donne une valeur de réserve régulatrice de l'ordre de **60 millions de m³** pour l'ensemble du bassin versant. Compte tenu de la période analysée et de l'hiver précédent très arrosé, il semble que cette valeur de 60 millions de m³ soit la capacité maximum de la réserve régulatrice sur le bassin versant. On rappelle que la recharge des nappes s'effectue essentiellement pendant l'automne-hiver du fait, d'une part de précipitations plus importantes pendant cette période, et d'autre part de l'activité végétale ralentie, voire inexistante, d'où une évapotranspiration moindre et une infiltration favorisée.

Dans le bilan hydrique du bassin versant, l'entrée sous forme de pluie apporte un volume moyen annuel d'eau de l'ordre de près de **3 milliards de m³ par an** (957 mm de lame d'eau précipitée sur un bassin d'une superficie d'environ 3200 km²). Nous avons vu que près des 2/3 de ce volume repart sous forme d'évapotranspiration ou de façon occulte, alors que le 1/3 restant (soit 1 milliard de m³ par an) ressort, par écoulement, très rapidement du bassin versant par son exutoire, soit après ruissellement, soit après infiltration et écoulement souterrain. Dès lors, il est opportun de comparer le volume total de prélèvement annuel (60 millions m³ par an) avec la réserve régulatrice (60 millions de m³ par an) telle que nous l'avons définie plus haut. Seule cette réserve permet de jouer un rôle tampon entre les précipitations et la sortie à l'exutoire. C'est cette réserve qui soutient le débit des rivières en période de déficit pluviométrique, elle soutient donc les débits d'étiage.

Si, a priori, le volume d'eau entrant sur le bassin versant annuellement est très supérieur aux prélèvements effectués, la relativement faible capacité de stockage des nappes d'eau souterraines (principalement alluviales) implique qu'en période d'étiage, il y a nécessité de gestion de cette ressource. La gestion du canal du centre a pris en compte ces difficultés d'approvisionnement en période d'étiage et gère la ressource en chargeant des réservoirs quand l'eau est plus abondante et en utilisant cette ressource quand l'eau vient à manquer. L'effet tampon est créé artificiellement.

L'arrêté préfectoral n° 10-03189 du 16 juillet 2010 définit les débits d'alerte, de crise, et de crise renforcée pour l'Arroux et la Bourbince avec des restrictions croissantes.

Dans le tableau suivant, les valeurs seuils des débits moyens journaliers de référence sont exprimées en m³/s. Elles sont à comparer au minimum observé sur une période de 3 jours consécutifs pendant les 15 jours précédents, la valeur retenue étant la plus haute des 3 jours consécutifs les plus bas (VCN3).

Tableau 2. Débits critiques sur l'Arroux et la Bourbince

ZONE HYDROGRAPHIQUE	N°	STATION DE RÉFÉRENCE avec code banque hydro	N° 1 Alerte	N° 2 Crise	N° 3 Crise renforcée
Arroux	2	Rigny-sur-Arroux K1341810	5,540	2,800	1,400
Bourbince	3	Vitry-en-Charollais K1383010	1,562	1,040	0,781

(Source : Arrêté Préfectoral n°10-03189 de Saône-et-Loire)

A titre d'exemple, sur la période 2000-2009, concernant la station hydrologique de Rigny-sur-Arroux, le débit est passé sous le seuil d'alerte au moins une fois les 10 années considérées, sous le seuil de crise 7 des 10 années, et sous le seuil de crise renforcée 4 des 10 années.

Le tableau suivant présente le nombre de jours par mois sur lesquels les débits, de crise renforcée (1,40 m³/seconde), de crise (2,80 m³/seconde), d'alerte (5,54 m³/seconde) est dépassé à la station hydrologique de Rigny-sur-Arroux sur la période 2000-2009.

Tableau 3 Nombre de jours de dépassement des seuils

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Nombre de jour de dépassement du seuil de crise renforcée (1,40 m3/seconde)										
Mai										
Juin				8						
Juillet				26		13	12			
Aout			2	31		26	3			
Septembre				27		30				
Octobre				2		19				
Novembre										
Nombre de jour de dépassement du seuil de crise (2,80 m3/seconde)										
Avril										
Mai										
Juin			1	21	2	10	7			
Juillet			12	31	15	24	28			
Aout	6		24	31	9	31	10			6
Septembre	17		18	30	25	30	12			23
Octobre			15	9	8	31				20
Novembre						6				1
Nombre de jour de dépassement du seuil d'alerte (5,54 m3/seconde)										
Avril				1				1		
Mai			7	24		1		7		7
Juin	2		22	30	22	30	23			13
Juillet	11	8	31	31	30	31	31		5	16
Aout	29	21	31	31	20	31	25		16	30
Septembre	29	19	30	30	30	30	28	1	10	30
Octobre	5		21	28	15	31	1	17	12	31
Novembre						26	13	14		5
Décembre						1				

Une étude hydrogéologique (Partie III) est donc nécessaire afin de répertorier des nappes d'eau souterraines moins sujettes aux influences et aux variations du cycle hydrologique. L'intérêt est de trouver des nappes dont l'eau a un temps de séjour relativement long, afin de fournir une éventuelle ressource en période d'étiage.

Au niveau qualitatif, la ressource en eau est vulnérable du fait de la proximité de ces réserves avec les sources potentielles de pollution et de la faible protection naturelle des aquifères (la couverture des alluvions est de faible épaisseur d'après les coupes géologiques visibles dans la banque de données du sous-sol sur le site internet Infoterre).

La pollution chimique est avérée à l'aval des grandes villes, et d'une manière générale dans le sud du bassin versant, d'où la nécessité d'améliorer les systèmes d'assainissement et d'épuration des eaux usées par la mise aux normes des stations d'épuration sans négliger le traitement des résidus des produits pharmaceutiques que l'on trouve dans des concentrations de plus en plus élevées dans le milieu naturel.

Il semble indispensable que la gestion de l'eau (aspect quantitatif et qualitatif) au sein du bassin versant de l'Arroux doive passer par une sensibilisation et une pédagogie de

tous les acteurs de l'eau, qu'ils soient industriels, agricoles ou particuliers. Chacun doit prendre conscience du devoir de préservation de cette ressource.

III) HYDROGEOLOGIE DU BASSIN VERSANT

1) Introduction

L'hydrogéologie se définit comme la partie de la géologie qui s'occupe de la circulation des eaux dans le sous-sol : elle concerne la recherche des nappes, l'évaluation des réservoirs ainsi que les captages et les débits possibles dans le but d'établir une gestion active des aquifères.

L'hydrogéologie est indissociable, d'une part, de l'hydrologie de surface (que nous avons traitée dans la partie précédente) dont elle dépend directement, et d'autre part, de la géologie qui sera étudiée dans les paragraphes suivants.

2) La géologie

On trouve sur la partie sud du territoire du bassin versant de l'Arroux, le bassin houiller de Blanzky – Le Creusot dont l'activité s'est achevée à la fin du vingtième siècle, dans le courant des années 1990, après deux siècles d'exploitation minière.

Cette activité a apporté des connaissances considérables du sous-sol de cette région grâce aux nombreux sondages de recherche houillère effectués, pour la plupart, entre 1940 et 1960. Certains de ces forages ont atteint des profondeurs de plus de 1 000 mètres et même 1 451 mètres pour un sondage réalisé à Sanvignes-les-Mines en 1950.

