

Modélisation Hydrologique Différentielle du fonctionnement des hydrosystèmes karstiques de la Sainte Baume (B. du Rh., Var ; France) ; réflexions sur l'utilité de mesures anciennes réanalysées avec un nouveau modèle (MHD)

Martin Philippe¹ ;

¹ Université d'Avignon, UMR ESPACE 7300 du CNRS, 74 Rue L. Pasteur, 84029 Avignon cedex

Résumé

Le massif karstique pyrénéo-provençal de la St Baume (B. du Rh, Var ; France) a fait l'objet, dans les années 80 de mesures hydrologiques, hydrochimiques et de vulnérabilité à la pollution (Coulter Ch, 1985, Martin Ph., 1991.a). Ces travaux ont permis une description sur plusieurs cycles des modalités de fonctionnement des différents hydrosystèmes. Une grande variété de comportements hydrologiques a été établie pour ces systèmes karstiques drainés par les sources des versants ouest et nord du massif, depuis le vallon de Saint-Pons (Gémenos) jusqu'aux gorges du Caramy (Tourves). La nouvelle Modélisation Hydrologique Différentielle qui a été conçue et formalisée à partir de l'exemple de la Fontaine de Vaucluse doit maintenant être testée avec d'autres données. Celles acquises sur la St Baume permettent de le faire. À partir des connaissances disponibles, l'article rend compte des apports de la MHD à la connaissance de ce massif. Il précise la façon dont la MHD peut venir compléter les approches classiques (ajustements de modèles descriptifs, relations entre fonctionnement et morphologie, analyses corrélatoires et spectrales simples et croisées...). Ces connaissances hydrologiques anciennes et nouvelles doivent aussi être replacées dans un cadre néotectonique nouveau. Il s'agit ainsi d'exploiter à nouveau des chroniques anciennes dont nous faisons l'hypothèse qu'elles contiennent des informations passées inaperçues et/ou inexploitées qui seront utiles à la gestion future de cet espace devenu un parc naturel régional. Au-delà, il s'agit de reposer le problème du rapport entre les mesures, qui sont les seules à contenir des informations brutes, mais dont la bancarisation est difficile et actuellement mal assurée, et les plus-values additionnelles qu'apportent les modélisations successives. Les données anciennes sont généralement peu utilisées, car elles n'ont pas été acquises avec les techniques les plus modernes. Elles présentent donc des limites qui appellent des approches appropriées, en particulier statistiques. Le MHD est aussi un pas en ce sens. S'il est évident qu'elles ont été acquises dans un cadre technique et paradigmatique différent rien ne dit qu'elles ne puissent être utiles pour tester de nouvelles modélisations ou conceptions, pour des comparaisons à quelques décennies de distances et donc pour une évaluation de l'évolution à long terme de situations environnementales.

La perte, trop souvent observée de données, est, non seulement, une perte financière et de temps évidente, mais aussi une perte irremplaçable d'informations. Les efforts faits actuellement pour retrouver les mesures de précipitations des XVIII^e et XIX^e siècles montrent bien l'importance que peuvent acquérir de telles données anciennes bien après leur collecte. Les karstologues auraient donc tout intérêt à réfléchir à une sauvegarde de ces informations endo et exokarstiques, souvent acquises avec beaucoup de difficultés en raison du milieu abordé.

Mots clés : Karst, hydrologie, Provence, fonctionnement karstique, sources, données anciennes

Differential Hydrological Modelling of the functioning of the karstic hydro systems of the Sainte Baume (B. du Rh., Var ; France); Reflections on the usefulness of old measurements reanalysed with a new model (DHM)

Abstract

The Pyrenean-Provençal karstic massif of St Baume (B. du Rh, Var ; France) was the subject of the hydrological, hydro chemical and pollution vulnerability measurements in the 1980s (Coulter Ch, 1985, Martin Ph., 1991.a). This work enabled a description over several cycles of the operating methods of the various hydro systems. A wide variety of hydrological behaviours has been established for these karstic systems drained by the springs on the western and northern slopes of the massif, from the St-Pons valley (Gémenos) to the Caramy gorges (Tourves). The new Differential Hydrological Modelling that has been designed and formalised based on the example of the Fontaine de Vaucluse now needs to be tested with other data. Those acquired on the St Baume allow this to be done. Based on the available knowledge, the article gives an account of the contributions of the DHM to the knowledge of this massif. It specifies how DHM can complement classical approaches (adjustments of descriptive models, relations between functioning and morphology, simple and cross-spectral correlational and spectral analyses...). His old and new hydrological knowledge must also be placed in a new neotectonic framework. It is thus a question of reusing old chronicles, which we hypothesise, contain unnoticed and/or unexploited information that will be useful for the future management of this area that has become a regional nature park. Beyond this, the problem of the relationship between the measurements, which are the only ones containing raw information but which are difficult to bank and currently poorly secured, and the additional added value provided by successive modelling must be addressed. Older data are generally little used because they were not acquired with the most modern techniques. They therefore have limitations that call for appropriate approaches, particularly statistical ones. MHD is also a step in this direction. While it is obvious that they were acquired in a different technical and paradigmatic framework, this does not mean that they cannot be useful for testing new modelling or designs, for comparisons over a few decades and thus for an assessment of the long-term evolution of environmental situations. The all too often observed loss of data is not only an obvious financial and time loss, but also an irreplaceable loss of information. Current efforts to retrieve rainfall measurements from the eighteenth and nineteenth centuries demonstrate the importance that such ancient data can acquire long after they have been collected. Karstologists would therefore be well advised to think about safeguarding this endo and exokarst information, which is often acquired with great difficulty due to the environment involved.

Key Words: Karst, hydrology, Provence, karstic functioning, sources, old data

¹ Corresponding author: philippe.martin@univ-avignon.fr

INTRODUCTION

Le massif de la St Baume est l'un des reliefs altiers les plus emblématiques de la basse Provence carbonatée. À cheval sur les départements des Bouches-du-Rhône et du Var il s'élève jusque vers une altitude de 1 100 m au niveau de la Haute Chaîne qui domine, au nord, le plateau du Plan d'Aups et au sud le poljé de Cuges, et le circuit automobile du Castelet. C'est un massif entièrement sédimentaire dans lequel les écoulements d'eau (pluie, mais parfois issus de fontes de neiges) se font à la fois en surface, en particulier à l'est (Caramy) et par des cheminements souterrains dont l'aven du Petit Saint Cassien, qui s'ouvre au niveau du Plan d'Aups, et le réseau Sabre qui s'étend sous le plateau de Mazaugues, sont les plus importants exemples. C'est donc un massif karstique, apparemment différenciellement karstifié (Nicod J., 1967).