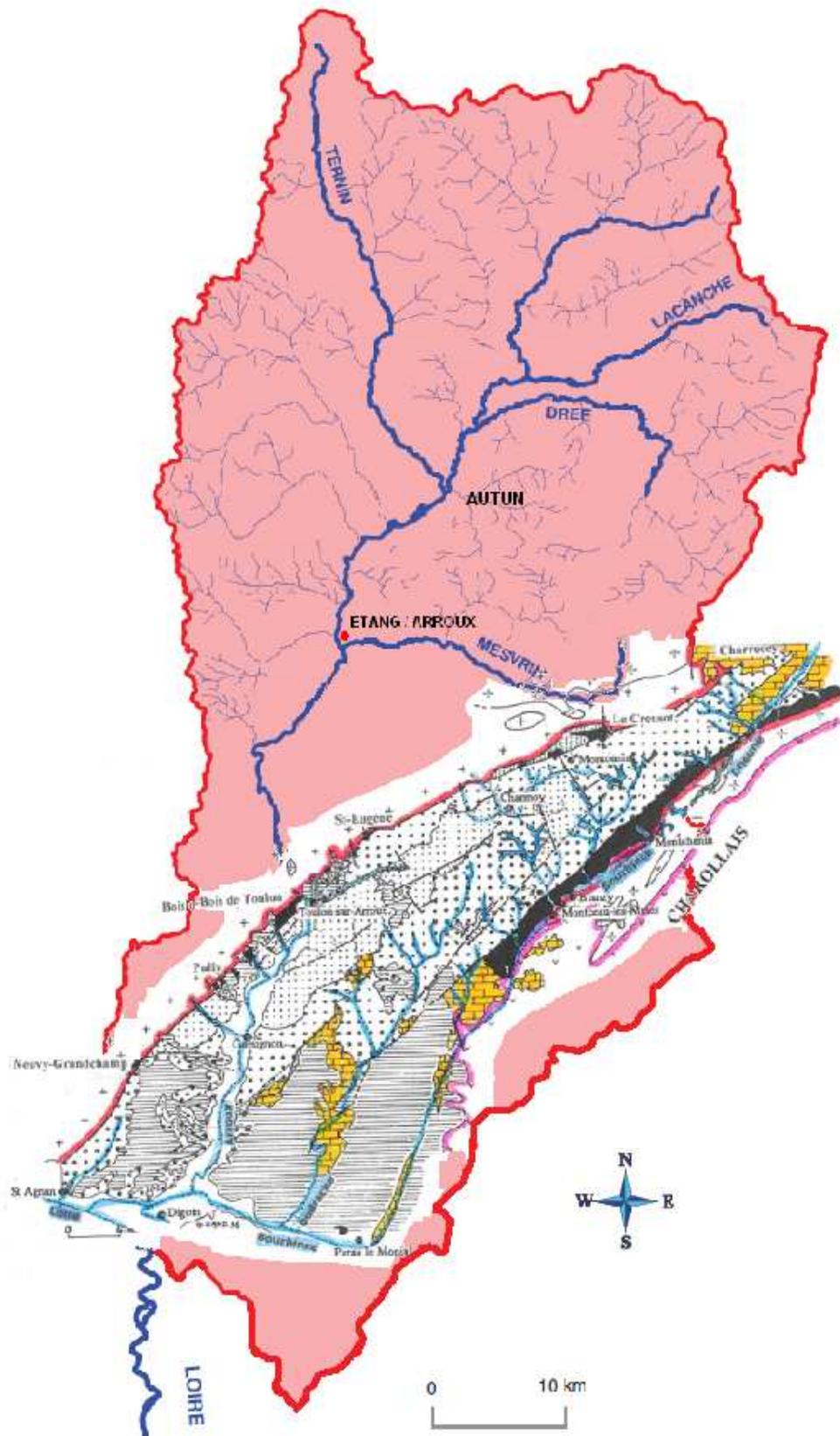
La figure 13 représente la situation du bassin houiller de Blanzky – Le Creusot par rapport au bassin versant de l'Arroux. On note que la partie sud du bassin versant est presque entièrement caractérisée par ce bassin houiller du Permo-Carbonifère composé de roches sédimentaires.

La figure 14 détaille la géologie de ce bassin. À l'extrême sud, la géologie est composée de formations de l'Ere tertiaire avec une forte représentation des sables et argiles du Bourbonnais du Plio-Quaternaire. On a également des sables et argiles à silex de l'Eocène sur la partie sud-est, ainsi que des marnes et calcaires du Chattien-Aquitainien.

La partie nord du bassin houiller est constituée de terrains de l'Ere primaire, essentiellement du Carbonifère et du Permien : on y trouve des grès rouges, des sédiments détritiques indifférenciés du Saxonien et de l'Autunien, ainsi que le houiller du Stéphaniens.

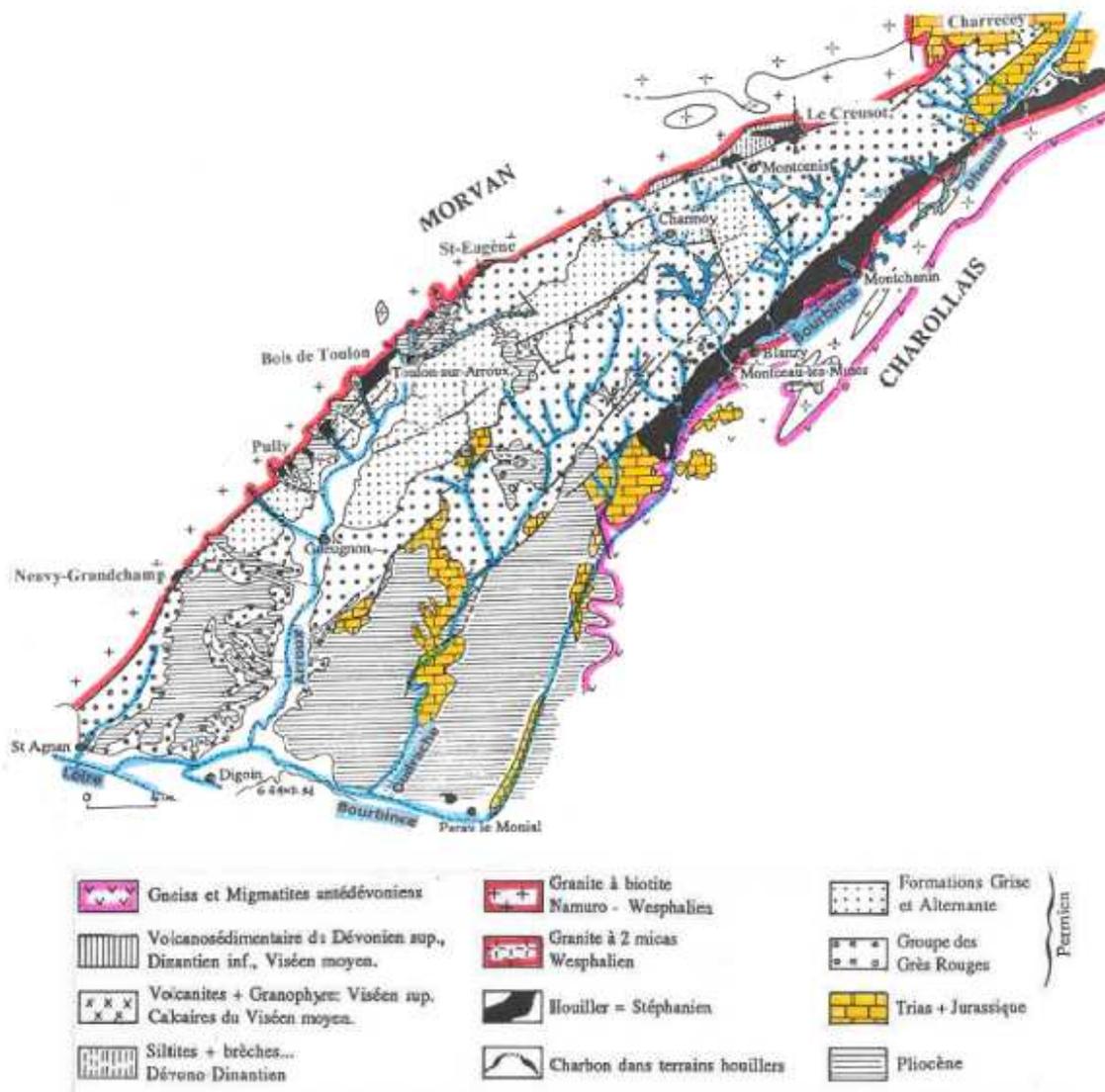
La partie nord du bassin versant de l'Arroux est constituée par le massif du Morvan composé pour l'essentiel de roches magmatiques plutoniques : granite à biotite du Namuro-Wesphalien et granite à deux micas du Wesphalien.

L'extrême sud-est est constitué de formations métamorphiques, gneiss et migmatites de l'Anté-Dévonien représentant le Charollais.



(Fond de carte : SAGE Arroux-Bourbince)

Figure 13. Situation du bassin houiller de Blanzky – Le Creusot



(Source : INERIS, Méthodologie pour la réalisation des dossiers d'arrêt définitif de travaux miniers)
 Figure 14. Carte géologique du bassin houiller

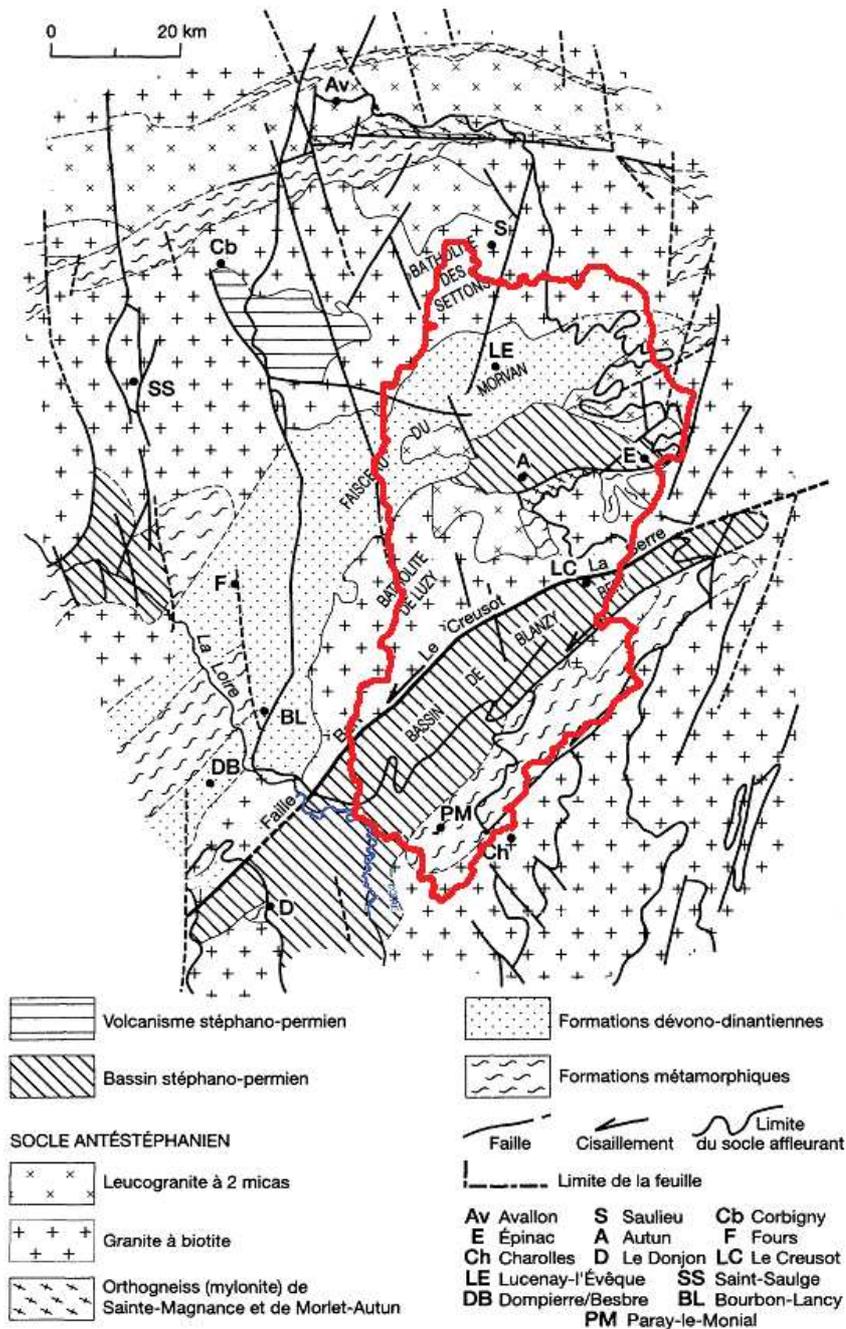
a) Histoire géologique de la région

Cette partie plutôt lourde, sans intérêt primordial pour notre étude, est à retrouver en annexe 7. L'essentiel des informations qui y sont décrites sont tirées des livrets d'accompagnement des cartes géologiques de Paray-le-Monial (Ed du Brgm. 2001) et Toulon-sur-Arroux (Ed du Brgm. 2006).

La carte de la figure 15 schématise le bassin versant de l'Arroux au sein des formations anté-Trias.

On remarque nettement la direction nord-est / sud-ouest qui détermine l'ensemble des formations qui sont du nord au sud :

- les formations du Dévono-dinantien du faisceau du Morvan
- les formations granitiques du batholite de Luzey
- le bassin du Stéphano-Permien de Blanzay
- les formations métamorphiques du Charollais.

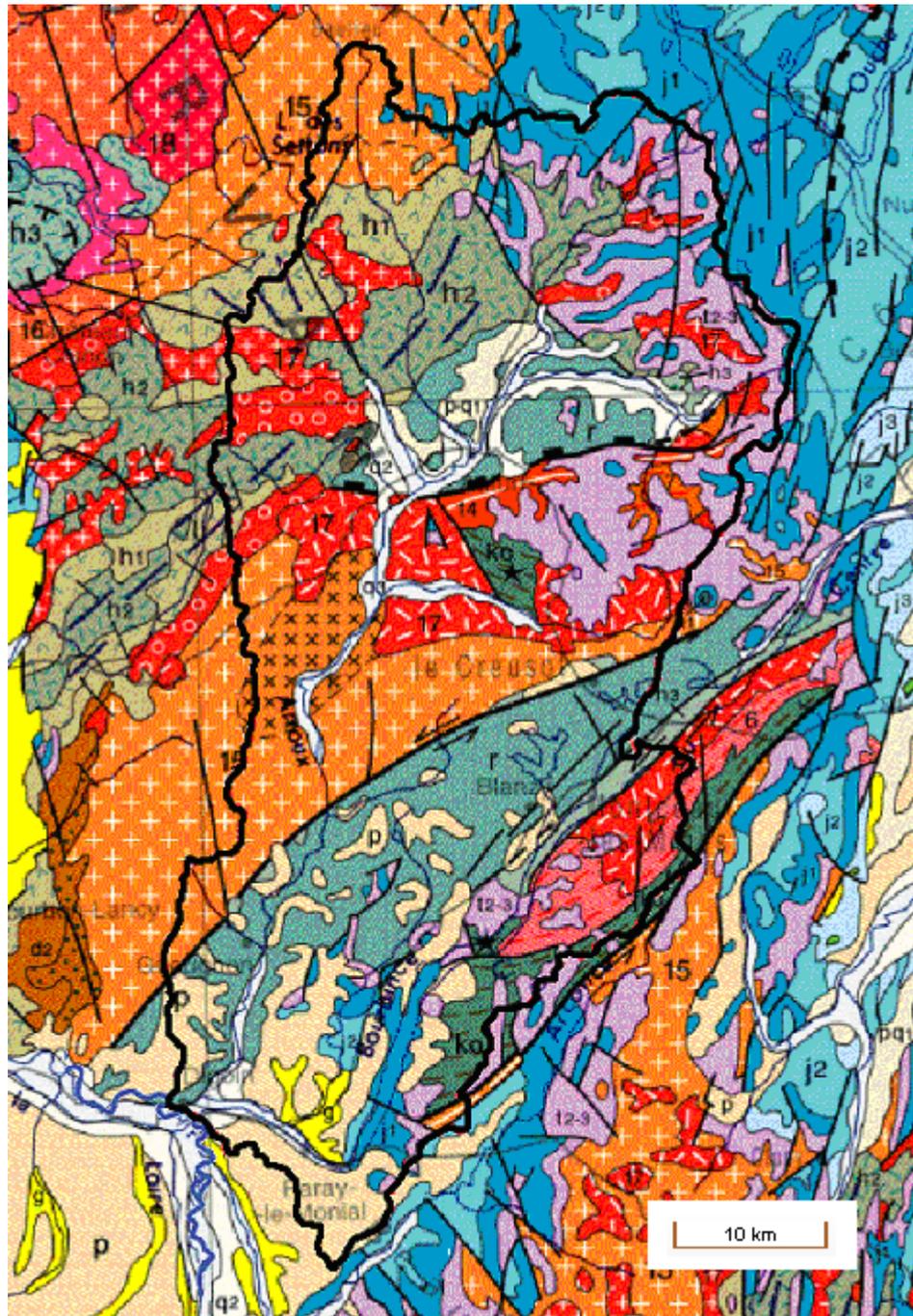


(Source : Notice explicative de la carte géologique de Paray le Monial, éd. BRGM)

Figure 15. Ecorché géologique comportant seulement les formations anté-triasiques avec contour du bassin versant de l'Arroux

Après cette présentation de l'écorché du bassin versant de l'Arroux, attachons nous à consulter les formations géologiques affleurantes. La figure 16 est un extrait de la carte géologique du BRGM au 1/1 000 000.

Les terrains notés h1, h2 et h3 au nord du bassin versant sont des terrains carbonifères. Les roches notées 15 et 17 sont des roches plutoniques, du Carbonifère également, celles notées « r » sont des roches du Permien.



(Source : <http://infoterre.brgm.fr/>)

Figure 16. Carte géologique du bassin versant de l'Arroux au 1/1000000.

On remarque donc que la majeure partie du territoire est composée de roches anté-triasiques à l'affleurement. Seul le sud du bassin est composé des sables et argiles du Bourbonnais du Pliocène (« p »). Quelques terrains composés de marnes, sables et calcaires du Trias (« t »), du Jurassique (« j ») et de l'Oligocène (« g ») sont à l'affleurement.

Quelques ressources aquifères sont exploitées dans des calcaires du Jurassique moyen au sud-ouest du bassin versant, par la ville de Charolles. Ces ressources sont vulnérables aux pollutions du fait de l'absence de filtration due à la karstification des roches calcaires.