Des travaux assez récents (Tassy A., 2012) montrent que ce massif a dû être l'objet de mouvements tectoniques, d'un soulèvement différentiel selon un axe nord-est – sud-ouest qui conduit à exacerber à la fois l'élévation globale (soulèvement généralisé) et un potentiel karstique différentiel entre le nord-est soulevé et le sud-ouest en position stable ou légèrement déprimée, ce que la topographie ne montre pas vraiment en raison de l'existence à l'ouest de la Haute chaîne et à l'est de « bas » plateaux. Lesquels auraient été encore plus bas sans ce mouvement de bascule. On peut d'ailleurs voir dans le réseau Sabre et le fonctionnement de la source de la Figuière des traces de cette situation avant ces mouvements tectoniques, lesquels pour l'essentiel ne remonteraient pas plus loin que le Pliocène (Tassy A., 2012, p. 307). Plus à l'ouest, au niveau du Plan d'Aups, l'aven du Petit St Cassien, la grotte de la Castelette et la Foux de Nans par exemple doivent être réinterprétés en fonction de ces nouvelles connaissances. Pour notre part nous essayerons de réanalyser nos résultats des années 80 à l'aune de ces données.

L'histoire géologique du massif de la St Baume est donc longue et complexe. Il appartient à la catégorie des reliefs dits pyrénéo-provençaux, très largement issus d'une série sédimentaire, essentiellement d'âge secondaire, qui a glissé (nappe) du sud vers le nord et a formé des plis dont il ne reste, dans certains cas, qu'un des flans couchés. Tel est le cas de la Haute Chaîne qui se présente comme une série renversée (les couches les plus récentes sont sous les plus anciennes). Ce karst est drainé par toute une série de sources depuis celle de Saint-Pons dans le vallon paysager du même nom à l'ouest, près de Gémenos, jusqu'à celle de la Figuière dans les gorges du Caramy à l'est, près de Tourves. Entre, comme source du Cauron il faut noter la présence de la Foux de Nans au fonctionnement très temporaire, mais particulièrement brutal. Le versant sud lui ne possède pas de sources importantes ce qui ne manque pas d'interroger et conduit à faire l'hypothèse qu'une partie des eaux tombées sur le massif de la St Baume pourrait ressortir en mer par des sources sous-marines. Le bilan globalement déficitaire réalisé dans les années 1980 irait aussi dans ce sens (Martin Ph., 1991.a.b.c.d.e, 1992, 1993).

Si la Foux de Nans est une source qui fonctionne par « crevaison », il n'en est pas de même de la source de Saint-Pons (associée à une galerie drainante). Cette source a un fonctionnement très régulier avec une entrée en crue très progressive et une décrue, puis un tarissement, très lents. Ceci ne manque pas d'interroger puisque son bassin versant s'étend sous la terminaison occidentale de la Haute Chaîne, laquelle s'élève de plus de 1 000 m au-dessus de la source. Peut-être faut-il voir dans la possibilité qu'ont ces eaux de déposer une charge dissoute de carbonates assez près de l'exutoire actuel la conséquence de ce fonctionnement curieux en milieu karstique, que ces dépôts renforcent peut-être ? Ces dépôts sous la forme de travertins biogéochimiques (Martin Ph., 1986) ont donné lieu à la constitution de petits barrages à l'arrière desquels au moins des vasques et peut-être de petits lacs ont pu se former. En se comblant ils ont donné lieu à des plans d'autant plus remarquables, en cette Provence aride au relief chahuté, qu'ils pouvaient être irrigués par les eaux de la source, ce que n'ont pas manqué de faire, semble-t-il, des moniales cisterciennes qui auraient élevé des chevaux et qui ont engagé la construction d'un édifice religieux, dont, en particulier, une nef collatérale qui reste visible dans cet espace aujourd'hui public qui appelle toutefois à la méditation.

Le massif de la St Baume est donc un haut lieu patrimonial, touristique et hydrologique, voire karstique, pour lequel il conviendrait de conserver toutes les mesures ou observations qui y ont été effectuées. On peut penser que les programmes actuels ont ce souci. Il n'en fut pas de même dans les années 70 – 90 durant lesquelles les mesures étaient plus difficiles à réaliser, moins nombreuses et moins précises que celles qui sont faites actuellement. Le but était alors bien plus de décrire de nouveaux fonctionnements ou phénomènes que de banaliser des données. La St Baume dans les années 80 – 90 apparaissait comme un massif karstique hydrologiquement peu étudié, même si elle possédait des seuils en béton assez sophistiqués sur la haute Huveaune et le haut Caramy en raison des crues éclair de ces rivières. Son fonctionnement a commencé à être mieux connu au travers de deux thèses (Coulter Ch., 1985 ; Martin Ph., 1991.a) durant lesquelles de nombreuses données ont été produites, mais qui n'ont pas donné lieu à un archivage systématique. Or il apparaît aujourd'hui que ces observations, données, mesures, etc. vont très certainement disparaître avec la fin de la vie professionnelle de leurs auteurs. Ceci ne serait pas un problème si elles ne recelaient pas vraisemblablement des informations passées inaperçues que de nouveaux traitements pourraient révéler.

Par ailleurs il est clair que ces données quelles que soient leurs limites et leurs défauts, ne pourront plus jamais être acquises de nouveau. On ne remonte pas le temps. Et si en hydrodynamique on peut peut-être avancer une hypothèse de stationnarité, cela est plus discutable en ce qui concerne la chimie des eaux qui peut avoir évolué en fonction de pCO₂ liées

à la croissance de la végétation. Cela l'est encore moins pour ce qui est d'analyses bactériologiques réalisées alors que le massif était extrêmement peu occupé et parcouru. Dès lors on peut penser que 25 ans plus tard, ces données peuvent avoir une utilité et que cela sera *a fortiori* vrai dans 50 ou 100 ans. Sans pouvoir vraiment apporter de solutions à ce problème, il nous paraît qu'il doit être posé. Pour appuyer l'idée que ces données peuvent encore fournir une information utile, nous allons appliquer à ces chroniques de débits des années 80 un nouveau modèle hydrologique différentiel qui a, en particulier, été pensé pour des données de ce type, de résolution temporelle grossière (débits moyens journaliers) et qui ont été acquises avec des matériels un peu anciens, confiés à des doctorants (limnigraphe à flotteur et à tambour enregistrant sur papier les hauteurs d'eau).

Notre objectif est donc double dans ce texte : attirer l'attention sur des données anciennes qui pourraient se révéler fort utiles et tester avec de telles données le MHD pour voir s'il permet de retrouver certaines conclusions portées il y a 25 ans en usant d'autres méthodes. Se faisant il démontrerait son utilité pour des données et des situations plus actuelles, voire permettrait d'aboutir à d'autres idées.