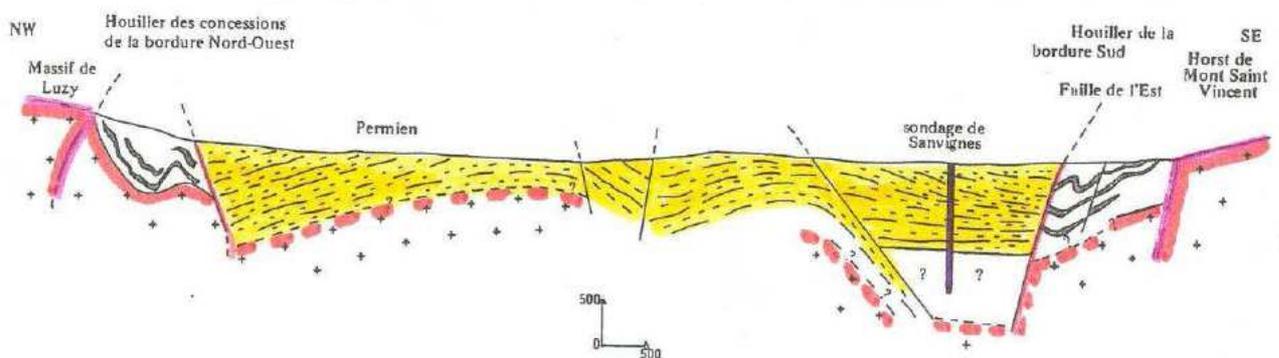
Les ressources profondes pourraient être explorées dans la partie sud-est du bassin et notamment aux environs de Paray-le-Monial : il s'agit du Trias gréseux captif sous les argiles du Lias, des niveaux calcaires du Lias captifs au sein des argiles, et des calcaires du Jurassique moyen, captifs sous l'Oligocène argileux.

Les niveaux profonds de l'Oligocène, sableux ou calcaires, essentiellement entre Paray-le-Monial et Digoin et plus au sud pourraient également être explorés.

Les terrains plio-quadernaires, dénommés « formations des sables et argiles du Bourbonnais », occupent de grandes surfaces dans le sud du bassin versant. Leur faciès prédominant est constitué de sables et de graviers et leur épaisseur peut dépasser 10 m. Compte tenu de ces caractéristiques, ces formations pourraient contenir des ressources en eau intéressantes.

b) Présentation de quelques coupes géologiques

Cette première coupe d'orientation nord-ouest / sud-est montre schématiquement l'encaissement du bassin du Stéphano-Permien au niveau de la région montcellienne : on parle de graben (structure tectonique constituée par des failles normales de même direction, et limitant des compartiments de plus en plus abaissés en allant vers le milieu de la structure). Le houiller du Stéphaniien apparaît de part et d'autre du fossé : Le Creusot au nord-ouest et Montceau-les-Mines au sud-est. Le sondage profond de 1450 m de Sanvignes-les-Mines est représenté sans avoir atteint le socle plutonique et métamorphique. Parmi la vingtaine de forages réalisés entre 1944 et 1976 dans le Permien comblant le graben, aucun n'a rencontré le socle (présent à l'affleurement de part et d'autre du graben).



(Source : INERIS, Méthodologie pour la réalisation des dossiers d'arrêt définitif de travaux miniers)

Figure 17. Coupe géologique du bassin du Stéphano-Permien

La seconde coupe présentée ci-dessous a également une orientation nord-ouest / sud-est, mais se situe plus au sud que la coupe précédente. La partie composée des granitoïdes (en bleu sur la coupe) n'appartient pas au bassin versant de l'Arroux. On note la présence des deux cours d'eau, l'Oudrache et la Bourbince, dont l'écoulement se fait perpendiculairement à la coupe. Les deux vallées associées sont sur des terrains sédimentaires.

La faille entre les communes d'Oudry et de Palinges met en contact le houiller du Stéphaniien avec les grès rouges du Permien. On remarque sur cette coupe que le bloc qui s'était affaissé (à gauche) était un bassin en subsidence au cours du Permien. Après son remplissage du Permien au Lias, (cf. annexe 7), il est remonté et s'est retrouvé en position haute par rapport au houiller.

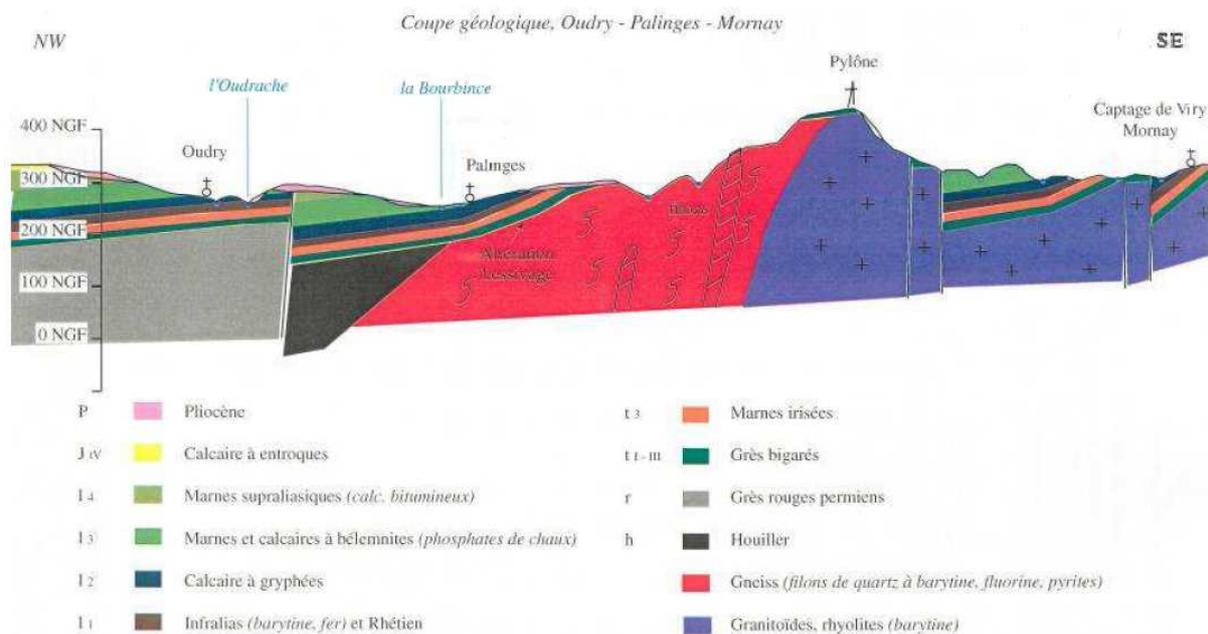


Figure 18. Coupe géologique Oudry-Palinges-Mornay

3) Etendue des alluvions

Les cours d'eau principaux du bassin versant, présentant un intérêt pour leur capacité à stocker de l'eau dans leurs alluvions, sont, par ordre d'importance, l'Arroux, la Bourbince et éventuellement l'Oudrache.

a) L'Arroux

L'Arroux prend sa source près d'Arnay-le-Duc, sur la commune de Culètre (en Côte d'Or) traversant du nord-est vers le sud-ouest les terrains cristallins du socle, les dépôts permo-carbonifères du bassin d'Autun, les terrains granitiques du batholite de Luzay depuis le sud d'Autun jusqu'à Toulon-sur-Arroux, et de nouveau les schistes et grès permo-carbonifères jusqu'à Digoin où elle se jette dans la Loire.

Les alluvions de l'Arroux s'étendent selon une plaine alluviale étroite dont l'extension latérale varie de 500 m à 2 km. En revanche, les dépôts pliocènes qui bordent cette plaine alluviale sont largement développés au niveau d'Autun et de la bordure aval de la vallée. Les alluvions, essentiellement modernes, n'excèdent pas 4 à 5 m d'épaisseur. Les alluvions anciennes, formant les terrasses, se développent uniquement dans la basse vallée en aval de Gueugnon.

D'après une étude effectuée par le BRGM en 1980 pour la recherche de matériaux de carrière, il ressort plusieurs zones présentant des caractéristiques intéressantes pour des gisements alluvionnaires :

- ✓ A la hauteur de la commune de Laizy, environ 300 ha d'alluvions de 4 à 5 mètres d'épaisseur sous une couverture d'environ 0,5 m.
- ✓ Au niveau de la commune de Charbonnat, entre 4 et 6 mètres d'alluvions sous une couverture variant de 0,2 à 1 m d'épaisseur. La superficie exacte n'est pas connue mais semble être de plusieurs centaines d'hectares.

- ✓ A proximité de Vendenesse-sur-Arroux, 200 ha avec une épaisseur variant de 6 à 7 m
- ✓ Enfin, au sud de la ville de Gueugnon, jusqu'à Digoin, plusieurs centaines d'hectares d'alluvions d'épaisseur comprise entre 8 et 10 m sont constatées. Malheureusement une grande partie de ces zones de surépaisseur ont déjà été exploitées pour leurs matériaux et le sont encore actuellement.

b) La Bourbince

La vallée de la Bourbince présente peu de zones intéressantes d'alluvions à l'amont de la commune de Palinges. D'après l'étude effectuée par le BRGM en 1980, il semble que certains secteurs présentent des épaisseurs d'alluvions noyées intéressantes à partir de Palinges sans toutefois que l'on ait des renseignements sur les superficies associées. En allant de l'amont à l'aval, on a :

- ✓ Le point 600/3X/0010, référencant le puits de Thielay (à Palinges) qui présente 9 m d'alluvions noyées, essentiellement constituées de sables grossiers alors que la plaine alluviale atteint une largeur de 600 mètres.
- ✓ Sur la commune de Saint-Aubin-en-Charollais, le point 600/7X/001 indique, sur 3 sondages de reconnaissance, des épaisseurs d'alluvions noyées allant de 6,5 m à 9 m pour une largeur d'environ 800 mètres.
- ✓ Au niveau de Paray-le-Monial, plusieurs puits réalisés en 1957 ont montré une épaisseur d'alluvions noyées de l'ordre de 5 m sur le site de l'ancien champ captant de la commune situé à l'amont.
- ✓ Entre Paray-le-Monial et Digoin, le point BSS noté 06006X0036/T74 indique la présence d'alluvions de la Bourbince sur une largeur d'environ 1 km avec une épaisseur d'environ 10 m reposant sur des marnes.

c) L'Oudrache

Au regard des rares sondages effectués dans la vallée de l'Oudrache disponibles sur la banque du sous-sol du BRGM et malgré son rang de troisième rivière principale du bassin versant, il ressort que cette dernière est peu pourvue d'alluvions intéressantes en terme de magasins aquifères. Au même titre que les autres affluents de l'Arroux et de la Bourbince, cette vallée ne présente aucun intérêt particulier en terme de réservoir alluvionnaire.

4) Les nappes en présence et la nature des aquifères

a) les nappes alluviales

Une fois déterminés les secteurs alluvionnaires intéressants en tant que magasin contenant un certain volume d'eau, il est nécessaire de connaître les caractéristiques intrinsèques de ces nappes.

La porosité, qui correspond au volume relatif des vides dans la roche, ici dans les alluvions, est intéressante du fait de la composition sablo-graveleuse des alluvions de l'Arroux sans présence excessive d'argile. Cette porosité permet donc une réserve d'eau intéressante relativement au volume des alluvions.

- Les paramètres hydrodynamiques de ces nappes

Un rapport de 1976 du BRGM nous indique que sur les alluvions de l'Arroux, dans les secteurs les plus propices à l'exploitation d'eau (ceux cités au dessus), la perméabilité varie de 10^{-4} à 10^{-2} m/s et les débits des ouvrages en exploitation en 1976 étaient compris entre 10 et 50 m³/h.

Pour ce qui est des alluvions de la Bourbince, le même rapport nous présente un débit de 50 m³/h au puits de Thielay (près de la commune de Palinges), réalisé en continu même pendant la période d'étiage, exploité par le syndicat Bourbince-Oudrache.

Entre les communes de Digoïn et Paray-le-Monial, dans les alluvions de la Bourbince, un ouvrage, pour lequel l'épaisseur noyée était de 6 m a été essayé au débit de 100 m³/h avec de bons résultats.

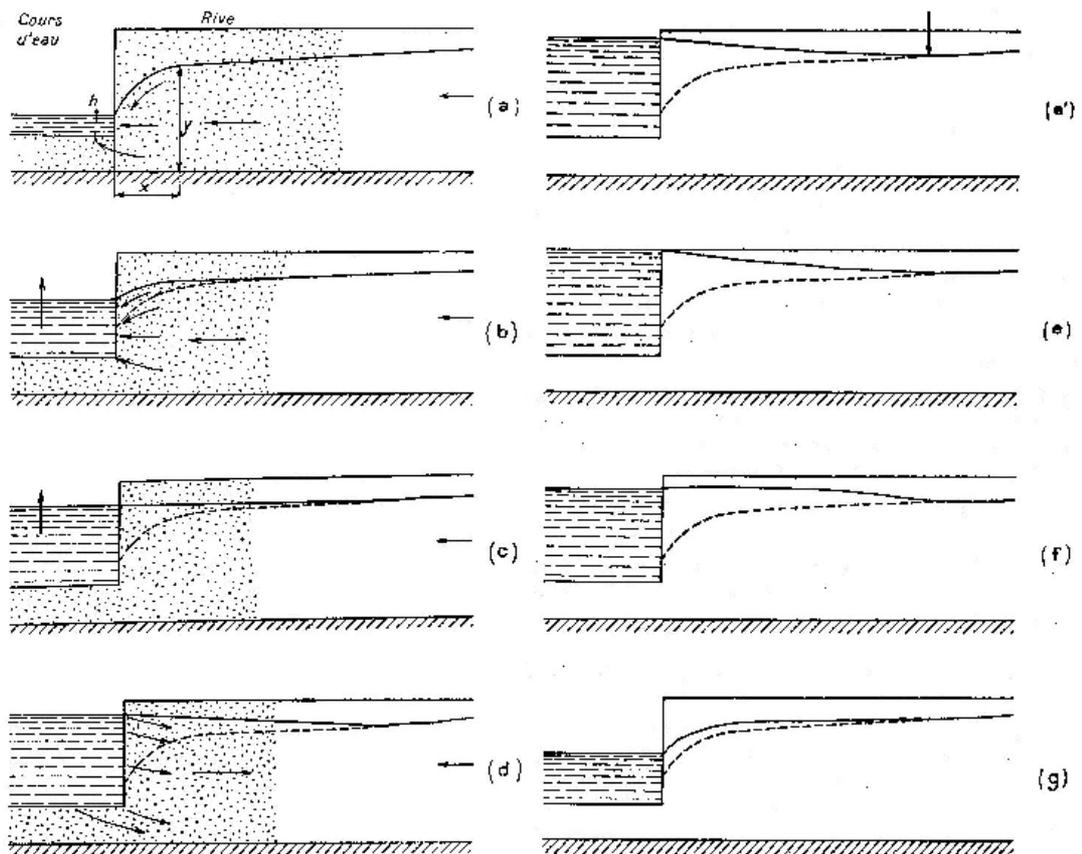
- La relation nappe rivière

L'Arroux et la Bourbince sont en relation avec leur nappe d'accompagnement. En règle générale, lorsque le niveau piézométrique de la rivière est supérieur au niveau piézométrique de la nappe qui l'accompagne, selon le principe des vases communicants, un flux se crée de la rivière vers la nappe. A l'inverse, le flux se fait de la nappe vers la rivière lorsque cette dernière est à un niveau plus bas que la nappe : c'est le cas, par exemple, en période d'étiage.

On note qu'il y a, par ailleurs, un retard pour arriver à l'égalisation des niveaux piézométriques du fait de la différence de perméabilité entre les deux milieux, la rivière ayant une perméabilité infinie alors que les alluvions ont une perméabilité de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-2} m/s.

En plus de ces flux nappe-rivière et rivière-nappe, l'écoulement de la rivière, comme celui de la nappe, se fait évidemment de l'amont vers l'aval, d'où la difficulté à observer et analyser ces différents processus.

Du fait des pompages dans les eaux superficielles (nappes alluviales ou cours d'eau directement), cette relation nappe-rivière joue un rôle non négligeable dans la qualité et la quantité des eaux des deux compartiments. En effet, lors de prélèvements en nappe alluviale, l'éloignement par rapport à la rivière n'est jamais très grand du fait de la relativement faible étendue des alluvions. Lors d'un pompage à fort débit et longue durée, le rabattement de nappe consécutif peut avoir pour conséquence un flux artificiel de la rivière vers la nappe (sans filtration efficace) et donc une baisse de la qualité de l'eau de la nappe et une baisse du débit de la rivière. Inversement, un pompage important en rivière, comme c'est le cas à Gueugnon avec les prélèvements effectués par Arcelor-Mittal dans l'Arroux, peut entraîner un flux de la nappe vers la rivière à l'aval du prélèvement du fait de la baisse artificielle de la cote de la rivière, d'où une décharge de la nappe induite (particulièrement en période d'étiage).



(Source : Castany, *Traité pratique des eaux souterraines* », Dunod, 1963)

Figure 19. Coupes transversales illustrant les flux entre une rivière et sa nappe alluviale.

b) Les nappes des massifs granitiques

Comme nous l'avons vu au début de ce mémoire, la partie nord du bassin versant de l'Arroux repose sur des terrains cristallins. Les nappes de ces massifs ne sont pas exploitées pour l'adduction en eau potable directement, mais les sources issues de ces nappes sont parfois captées.

A titre d'exemple, un forage effectué à Saint-Didier-sur-Arroux au lieu dit « le Reverdeau » dans des granites très altérés et fissurés entre 19 et 47 mètres (fond de trou) ont donné des débits de pompage de l'ordre de $40 \text{ m}^3/\text{h}$.

- L'étendue du massif granitique sur le territoire étudié

Le batholite granitique de Luzy a une direction varisque, du sud-ouest vers le nord-est, et traverse le bassin versant de l'Arroux en son milieu, entre les villes d'Autun et de Toulon-sur-Arroux. Le batholite du Morvan occupe l'extrême nord du bassin versant et ses caractéristiques relatives à sa capacité de réserve d'eau sont les mêmes que le batholite de Luzy.

Ce massif granitique de Luzy est à l'affleurement sur presque un tiers du territoire du bassin versant de l'Arroux et les villes, relativement peuplées, du Creusot et d'Autun en sont à proximité immédiate, d'où un intérêt certain quant à sa possibilité de renfermer une réserve d'eau intéressante.