Le Modèle Hydrologique Différentiel (MHD)

La Fontaine de Vaucluse est une source karstique vauclusienne qui a depuis longtemps attiré l'attention (Martin Ph., Kabo R., 2015). On dispose donc pour cette source de longues chroniques de débits (quasiment non lacunaires) qui s'échelonnent de 1877 à l'actuel, mais qui sont de qualité variable et croissante avec le temps. La correction de ces débits a été engagée, mais n'est pas actuellement totalement satisfaisante (Cognard-Plancq A. L. et al., 2006.a.b). Pour pouvoir envisager d'extraire de l'information sur la série la plus ancienne (1877 – 1946) il faut disposer d'outils. C'est un des objectifs du MHD : aborder de façon statistique ces informations, plus ou moins fiables, de façon à « moyenner » les erreurs et les approximations liées aux méthodes anciennes.

Globalement et historiquement l'information la plus disponible et la plus fournie est celle des débits. C'est donc à partir de cette variable que nous avons conçu notre modèle. Lequel semble toutefois adapté à des études piézométriques, à des débits de surface et peut-être à d'autres variables comme la température de l'eau (travaux en cours). Le débit peut toutefois être compris comme une variable très intégratrice, laquelle est le produit d'une charge et d'une capacité de transit et de transfert de pression en tous lieux et à tout moment de l'aquifère, modulo les pertes de charge. Le débit est donc lié à l'état d'imbibition d'un aquifère. Lequel état doit pouvoir être décrit.

Ainsi pour aller plus loin dans l'étude de tels hydrosystèmes karstiques, il est indispensable de pouvoir faire une étude statistique des états d'imbibition d'un aquifère (du moins tels que nous pouvons les apprécier d'abord au travers des débits) en mettant en œuvre la résolution temporelle la plus fine disponible (débit moyen journalier). C'est ce à quoi dans ce texte s'attache le MHD basé sur l'idée de différentiation et sur le principe de covariance.

Le débit traduit donc, dans une certaine mesure, la présence plus ou moins importante d'un volume d'eau dans l'aquifère, car il faut aussi prendre en compte que, dans les karsts, les mises en charge sont souvent locales (dans des galeries, des puits... mais pas dans toutes les anfractuosités, sauf au bout d'un temps très long et pour des parties basses généralement (zones noyée et vadose). Elles ne correspondent pas à un remplissage total du volume karstique (vides de roche, quelle qu'en soit l'origine : détente, expansion, érosion...) existant sous la limite supérieure atteinte par l'eau en phase de crue, contrairement à ce qui peut se passer dans un aquifère de nappe à matériaux souvent détritiques (alluvions...) dont la porosité est plus ou moins homogène et la continuité hydraulique bien plus régulière dans toutes les directions (isotropie). Ce volume empli d'eau correspond donc à un état d'inhibition de l'aquifère qui doit pouvoir être approché par le calcul d'un indice dit volumique (*I_v*) pouvant être déterminé (ici, en première analyse avec des débits moyens journaliers) à différents pas de temps, mais dont le plus fin théorique correspond à la résolution de l'information, en fait au double de la résolution puisqu'il faut deux pas pour faire une différence.

Un tel indice volumique peut être vu comme traduisant le rapport entre les entrées et les sorties de l'aquifère, sous la contrainte de la géométrie karstique fonctionnelle (niveau et zone plus ou moins remplie) envisagée ci-dessus qui dépend elle-même de la géométrie morphologique du dit karst, laquelle dépend d'éléments structuraux (géologiques : lithologie, fracturation...) et de la paléogéographie du karst considéré (aplanissement, évolution du niveau de base, cavernement, remplissage...). Dans le cas de la St Baume, il semble aujourd'hui nécessaire d'introduire en plus des mouvements tectoniques différentiels assez importants (Tassy A., 2012).

Par construction, cet indice peut être étudié chronologiquement, et/ou spatialement, et/ou statistiquement. En théorie, il devrait pouvoir être mis en rapport avec la variation de la charge approximée localement par la mesure d'un niveau piézométrique mesuré *in situ* (dans les cavités du plateau atteignant la zone noyée) par un Lurographe par exemple ou une sonde *ad hoc* (type : miniDiver, Solinst, Hobo...).

Discrétisation et différenciation

Le MHD est issu du modèle de Maillat, des modalités de calcul du coefficient de tarissement et de celles de calcul du volume dynamique (Martin Ph., soumis). Pour la Fontaine de Vaucluse, mais aussi pour d'autres sources il apparaît une variation du coefficient de tarissement au fil des récessions, ou des tarissements. Dès lors il n'est plus possible d'avoir un seul paramètre (α) et il faut recourir à d'autres modèles de décroissance des débits comme le modèle de Horton qui est une double exponentielle à deux paramètres (a et m). Ceci peut parfaitement être pratiqué, mais conduit à mettre en œuvre différents modèles qui ne sont pas, ou difficilement, reliables entre eux, afin de comparer diverses situations, différents exutoires karstiques. Pour contourner ce problème, l'une des solutions est de discrétiser l'information et de modéliser statistiquement sa variation. C'est ce que se propose de faire le MHD. On va donc essayer de rendre compte de variations limitées entre deux pas, au travers de leur statistique.

L'idée qui sera mise en œuvre ici, consiste donc à discrétiser la mesure hydrologique, puis à quantifier l'état de l'aquifère à partir de deux valeurs consécutives (différenciation), afin d'étudier la variation du rapport ainsi établi, au mieux, de pas de mesure en pas de mesure. En répétant cette opération, on peut établir une statistique dont le modèle devrait pouvoir caractériser l'état de l'aquifère de façon générale, si on considère toutes les données disponibles, et de façon particulière, si on considère certaines phases. Certaines variations caractérisant des situations de hautes eaux et d'autres de basses eaux.

Le Modèle Hydrologique Différentiel (MHD) auquel nous sommes arrivés permet de calculer un indice, ici au mieux journalier, dit Iv_b (avec b pour : baisse des débits). Cette solution résout les problèmes de calage très classiques lorsque l'on essaye de décrire une phase hydrologique particulière puisqu'il n'y a aucun choix à faire si on considère l'ensemble de la chronique à part repérer les étiages afin de découper des cycles. Dès lors on devrait pouvoir décrire n situations locales avec le même modèle et obtenir des comparaisons plus robustes. Dans cette perspective il convient d'envisager l'applicabilité du MHD dans différentes situations, y compris pour des données anciennes de qualité limitée, mais aussi de voir son application à d'autres variables (travail en cours). Ces approches permettront de tester la validité de cette description et fourniront des indications sur l'interprétation des paramètres.