- Les recherches effectuées pour la détermination de failles/fractures intéressantes

Le massif du Morvan est un témoin de la chaîne Hercynienne dont la formation intervient à la fin de l'Ere primaire par la collision des continents nord-Gondwana et Laurentia-Baltica. Vers 345 Ma, de grands décrochements dextres de direction généralement SW-NE s'accompagnent de la création des failles de même direction constituant les bords du graben du bassin houiller. Ces granites ont ensuite été soumis aux efforts tectoniques du fait de plusieurs phases d'extension/compression jusqu'aux phases alpines.

D'après une étude réalisée par Didier Bonijoly en 1988 pour le compte du BRGM, il apparaît qu'il existe une bonne correspondance entre les directions de diaclases et les directions de failles, ce qui signifie que les fractures visibles en surface donnent une bonne idée générale des fractures plus grandes que l'on peut trouver en profondeur. De plus, les failles sont anciennes et denses et présentent pour certaines une zone broyée de largeur importante (de l'ordre du mètre) constituée de roches disloquées et non cimentées. Ces structures sont des drains potentiels capables de produire des débits d'eau importants lorsque ces structures sont des aquifères. D'après D. Bonijoly, le régime tectonique actuel ne peut que favoriser l'ouverture des failles.

D'après cette étude, les familles de failles intéressantes pour l'exploitation d'eau ont des directions :

- N 70° - 90° E
- N 110° - 145° E

Il conviendrait toutefois, après localisation de sites intéressants, de faire appel à une étude géophysique afin de confirmer la possibilité de trouver des aquifères productifs.

c) Les nappes du bassin du Stéphano-Permien

Ces nappes d'eau souterraine se situent dans les terrains permien du bassin houiller de Blanzay. Rappelons que ces terrains se sont déposés dans le graben par phases successives et sont constitués d'éléments détritiques plus ou moins grossiers.

Le bassin sédimentaire du Stéphano-Permien forme un grand fossé d'effondrement d'orientation sud-ouest / nord-est s'étendant sur plus de 100 km avec une largeur maximum de 10 km au niveau de Montceau-les-Mines. Les terrains carbonifères et permien sont généralement compartimentés par des failles.

- Les sources d'information

Les sources d'information concernant cet aquifère sont nombreuses du fait de l'intérêt économique qu'a présenté le bassin houiller à une époque où le charbon était le combustible principal de nos industries. Comme nous l'avons déjà signalé, nombreux sont les forages de recherche de charbon qui ont apporté de précieux renseignements relatifs à la géologie de ce bassin et leur répartition a permis d'en connaître l'étendue. Malheureusement, et malgré les grandes profondeurs atteintes par ces forages, aucun d'entre eux n'a permis de donner une estimation de la profondeur de ce bassin, le socle granitique n'ayant jamais été atteint.

En 1965, le BRGM a effectué un rapport sur la connaissance de l'hydrogéologie de la région de Montceau-les-Mines et plus particulièrement sur les possibilités de présence d'aquifère dans les grès rouges du Permien.

En 1988, la Communauté Urbaine Le Creusot – Montceau-les-Mines (CUCM) a commandé au BRGM une étude hydrogéologique de pré faisabilité concernant un projet d'utilisation des eaux d'exhaure des houillères du bassin de Blanzky – Montceau pour l'alimentation en eau de la CUCM.

- Les conclusions des études effectuées

Concernant l'étude de 1965, les auteurs, après étude de la géologie de la région, concluent que l'analyse préliminaire des terrains et structures susceptibles d'être aquifères conduit à préconiser des sondages dans les grès rouges du Saxonien dans le bassin de l'Oudrache. L'explication de ce choix vient de la porosité des grès rouges du Saxonien reposant sur un mur relativement imperméable constitué de schistes et de grès assez compacts de l'Autunien. Cependant cette piste est restée sans suite. La présomption de présence d'un synclinal de l'Oudrache, favorisant l'existence d'un magasin aquifère, tel qu'il avait été évoqué lors de cette étude n'a jamais été faite.

L'étude de 1988 apporte plus de renseignements intéressants, essentiellement sur la capacité et la qualité des eaux disponibles dans le houiller. L'étude a porté sur chaque exhaure du bassin minier de Blanzky – Le Creusot en définissant la quantité et la qualité chimique de chacune d'entre elles. Il ressort que les eaux de l'aquifère des formations schisto-gréseuses ont des propriétés physico-chimiques hétérogènes (minéralisation totale et faciès chimique). La conductivité moyenne des exhaures varie de 1000 à 2500 $\mu\text{S}/\text{Cm}$ et excédant parfois 3000 $\mu\text{S}/\text{Cm}$, il s'agit donc d'une eau très minéralisée. Il semblerait que les eaux les plus minéralisées soient les eaux captées le plus en profondeur. Pour ce qui est de la quantité, la moyenne des eaux exhaurées était de 11000 m^3/jour et étaient rejetées directement dans la Bourbince voisine.

Cette étude a donc montré que le houiller du bassin de Blanzky était un aquifère important avec des débits exhaurés moyens de 11000 m^3/jour mais ce captage d'eau se faisait par le biais de drains qui étaient les galeries en exploitation. Au-delà de la quantité disponible, il reste que la très forte minéralisation de cette eau ne permet pas une utilisation en tant qu'adduction en eau potable. La dilution qu'elle nécessiterait pour être dans les normes de potabilité fait qu'elle ne serait pas économiquement intéressante.

Les ressources en eaux des formations du Permien semblent peu importantes, en surface, et localisées dans les niveaux gréseux. Elles se manifestent par des sources nombreuses et de faible débit, certaines sont captées par les communes pour la distribution d'eau potable, c'est le cas par exemple de la commune de Charmoy. En revanche, en profondeur, les formations du Permien peuvent contenir quelques ressources aquifères intéressantes. Des forages profonds, pour la recherche de houille, ont donné des indications concernant des venues d'eau. Le forage du moulin de Rochefort, à Vendenesse-sur-Arroux, note une « forte venue d'eau » dans une formation d'alternances de grès et de schistes, sans donner de débit approximatif. A Perrecy-les-Forges, le forage référencé 600/4X/0022 a rencontré, entre autre, trois venues d'eau avec des débits allant de 20 à 44 m^3/h situé dans des grès du Trias. Les niveaux aquifères sont liés, soit à des zones fracturées (les failles jouant un rôle de drain), soit à des niveaux d'évaporites, la grande solubilité de ces produits pouvant entraîner un accroissement de la perméabilité de la formation.

Tableau 4 Récapitulatif des principales ressources en eaux souterraines

Dénomination aquifère	situation géographique	lieux des observations	épaisseur de l'aquifère	Nature de l'aquifère	Débit observé	Débit estimé
Alluvions Arroux	Surtout développées sur la partie l'aval du cours d'eau	Gueugnon, Rigny-sur-Arroux	Alluvions noyées entre 5 et 10 mètres	Sable parfois graveleux	Entre 15 et 50 m ³ /h	
		Charbonnat	Alluvions noyées entre 1 et 5 mètres	Sable graveleux et galets	40 m ³ /h	
Alluvions Bourbince	Surtout développées sur la partie l'aval du cours d'eau	Paray-le-Monial, secteur de la Gravoine, Palinges	Alluvions noyées entre 6 et 9 mètres	Sable parfois graveleux	50 m ³ /h	
		Entre Paray-le-Monial et Digoin	Alluvions noyées de 6 mètres	Sable graveleux	100 m ³ /h	
Grès du Permien	Sur l'ensemble du bassin houiller (partie sud du bassin versant)	Perrecy-les-Forges	Venue d'eau située à 115 mètre de profondeur	Grès accompagné de gypse	1,5 m ³ /h	
		Perrecy-les-Forges	3 venues d'eau	Grès	De 20 à 45 m ³ /h	
		Vendennes-sur-Arroux	Entre 63 et 70 mètres de profondeur	Grès avec de grandes fissures	"Venue d'eau"	
		Vendennes-sur-Arroux	Entre 189 et 192 mètres de profondeur	alternance de grès et de schistes	"Forte venue d'eau"	Plusieurs dizaines de m ³ /h
		Charmoy	Source (résurgence)	Grès rouge du Permien	30 m ³ /h en période sèche	
		Autun	Entre 5 et 60 mètres	alternance de grès et de schistes	10 m ³ /h	
Sables et Argiles du Bourbonnais	Sud du bassin versant de l'Arroux	La Motte Saint-Jean	Peut largement dépasser 10 mètres			plusieurs m ³ /h
Granites (altérites)	Partie nord du bassin versant	Saint-Didier-sur-Arroux	Réservoir entre 19 et 47 mètres	Granites très altérés et fissurés	40 m ³ /h	
		Cussy-en-Morvan	Résurgences (sources)	Arènes granitiques	1 à 6 m ³ /h	
		La Tagnière	Résurgences (sources)	Arènes granitiques	0,5 m ³ /h	
		Larochemillay	Source (résurgence)	Arènes granitiques	10 m ³ /h en basses eaux	
Granite (socle)	Toute la partie nord du bassin versant					quelques m ³ /h à quelques dizaines de m ³ /h

Il ressort de ce tableau que les aquifères les plus productifs en terme de débits sont les alluvions, qu'elles soient issues de l'Arroux ou de la Bourbince. Ces ressources sont celles qui sont actuellement les plus utilisées, conjointement avec les réservoirs de surfaces, rivières et retenues. Nous avons vu que la capacité de ces réserves est étroitement liée aux régimes pluviométriques au cours de l'année, il est donc nécessaire de regarder parmi les autres aquifères disponibles sur le bassin versant, ceux qui seraient les plus intéressants à exploiter pour pallier un possible manque d'eau en période de sécheresse prolongée.