Afin d'obtenir des relations linéaires dans le cas des tarissements des cycles de la Fontaine de Vaucluse, il nous est apparu nécessaire de remplacer le modèle exponentiel par un autre modèle en introduisant le logarithme du temps au dénominateur (Martin Ph., soumis). C'est en fait le changement principal outre la réduction du pas de calcul. Ceci conduit à introduire un pas de temps variable au fil du temps des phases hydrologiques. D'une certaine façon la résolution de l'observation du phénomène diminue avec la progression du phénomène, le déroulement par exemple d'un cycle.

MHD et calcul de l'indice Iv_b

En formalisant la logique ci-dessus évoquée et en nous fondant sur la forme de l'équation du volume dynamique, nous proposons un indicateur de la forme (Martin Ph., soumis) :

$$Iv_b = \ln \left(0,0864 \frac{Q_t}{\frac{\ln(Q_t) - \ln(Q_{t+1})}{\ln(t_{t+1}) - \ln(t_t)}} \right) \quad (1)$$

t_t étant le premier jour de la phase hydrologique considérée choisie pour chaque calcul, généralement le cycle, mais ce peut être une pointe de crue initiant une récession de fin de cycle, etc.

t_{t+1} étant le dernier jour de la période hydrologique choisie pour chaque calcul.

0,0864 est la constante de temps qui a été divisée par 10 000 pour des raisons de praticité.

Le premier calcul est effectué de Q_t (débit au moment initial t) à Q_{t+1} (débit au moment suivant $t+1$ dépendant de la résolution de l'information) soit ici sur 48 h ou 2 jours si l'information est sous la forme de débits moyens journaliers, mais tout pas de temps peut être utilisé. Le calcul est ensuite séquentiel. Comme le début d'un cycle est le moment postérieur à l'étiage au sens strict Q_t doit correspondre à ce moment, pour une étude de cycles. Q_{t+1} correspondra au second jour de chaque cycle, etc. Mais Q_t peut être aussi le jour de pied de crue pour une étude des montées de crue (Iv_m), ou une pointe de crue pour une récession, etc. L'indice Iv_b peut donc être décliné en fonction des conditions hydrologiques.

L'écart entre Q_t et Q_{t+1} dépend de la résolution de la mesure, ou de toutes autres (information dégradée) qui seraient calculées à partir de la résolution initiale. Ceci est particulièrement possible si la résolution de mesure est très fine (5 mn par exemple). La variation de la statistique des Iv_b (ou Iv_m) en fonction de la dégradation de l'information reste à étudier. Il est aisé de voir que cet indice n'est pas calculable si les débits sont égaux. De même sous cette forme (eq.1) il ne peut correspondre qu'à des baisses de débit. Pour rendre compte des hausses, il suffit d'inverser $\ln(Q_t)$ et $\ln(Q_{t+1})$. On obtient alors un indice sur les montées de crues dit : Iv_m . Le numérateur du dénominateur du MHD traduit donc la façon dont

varient les écarts des logarithmes de débits consécutifs et le dénominateur du dénominateur la façon dont varient les écarts des logarithmes de temps successifs, cela au fil de la progression d'un cycle par exemple.

En d'autres termes, quand la variation des débits est forte (phase de décrue de crues de début de cycle par exemple) l'écart des logarithmes des temps correspond généralement à une valeur relativement importante. Par contre lorsque la variation des débits est faible (phase finale de cycle) l'écart des logarithmes des temps correspond à une toute petite valeur. Ainsi par exemple $\ln(2) - \ln(1) = 0,693$, mais : $\ln(250) - \ln(249) = 0,004$. La valeur de l'écart temporel diminue donc de 0,69 à presque 0 lorsque t tend vers l'infini. Nous avons donc là en fait deux fonctions, l'une pour les débits, l'autre pour le temps, qui sont comparées pas à pas. Ce modèle a été appliqué aux cycles disponibles de certaines sources de la St Baume : Source de Saint-Pons Galerie drainante de Saint-Pons, Encanaux supérieurs, Font Alaman, Cauron (Foux de Nans et source des Filles), source de la Figuière.

Qualité des données et stabilité structurelle des distributions

L'ensemble de ces données a été acquis par Ch. Coulier de 1983 à 1984 (Sce de Saint-Pons et Galerie, Encanaux supérieur et Cauron) puis par Ph. Martin (source de Saint-Pons et Galerie, Encanaux supérieur et Cauron, Font Alaman, et source de la Figuière) de 1984 à 1986, sauf pour la Font Alaman qui a été suivie après (1986 – 1991) et sur la base d'un suivi personnel des limnigraphes qui avaient été prêtés par le SRAE (Service régional d'aménagement des eaux) d'Aix-en-Provence. Ces matériels étaient des limnigraphes à flotteur et à tambour avec un enregistrement papier de marque OTT pour certains (Fig.1). Les jaugeages étaient faits grâce à un micromoulinet à hélices prêté aussi pendant plusieurs années par le SRAE. Tous les dépouillements ont été réalisés par les deux doctorants lors de leur travail de thèse. Ces conditions conduisent à disposer de données assez grossières (débits moyens journaliers), mais très homogènes quant à leur production et non lacunaire

III

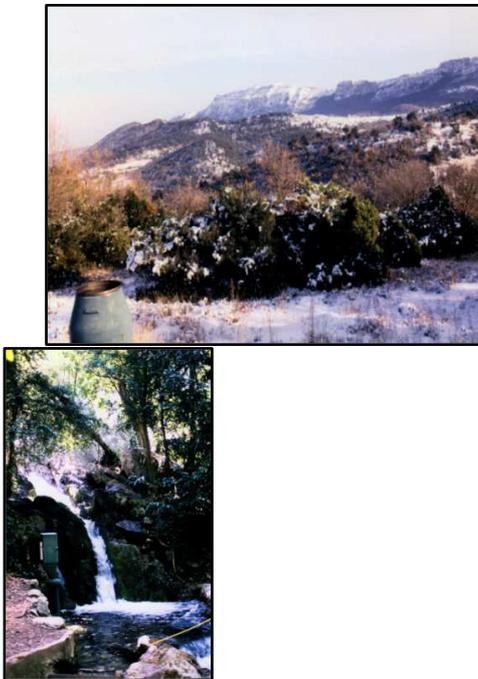


Fig.1 – Face nord de la chaîne de la St Baume lors de l'hiver 1984 – 1985 et source de Saint-Pons en été équipée d'un limnigraphe à papier OTT (Crédit photo Ph. Martin).

Le pas de temps journalier a été « imposé » par la résolution de l'enregistrement (le cylindre faisait un tour en une semaine), la taille de la plume et la qualité du papier qui « buvait » un peu l'encre. Il aurait été (et il est peut-être encore) possible à partir des bandes conservées d'atteindre une résolution temporelle de quelques heures (4 ?). Ces conditions techniques, aujourd'hui totalement dépassées, conduisaient à installer le pas de temps de la journée comme le « bon » découpage temporel. Le matériel aujourd'hui disponible, qui autorise des résolutions temporelles bien plus fines, montre qu'il existe des phénomènes fugaces, qui ne sont pas sans intérêt, et que seule une résolution à la minute, ou presque, permet de voir. Ces données, par rapport aux standards les plus actuels, sont donc assez grossières. Il est donc intéressant de voir comment le MHD peut en rendre compte et retrouver, ou non, les fonctionnements connus par ailleurs par d'autres approches.

Plus tard, il conviendra, à partir de chroniques par exemple à 15 mn nouvellement acquises, de leur appliquer le protocole MHD, puis de les dégrader (pas à 1 h, 4 h, 1 jour, par exemple) afin de voir d'une part la stationnarité des fonctionnements et d'autre part le rôle joué par le pas dans les résultats. Nous pourrions ainsi voir si ceux-ci varient selon une loi, ce qui traduirait un comportement hydrodynamique fractal, c'est-à-dire une structuration dans l'ordre des échelles de temps ; les chroniques peuvent être fractales, quelles que soient les échelles de temps, mais de moins en moins au fur et à mesure que le pas de temps augmente.

APPLICATION AUX SOURCES DE LA SAINTE-BAUME

L'application du MHD est globalement satisfaisante sur les séries disponibles. Dans la mesure où nous ne disposons pas d'un nombre suffisant de cycles par source pour faire une analyse diachronique à cette échelle, nous n'irons pas plus loin dans ce sens. Cela étant, il faut s'interroger sur le type et le mode de variation d' Iv_b au cours des différents cycles des différentes sources. Il apparaît possible de faire, avec toutes les valeurs d' Iv_b calculées pour chaque source, une statistique dont la distribution peut théoriquement être recherchée. La modélisation générale réalisée, pour toutes les sources, sous cette forme, est bonne. Ceci conduit à établir comme globalement gaussiennes ces distributions. Nous pouvons donc caractériser ces sources par la moyenne et l'écart type des Iv_b . Il convient ensuite d'essayer de rapprocher ces descripteurs d'autres indicateurs de fonctionnement de ces systèmes karstiques.

La Font Alaman

La Font Alaman (Fig.2) présente pour le cycle 1988 – 1989 un assez bon ajustement. L'ensemble des Iv_b calculés sur les cycles de 1986 à 1991 correspond une distribution gaussienne (Fig.3). Seules quelques très fortes valeurs de Iv_b s'écartent de la droite de Henri.

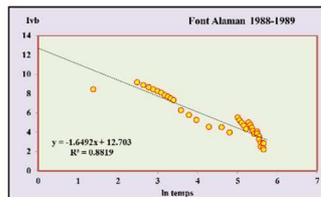


Fig.2 – Ajustement d'un modèle de puissance sur les valeurs de Iv_b du cycle 88-89 de la Font Alaman

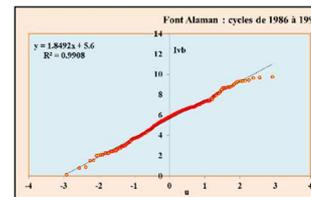


Fig.3 – Ajustement d'une droite de Henri sur les valeurs de Iv_b de l'ensemble des cycles de la Font Alaman entre 1986 et 1991

La source de la Figuière

Le cycle 1984 – 1985 de la source de la Figuière livre un assez bon ajustement à un modèle de puissance (Fig.4), même s'il apparaît une légère courbure dans la répartition des points.

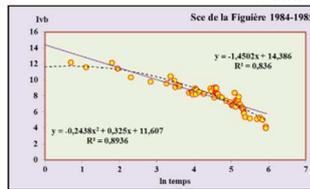


Fig.4 – Ajustement de modèles de puissance sur les valeurs de l_{vb} du cycle 84-85 de la source de la Figuière

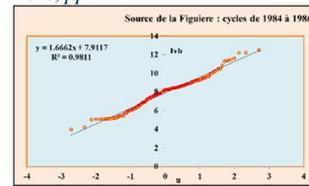


Fig.5 – Ajustement d'une droite de Henri sur les valeurs de l_{vb} de l'ensemble des cycles de la source de la Figuière entre 1984 et 1986.

La statistique des valeurs de l_{vb} déterminées sur l'ensemble des cycles (Fig.5) correspond assez bien à un modèle gaussien comme le montre l'ajustement de la droite de Henri. Dans le détail il apparaît une « ondulation » qui traduit une distribution à deux maxima. En fait cette distribution globale subgaussienne est une combinaison de deux distributions. Ceci est conforme à ce que nous savons du fonctionnement de cette source à partir, par exemple, de sa fonction d'intercorrélation (corrélogramme croisé pluies - débits). Ce dernier, comme réponse impulsionnelle du système, fait apparaître deux régimes. L'un correspond à une réponse rapide et forte peu après les pluies (effet karstique lié à un réseau bien établi, spéléologiquement explorable). L'autre à une réponse lente qui permet le maintien de débits assez moyens après la crue et qui avait été rapproché de l'existence de formations crétacées gréseuses. Il faut peut-être aujourd'hui ajouter une réadaptation encore insuffisante du réseau de drainage le plus bas, à la suite de la néotectonique mise en évidence assez récemment.

La source de Saint-Pons (de l'Abbaye et Galerie drainante)

Les valeurs de l_{vb} du cycle 84 – 85 calculées sur la somme des débits journaliers de la source et de la galerie drainante s'ajustent pas très bien à un modèle puissance simple (Fig.6), en raison d'une courbure manifeste. Elle est d'ailleurs plus forte avec les valeurs issues des seuls débits de la source. Sur la base de ce que nous avons dit pour la Figuière, cette courbure doit vraisemblablement être mise en relation avec le caractère extrêmement pondéré de cette émergence qui a un fonctionnement quasiment de nappe. Donc plus le système est karstique au sens d'un drainage efficace correspondant à un réseau optimal, mais sans plus (pas sur dimensionné), plus la relation l_{vb} vs $\ln(t)$ est conforme à un modèle de puissance simple. Les fortes valeurs de l_{vb} de début de cycle (phase de recharge) qui correspondent à des baisses assez rapides du débit ne se rencontrent pas avec ce type de fonctionnement. La montée des crues est lente et donc longue, ce qui tend à déporter les premiers points dans la figure 6 vers la droite.