Les grès du Permien semblent procurer des débits de plusieurs dizaines de m³/h, toutefois les aquifères concernés sont généralement très en profondeur. Si cela permet une protection de l'aquifère, cela engendre des coûts d'exploitation relativement élevés et des risques de rendements très inférieurs à ceux attendus.

Pour ce qui est des sables et argiles du Bourbonnais, leur présence sur le territoire est trop faible et limitée au sud du bassin versant, là où les ressources sont les plus nombreuses. Certaines collectivités utilisent cette ressource pour les besoins de leurs administrés, c'est le cas de la commune de La-Motte-Saint-Jean.

Enfin, pour ce qui concerne les différents massifs granitiques de la partie nord du bassin versant, on note des débits de l'ordre de la dizaine de m³/h, ce qui est intéressant du fait de la faible couverture des arènes granitiques que forment les aquifères testés. Economiquement, ces aquifères semblent présenter l'avantage d'avoir des débits intéressants et une accessibilité relativement facile. Le rendement capacité de production par rapport aux coûts de production est le meilleur après celui des alluvions.

IV) CONCLUSIONS

1) Rappel de la problématique

La problématique retenue pour ce sujet de mémoire se trouve dans l'étude de la ressource en eau, au sens large, du bassin versant de l'Arroux. Nous avons pu constater que les prélèvements d'eau se font essentiellement au sein des réservoirs que l'on qualifie de « superficiels », à savoir, les nappes alluviales, les différentes retenues, ou encore directement dans les cours d'eau. Ces réservoirs sont vulnérables, d'une part d'un point de vue qualitatif, du fait de la faible protection naturelle vis-à-vis des pollutions anthropiques, et d'autre part d'un point de vue quantitatif du fait de la taille de ces réservoirs et de leur mode de recharge. L'étude a porté sur la période 2000-2009 et est fonction des données disponibles.

2) Les éléments de réponse

Nous avons vu, au travers des caractéristiques du bassin versant, que les écoulements sont rapides, particulièrement à l'amont du bassin, là où les précipitations sont les plus abondantes. Ce qui ne favorise pas l'infiltration et la recharge des nappes à l'amont du bassin, mais qui favorise les pointes de crues à l'aval : rappelons que le débit instantané maximal connu à la station de Digoin est de $530 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1965, alors que le débit moyen est de $34 \text{ m}^3/\text{s}$.

Si le bilan hydrique ne doit être considéré que comme un ordre de grandeur, il apporte des renseignements intéressants. En partant de l'hypothèse que la variation de stock était négligeable sur la période choisie, on trouve un ordre de grandeur de précipitations efficaces d'environ 300 mm calculé sur la période 2000-2009. Nous avons vu que le déficit d'écoulement était de l'ordre de 68% des précipitations brutes, mais que certains éléments permettaient d'expliquer ce relativement fort pourcentage par rapport à ce que l'on a calculé avec les formules de Coutagne et de Turc.

L'hypothèse selon laquelle la variation de stock était négligeable sur la période considérée est sans doute abusive : le niveau de la nappe du houiller au niveau de Montceau-les-Mines a continué à augmenter au moins jusqu'à 2003. On peut estimer, au vu des débits d'exhaure actuels des différents lacs miniers, que le volume annuel nécessaire à la recharge de cette nappe était, pour les premières années de notre étude, de l'ordre de 3 millions de m^3 . Cet ordre de grandeur se fonde sur un débit d'exhaure total actuel d'environ $300 \text{ m}^3/\text{h}$. D'autre part, on a vu que les prélèvements annuels effectués pour l'alimentation du canal du centre sont de l'ordre de 36 millions de m^3 , d'où un déficit d'écoulement supplémentaire. Des écoulements occultes peuvent avoir lieu au sein du bassin versant, qui pourraient également expliquer ce déficit d'écoulement. Par exemple, l'écoulement de la nappe alluviale au droit de la station hydrologique de Digoin, ou encore un éventuel transfert des nappes alluviales vers les nappes des terrains permians sous-jacentes.

Sur la période étudiée, les prélèvements représentent un volume total moyen annuel d'environ : **60 millions de m^3** , dont 36 millions de m^3 pour la seule alimentation du canal du centre. La VNF, gestionnaire de ce canal gère la ressource en eau de façon à ne pas avoir à prélever en période d'étiage. On a vu que le volume total d'eau écoulé annuellement à l'exutoire du bassin versant est de l'ordre de **1 milliard de m^3** , mais

que cette ressource n'est pas disponible de façon continue sur l'année. Le calcul de la réserve régulatrice a montré que le volume maximum qui peut être stocké par les différents aquifères présents sur le bassin versant, puis libéré en période de déficit pluviométrique, ne représente que **60 millions de m³**. Une grande partie de cette réserve étant libérée avant l'entrée en période d'étiage, les restrictions de consommation d'eau sont courantes sur le bassin versant. Nous avons vu que les prélèvements industriels avaient tendance à diminuer pour des raisons de politique industrielle tournée vers des économies de fonctionnement. Pour le secteur agricole, la tendance est moins marquée et la consommation pourrait à l'avenir augmenter du fait d'un possible développement du secteur céréalier et du fait également de périodes de sécheresse plus régulières. Concernant la consommation des ménages, la tendance est également à la baisse pour ce qui concerne l'eau potable. Toutefois, on a vu que cette baisse peut être due à une consommation d'eau alternative, comme le suggère le relatif maintien de la démographie du bassin versant sur la période étudiée. La récupération d'eau de pluie semble avoir un intérêt certain pour la préservation de la ressource en stockant de l'eau destinée à un écoulement rapide. Cependant, si après utilisation cette eau repart dans le circuit de l'assainissement, alors cette quantité échappe aux redevances et le coût de traitement supporté par la collectivité est supérieur aux redevances perçues, ce qui est préjudiciable pour le bon fonctionnement et le maintien de l'efficacité de ce réseau à terme. Quant aux prélèvements par des puits dans les nappes, effectués par les particuliers ou par les agriculteurs, ils ont un impact sur la réserve en eau du sous-sol. Ces prélèvements sont sujets aux arrêtés préfectoraux de restriction mais ils sont difficilement contrôlables.

S'il paraît au premier abord que la géologie du bassin versant semble peu propice à la présence de grande réserve d'eau souterraine, on a vu, par la carte de la géologie superficielle du bassin, que le sud du bassin versant peut contenir des aquifères au sein de roches à l'affleurement telles que les sables et argiles du Bourbonnais du Pliocène ou dans les marnes et calcaires du Trias, du Jurassique et de l'Oligocène. Toutefois, la majeure partie du bassin est caractérisée par la présence de roches anté-triasiques à l'affleurement, essentiellement des granites et des grès. Les granites sont susceptibles de renfermer des aquifères intéressants en fonction de l'épaisseur du profil d'altération (horizon altéré et horizon fissuré) et des failles qui jouent un rôle de drain. Les grès du Permien semblent avoir des possibilités intéressantes en fonction des failles et fractures qu'ils contiennent.

3) Les préconisations

Au vu des caractéristiques du bassin versant de Arroux-Bourbince, il ressort que, malgré une lame précipitée moyenne annuelle élevée de l'ordre de 950 mm, les écoulements superficiels sont prédominants sur l'infiltration et la recharge des nappes. Les retenues d'eau (gérées par les Voies Navigables de France), présentes sur le sous-bassin de la Bourbince, permettent une recharge hivernale afin d'assurer, en plus de l'alimentation en eau du canal du centre, un soutien au débit d'étiage. Il n'existe pas ou peu de retenues de ce type sur le linéaire de l'Arroux du fait, de l'absence de canal à alimenter, de la non nécessité industrielle à augmenter les ressources en eau, mais également du fait de l'absence de volonté des collectivités, par le passé, à vouloir gérer la ressource en eau en terme de quantité. Les nappes, dont la recharge est dépendante des événements pluvieux et de la météorologie au sens général, sont peu importantes en termes de volume. De ce fait, les seuils d'alerte et de crise définis par la préfecture

sont régulièrement dépassés. Il faut donc ne pas écarter la recherche d'autres ressources en eau, dont la réserve serait moins dépendante des saisons et du régime des précipitations.