Lors de certains cycles (1984 – 85 par exemple) à la source on observe une quasi-stabilité des valeurs de l_{vb} entre 8 et 10, puis un effondrement de sa valeur en fin de cycle. Mais le cycle 84-85 a été particulier. Il s'est terminé fin novembre 1985 en raison de pluies automnales particulièrement tardives. Ces éléments confortent l'idée d'un système mal drainé. La courbure mise en évidence pourrait donc être interprétée comme l'indice d'un drainage difficile vers les exutoires karstiques. Comme si, malgré la hauteur de chute observable de la Haute chaîne au fond du vallon, ce système ne pouvait donner lieu à un drainage fonctionnel comparable à celui de la Foux de Nans ou de la Figuière. Si tel est le cas, le coefficient de courbure du modèle parabolique traduirait un écart à un drainage de type karstique efficace (drains hiérarchisés de taille croissante bien connectés qui produisent des crues rapides et fortes).

Si on intègre l'idée d'un basculement progressif de la Provence carbonatée et de la St Baume en particulier (Tassy A., 2012) du nord-est vers le sud-ouest, on peut penser que la Figuière doit plutôt être en train de réajuster son réseau de drainage remis en cause par une néo tectonique positive, et que la source de Saint-Pons est marquée par une néotectonique négative qui doit rendre plus difficile l'écoulement de l'eau. Ceci ayant pour conséquences, aux moins relatives, les importants dépôts de travertin qui comblent le vallon de Saint-Pons et qui débutent près de la source. Ces dépôts ont en outre certainement joué un rôle dans l'obstruction de sorties d'eau comme semble l'indiquer la galerie drainante qui les recoupe.

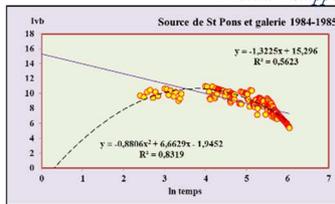


Fig.6 – Ajustement de modèles de puissance sur les valeurs de lv_b du cycle 84-85 sur la somme des sorties d'eau (source + galerie) dans le vallon de Saint-Pons.

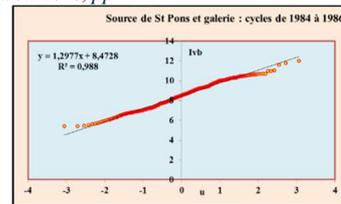


Fig.7 – Ajustement d'une droite de Henri sur les valeurs de lv_b de l'ensemble des cycles de la source de Saint-Pons et de la Galerie drainante entre 1984 et 1986.

La totalité de la série des lv_b calculés lors des cycles enregistrés entre 1984 et 1986 montre un caractère gaussien assez évident (Fig.7). Seuls quelques points s'écartent de la droite de Henri aux extrémités.

Source des Encanaux supérieurs

Avec la source des Encanaux supérieurs apparaît une variabilité certaine (Fig.8), mais qui est contenue dans un canal assez étroit. Il n'y a pas de courbure. Cela renvoie aux modalités de fonctionnement de cette source à crues notables et récessions assez rapides, ce qui correspond à un aquifère bien drainé et qui est en lien avec un réseau spéléologiquement exploré.

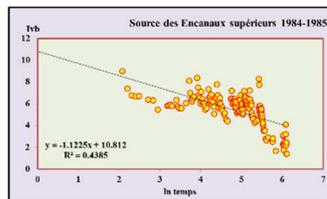


Fig.8 – Ajustement d'un modèle de puissance sur les valeurs de lv_b du cycle 84-85 de la source des Encanaux supérieurs.

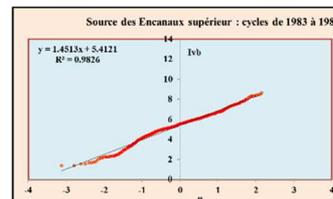


Fig.9 – Ajustement d'une droite de Henri sur les valeurs de lv_b de l'ensemble des cycles de la source des Encanaux supérieurs entre 1983 et 1986.

Si l'ajustement pour les valeurs de lv_b comprise entre -1 et 4 sigma est tout à fait conforme à la droite de Henry, les faibles valeurs de lv_b entre -3 sigma et -1 sigma suivent cette loi de façon plus incertaine (Fig.9). Cela est peut être lié à une autre sortie d'eau située plus bas dite Encanaux inférieur, mais qui n'a pas été instrumentée. Seul un suivi hebdomadaire a été réalisé.

Les sources du Cauron : Foux de Nans et sources des Filles

Les sources du Cauron — la Foux de Nans quand elle fonctionne et les sources des Filles qui doivent en être un sous écoulement — livrent une variation de lv_b en fonction du temps assez particulière (Fig.10). On observe une grande dispersion, mais pas de courbure. Les alignements subverticaux de points correspondent à des récessions assez rapides et les points extrêmes pour chacune de ces phases à des taux de variation du débit forts, en particulier pour les points les plus hauts, mais faibles pour les points les plus bas. Ce qui est remarquable ici c'est l'écart entre ces points hauts et bas. Il marque très certainement le caractère karstique de cette source (crues majeures et débits faibles ou nuls d'été).

L'ampleur de la variation des lv_b correspond donc à l'ampleur de la variation des débits du pied de crue à la pointe de crue et de la pointe de crue à la fin de la décrue, selon les phases étudiées.



Fig.10 – Ajustement d'un modèle puissance sur les valeurs de lv_b du cycle 84-85 des sources du Cauron. Fig.11 – Ajustement d'une droite de Henri sur les valeurs de lv_b de l'ensemble des cycles des sources du Cauron entre 1983 et 1986.

En d'autres termes, plus la source modélisée connaît de brusques montées de débit et de tout aussi rapides baisses qui viennent mourir sur de très faibles variations de débit en fin de récession, plus la dispersion des points caractérisant chaque phase du cycle sera forte. Cette dispersion peut donc être considérée comme traduisant une forte karstification fonctionnelle. On voit ainsi comment elle croit de la Font Alaman ou de la Figuière où elle est faible, aux Encaux supérieurs et aux sources du Cauron, où elle est forte. Malgré cette dispersion des valeurs de lv_b , nous obtenons un graphique (Fig.11) qui montre un assez bon ajustement de la distribution à la loi de Henri. Les extrémités entre -3 et -2σ et entre 2 et 3σ sont toutefois assez mal ajustées, mais les données de cet ordre sont peu nombreuses. La forme de la partie de l'alignement vers -3 -2σ laisse penser qu'il y a pour les valeurs de lv_b correspondantes une petite distribution spécifique qui pourrait être étudiée.

Arrivés à ce stade il faut considérer pour chaque source, la valeur de la moyenne et celle de l'écart type de ces distributions gaussiennes. Ces paramètres peuvent être rapprochés d'autres indicateurs du fonctionnement hydrologique comme nous allons le voir.

PARAMÈTRES ISSUS DE LA MODELISATION MHD

Le MHD fournit donc un certain nombre d'indicateurs synthétiques dont il convient de préciser le sens, ce que peut nous permettre la diversité de fonctionnements karstiques du massif de la St Baume.

Ajustement des phases hydrologiques

Les ajustements des phases hydrologiques, des cycles en particulier, mais ce pourrait être des récessions de fin de cycle, conduisent à deux valeurs (hors coefficient de détermination) : la pente du modèle de puissance et sa constante. Ces valeurs peuvent être étudiées de façon diachronique quand le nombre de phases hydrologiques disponibles est suffisant. Elles permettent aussi d'arriver à une description des états successifs d'un système karstique en calculant la surface du triangle rectangle apparaissant sous le modèle puissance qui en est l'hypoténuse. Le nombre de cycles est pour les sources de la St Baume insuffisant pour faire une telle analyse, mais elle a été réalisée pour la Fontaine de Vacluse (Martin Ph., soumis).

Paramètre Ac de dispersion

Le MHD permet de calculer un paramètre de dispersion. Il s'agit d'essayer de caractériser la réaction du système karstique en fonction de son état d'imbibition et de l'importance des précipitations qu'il reçoit au cours de la phase hydrologique étudiée. Cela revient à se demander si le système actif de drainage lisse beaucoup (Saint-Pons) ou très peu (Foux de Nans) le signal pluie en fonction de son réseau fonctionnel de drainage et comment il le fait en fonction de l'état de ses réserves. L'hypothèse centrale étant que plus le karst est rempli, plus la réaction à une pluie, même faible, sera forte relativement (en comparaison aux autres réactions de ce même système), à ses exutoires.

Pour se faire il faut calculer les écarts (résidus) à un modèle de puissance puis sommer ces écarts par moment, ici de décroissance des débits (de la pointe de crue à la montée de crue suivante). Le plus simple est d'ajuster un modèle de puissance simple (de la forme $y = ax^b$) comme dans les figures présentées ci-dessus.

Toutefois, une meilleure précision est obtenue en ajustant, sur le logarithme des lv_b en fonction du logarithme du temps ($\ln(t)$) un modèle parabolique. Ce dernier peut modéliser les courbures comme avec la source de la Figuière ou avec la somme des écoulements de Saint-Pons (source + galerie). Ceci évite de biaiser le calcul par un élément structurel, la courbure, qui se déploie à l'échelle de la phase hydrologique. On obtient ainsi une valeur minimale et une valeur maximale pour chaque récession du cycle. On recherche ensuite les valeurs minimale et maximale du cycle. On fait la somme de

leurs valeurs absolues. On obtient ainsi une mesure de l'amplitude absolue observée sur un cycle. Nous appellerons donc cet indicateur : A_C , et A_R si ce sont des récessions de fin de cycle qui sont étudiées.

Si la phase hydrologique n'est pas un cycle, mais par exemple une récession de fin de cycle, on obtient directement les valeurs du maximum et du minimum. Si on dispose de plusieurs phases hydrologiques (cycles ou récession) il semble, mais les tests sont en cours, que ce soit l'amplitude maximale obtenue lors d'une phase (cycle ou récession) qu'il faille considérer. Ceci correspond à un test maximaliste du fonctionnement du système karstique. Il n'est pas non plus impossible d'envisager une étude diachronique de cet indice à croiser par exemple avec la situation d'imbibition lors de la phase hydrologique précédente et avec l'importance et/ou l'intensité des pluies.

A_C traduit donc la façon dont un système karstique varie dans son fonctionnement entre la situation maximale de pointe de crue et, généralement, la situation minimale de fin de récession ou de tarissement. Les calculs faits sur le cycle 1984 – 1985 (et 1988 – 1989 pour la Font Alaman) sur la St Baume montrent que les valeurs de A_C s'échelonnent entre 2,4 à la Font Alaman et 20,2 aux sources du Cauron. Cette gradation correspond bien à ce que l'on sait par ailleurs du fonctionnement de ces hydrosystèmes (corrélogrammes croisés par exemple, etc.).

Ajustement gaussien de la statistique des valeurs de I_v

Il est ensuite possible, d'étudier non-pas des phases hydrologiques particulières, voire leurs successions, mais de rechercher des paramètres significatifs pour l'ensemble des distributions des valeurs de I_v . Nous avons vu ci-dessus le très bon ajustement des séries statistiques de I_v à un modèle de Henri ce qui permet de les caractériser comme des distributions gaussiennes (ou subgaussiennes). Dès lors les paramètres du modèle régressif correspondent à la moyenne (constante de la droite) et à l'écart type de la distribution (pente de la droite).

Les graphiques ci-dessus montrent que l'une comme l'autre varie, entre 4,9 aux sources du Cauron et 8,5 à Saint-Pons et de 1,3 à Saint-Pons à 1,7 aux sources du Cauron, pour l'écart type. Donc plus le système est capacitif (Saint-Pons) plus la valeur de la moyenne est haute et plus l'écart type est bas, et inversement. Le croisement des valeurs moyennes de ces deux paramètres fait apparaître une relation qui montre une liaison entre eux très probable même si, avec les données que nous avons, la dispersion reste forte ($R^2 = 0,3$). Il devient dès lors possible de croiser un certain nombre de ces indicateurs de fonctionnement des systèmes karstiques du massif de la St Baume.

RELATION ENTRE LA MODELISATION MHD ET D'AUTRES APPROCHES

Classiquement il est possible d'ajuster sur les phases de tarissement des systèmes karstiques un modèle de Maillet (décroissance exponentielle des débits) et de déterminer un coefficient de tarissement (α).

Relation entre les paramètres gaussiens et des indicateurs de capacité

Le coefficient de tarissement, tout comme le volume dynamique ($Q_0 / \alpha * 86400$) apparaît en relation assez forte avec la valeur de la moyenne des I_v . Ceci montre, malgré le petit nombre de points, que la moyenne des I_v est un indicateur des capacités des différents systèmes karstiques (Fig.12).