Il serait opportun de connaître les différents aquifères disponibles au sein du bassin versant, et particulièrement ceux contenus dans les roches plutoniques et métamorphiques, et les grès des terrains permien. Pour cela, il y a nécessité d'effectuer des diagnostics par géophysique (traîné électrique par exemple) sur les sites semblant présenter un intérêt. Les niveaux aquifères sont liés, soit à des zones fracturées (les failles jouant un rôle de drain), soit à des niveaux d'évaporite, la grande solubilité de ces produits pouvant entraîner un accroissement de la perméabilité de la formation. Une fois ces réservoirs d'eau souterraine localisés, et les relations qu'ils ont avec la surface connues, il y aura nécessité de protéger ces ressources contre toute pollution.

Une autre possibilité d'accroître la ressource en eau serait d'envisager la création d'une retenue artificielle sur le sous-bassin de l'Arroux en amont dans les massifs cristallins, là où les précipitations sont les plus abondantes. A titre d'exemple, une (ou plusieurs) retenue d'une capacité de stockage de 12 millions de m³ d'eau permettrait un soutien d'étiage de 2 m³/s pendant une durée de 70 jours. Une telle retenue, que l'on pourrait situer sur le cours du Ternin en amont de la commune de Lucenay-l'Evêque, aurait par ailleurs un rôle d'écrêteur de crue en saison hivernale. Le Ternin est un des principaux affluents en rive droite de l'Arroux qu'il rejoint à hauteur de la ville d'Autun et dont les débits permettraient une recharge hivernale. Le débit moyen inter-annuel sur la période 1967-2008 à la station de Tavernay est de 3,7 m³/s. Notons par ailleurs que l'« Inventaire des ressources hydrauliques des vallées de l'Arroux et de la Bourbince » Ed du BRGM, Lyon, 1976, effectué par J. Cornet, faisait l'hypothèse de la création d'une retenue de 30 millions de m³ pour lutter contre les pollutions de l'Arroux en soutenant les débits d'étiages à hauteur de 3 m³/s pendant 4 mois et afin de favoriser la recharge de la nappe alluviale de l'Arroux. Cette proposition n'a jamais été suivie de mise en œuvre.

Au-delà de la recherche de nouvelles ressources en eau, il faut assurer la gestion de celles exploitées actuellement. Le changement climatique pourrait avoir pour conséquence des déficits d'écoulement plus importants avec des périodes d'étiage plus longues. Tous les acteurs doivent être sensibilisés au problème du manque d'eau en période d'étiage et chacun doit prendre conscience de la valeur de la ressource tout au long de l'année.

Si la prise de conscience doit être faite sur la gestion de la quantité de la ressource, le second point essentiel est la surveillance de la qualité de celle-ci. En effet, la faible protection naturelle des réservoirs exploités du fait de la proximité des nappes par rapport au sol implique une vigilance accrue.

Il doit y avoir une mise aux normes des stations d'épuration dont la plupart sont désuètes. Les pollutions médicamenteuses (élevage, ménages) sont de plus en plus importantes du fait de l'absence de traitement systématique au niveau des stations.

Toutes les sources de pollution doivent être répertoriées et traitées en fonction de l'impact qu'elles ont sur l'environnement.

D'après la fiche descriptive consultable sur le site internet <http://basol.ecologie.gouv.fr>, 225 000 tonnes de résidus de traitement d'uranifères, d'hydroxydes, terre et gravats sont stockés à « proximité immédiate du stade de Gueugnon et en bordure de la rivière Arroux » sur une superficie d'environ 6ha. L'hydrogéologie du site est caractérisée par la présence d'une nappe. Les mesures de radiation du sol ont été effectuées au début 2007 par la CRIIRAD (Commission de

Recherche et d'information Indépendantes sur la RADioactivité) et par l'ASN (Autorité de Sûreté Nucléaire). Du fait de la solution choisie par AREVA pour solutionner ce problème, à savoir, la couverture étanche des déchets plutôt qu'une extraction complète de ces derniers, il est nécessaire d'étudier de façon indépendante et officielle, l'impact sur l'Arroux de cette pollution à l'aval de Gueugnon en fonction du battement de la nappe et particulièrement en période de crue.

Un autre axe de prévention de la ressource en eau, tant d'un point de vue qualitatif que d'un point de vue quantitatif, serait de mettre un terme à l'exploitation des surépaisseurs des alluvions de l'Arroux avant que celles-ci ne soient complètement supprimées. Au vu de la forte présence de roches dures à l'affleurement au sein du bassin versant de l'Arroux, il semble que l'exploitation de ces roches sous forme de granulats concassés pourrait se substituer à l'utilisations actuelles des granulats roulés provenant des alluvions comme cela se fait depuis longtemps dans le bassin de la Loire. L'exploitation de matériaux alluvionnaires se fait au détriment de l'aquifère alluvial et de sa protection Cette exploitation risque d'anéantir de grandes zones à réserve d'eaux souterraines que sont les surépaisseurs d'alluvions (essentiellement dans la basse vallée de l'Arroux). Après exploitation de ces carrières, il reste de nombreuses étendues d'eau, mettant la nappe directement en contact avec l'atmosphère sans aucune protection contre les pollutions et favorisant l'évaporation.

Au-delà de cet exposé, une part du déficit d'écoulement par rapport aux précipitations sur le bassin versant peut être expliquée par les différentes pertes exposées précédemment (alimentation du canal du centre, écoulement de la nappe alluviale au droit de la station hydrologique de Digoin, recharge des nappes, sur le début de la période de l'étude, des exploitations houillères de la région de Montceau-les-Mines...). Il serait également intéressant d'effectuer une étude sur la possibilité de perte entre différents aquifères (par exemple entre nappes alluviales et aquifères sous-jacents des grès du Permien) ou encore, sur les pertes karstiques mentionnées sur la base de données du sous-sol (BSS) au niveau de terrains géologique calcaires.

BIBLIOGRAPHIE

- Gilli E., Mangan C., Mudry J., « Hydrogéologie: objets, méthodes, applications » Ed Dunod, Paris, 2008.
- Castany G., « Principes et méthode de l'hydrogéologie » Ed Dunod, Paris, 1982.
- Castany G., « Traité pratique des eaux souterraines » Ed Dunod, Paris, 1963.
- Musy A., « Hydrologie appliquée » Ed HGA, Bucarest, 1998.
- Marsily G. de, « Hydrogéologie quantitative » Ed Masson, Paris, 1981.
- Fouché O., « Cours d'hydrologie » Cnam, Paris, 2008
- Jauffret D., « Cartographie des zones alluviales dans le secteur sud-ouest du département de la Saône et Loire » Ed du BRGM, 1997.
- Delfour J., « Géologie de la partie sud du faisceau dévono-dinantien du Morvan » Ed du BRGM, 1987.
- Cornet J., « Inventaire des ressources hydrauliques des vallées de l'Arroux et de la Bourbince » Ed du BRGM, Lyon, 1976.
- Bouchet C., « Projet d'utilisation des eaux d'exhaures des houillères du bassin de Blanzay pour l'alimentation en eau de la CUCM. » Ed du BRGM, 1988.
- Collin J.J., Lienhardt G., Rat P., « Hydrogéologie de la région de Montceau-les-Mines, les grès rouge du Permien » Ed du BRGM, Lyon, 1965.
- Bonijoly D., « Apport de la géologie structurale pour la recherche de nouvelles ressources en eau » Ed du BRGM, 1988.
- Paquette Y., « Méthodologie pour la réalisation des dossiers d'arrêts définitifs de travaux miniers » Ineris, 2008.
- Donzeau M., Chèvremont P., Marteau P., « Notice explicative de la feuille de Paray-le-Monial à 1/50000 », Ed du BRGM, 2001.
- Donzeau M., Chèvremont P., Marteau P., Cuney M., Stussi J-M., Thièblemont D., Jauffret D., « Notice explicative de la feuille de Toulon sur Arroux à 1/50000 » Ed du BRGM, 2006.
- Muller S., « Etude préalable à la mise en œuvre du schéma d'aménagement et de gestion des eaux Arroux-Bourbince » SIEAB, 2009.
- Pannistat France, « Consommation industrielles de l'eau » 2002
- HYDROTOP, « forages individuels dans la vallée de l'Hérault » 2003

SITES INTERNET

- <http://www.brgm.fr>
Bureau de Recherches Géologiques et Minières.
Portail des sciences de la terre.

- <http://infoterre.brgm.fr>
Portail géomatique d'accès aux données géoscientifiques du BRGM (carte géologique)
Banque de données du sous-sol.

- <http://basias.brgm.fr>
Inventaire historique de sites industriels et activités de service.

- <http://basol.ecologie.gouv.fr>
Base de données sur les sites et sols pollués ou potentiellement pollués appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif.

- <http://www.adeseaufrance.fr>
Portail national d'Accès aux Données (qualitatives et quantitatives) sur les Eaux Souterraines.

- <http://www.hydro.eaufrance.fr>
Banque de données sur les mesures de hauteur d'eau de 3500 stations implantées sur les cours d'eau français.

- <http://climatheque.meteo.fr>
Service Internet d'accès aux données et produits de MétéoFrance.

- <http://www.bourgogne.ecologie.gouv.fr>
Service déconcentré du ministère de l'écologie et du développement durable.

- <http://www.eau-loire-bretagne.fr>
Agence de l'eau Loire-Bretagne.