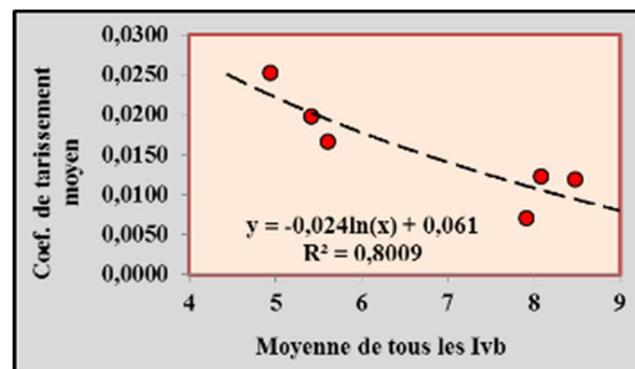


Fig.12 – Relation entre la moyenne de tous les I_v et le coefficient moyen de tarissement calculé sur les différentes phases hydrologiques des différentes sources

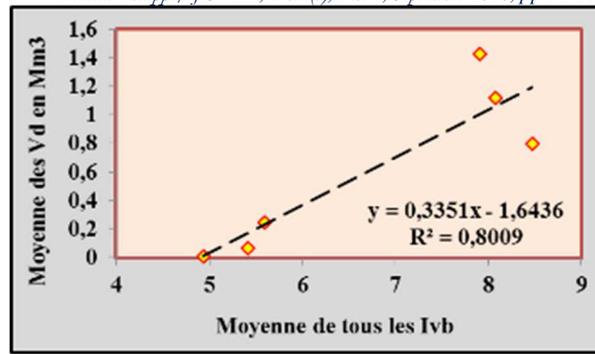


Fig.13 – Relation entre la moyenne de tous les I_{vb} et le volume dynamique des différentes sources en millions de mètres cubes

De même si l'on calcule un coefficient de variation pour tous les ajustements (moyenne/écart type) des statistiques des I_{vb} , il apparaît pour cinq situations sur six une très bonne relation avec le débit maximal (Fig.14). Seule la Font Alaman sort du modèle le plus général. Cette source, dont la fonction d'intercorrélation était déjà particulière, apparaît encore plus singulière. Clairement soit son débit maximal devrait être proche de 3 500 l/s ce qui semble impossible vu le petit bassin qui lui est généralement attribué, soit son coefficient de variation devrait être plus bas pour entrer dans le modèle général.

Dans la mesure où nous avons vu que sa valeur moyenne des I_{vb} est en relation « normale » avec les indicateurs de capacité (Fig.12 et Fig.13) il apparaît que c'est l'écart type de cette source qui la singularise. En d'autres termes pour que cet exutoire entre dans l'épuration, il faudrait qu'il soit voisin de 1,1 et pas de 1,8. Autrement dit la diversité observée des valeurs des I_{vb} semble trop importante. Reste à comprendre pourquoi (Apports par des pertes...)?

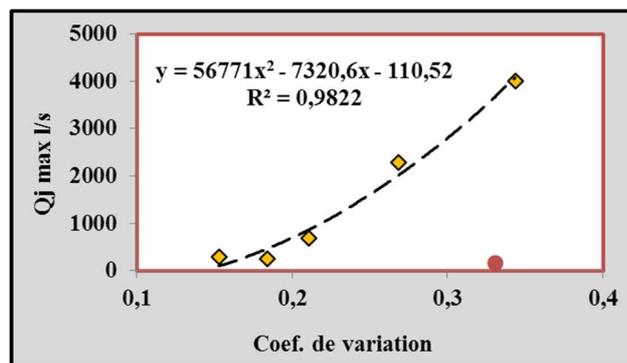


Fig.14 – Relation entre le coefficient de variation de tous les ajustements des I_{vb} (moyenne/écart type) et le débit maximal mesuré à chaque source. Le point rouge représente la Font Alaman qui est exclue de la régression.

La source de Saint-Pons a un écart type de 1,5 alors même que cette source présente de faibles pointes de crue (1,3 pour les débits associés de la source et de la galerie drainante). Il semble donc que ce soit l'existence de pointes de crue non négligeables, comme lors du début du cycle 1986 – 1987, qui conduisent à cette plus forte dispersion des valeurs des I_{vb} à la Font Alaman. D'une certaine façon ces phases de crue sont inattendues par rapport au fonctionnement général de cette source. Ceci pose bien évidemment un problème quant à la karstification de ce très petit hydrosystème.

Relation entre l'amplitude par cycle (A_c) et des indicateurs de transmissivité

La figure 15 montre une relation entre l'amplitude par cycles (A_c) et le paramètre i d'A. Mangin. Rappelons que le paramètre i est obtenu par l'ajustement d'un modèle homographique après déduction des débits de base. Il représente donc une indication sur les modalités d'infiltration, de circulation rapide de l'eau dans le karst. Plus i est proche de 1 plus l'infiltration est lente et inversement.

De même il est possible de calculer un temps de régulation à partir des analyses spectrales. Ce temps, comme le montre la figure 16, est bien corrélé à l'amplitude A_c pour quatre systèmes karstiques (points jaunes). La source de Saint-Pons et l'ensemble source + galerie s'écartent par contre du modèle.

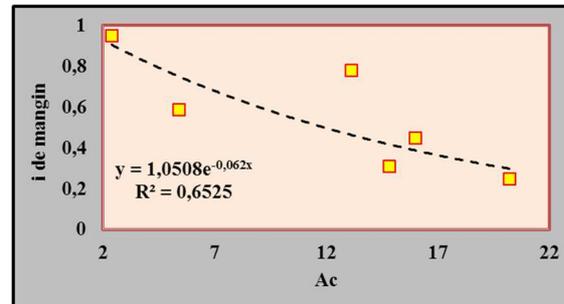


Fig.15 – Relation entre l'indicateur A_c et l'indice i de Mangin

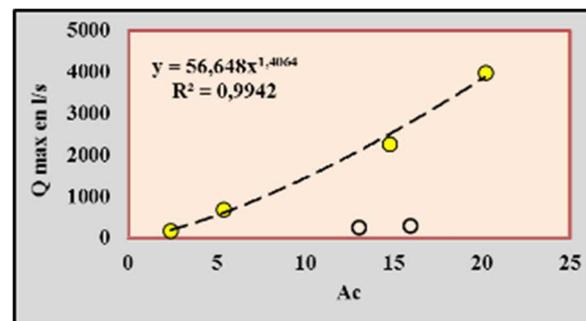


Fig.16 – Relation entre l'indicateur A_c et le débit maximal mesuré en litre par seconde.

Ces exutoires ont soit une valeur d' A_c bien trop forte, soit un débit maximal bien trop bas. Celui-ci serait attendu autour de $2\text{m}^3/\text{s}$. Il est vrai qu'il manque dans ces données les débits de la source des Cabrelles qui doit fonctionner comme trop-plein, mais très rarement. Il semblerait plutôt que ce soit l'écoulement de forts débits aux exutoires de Saint-Pons qui soit empêché. Ceci serait cohérent avec un basculement tectonique du massif.

Conclusion et perspectives

Le MHD apparaît comme un modèle relativement ubiquiste qui fournit des paramètres qui peuvent être mis en relation avec les caractéristiques de fonctionnement de systèmes karstiques variés. Ce modèle apparaît donc comme assez robuste. Il permet dans le cadre de la même analyse d'avoir accès à des informations sur les niveaux de stockage et sur les modalités du drainage fonctionnel. Il reste à préciser l'éventail des valeurs qui peuvent être prises pour chaque paramètre. La diversité des situations dans le massif de la St Baume permet déjà d'en avoir une petite idée. Les interprétations sont donc à affiner. Par ailleurs, l'application possible du MHD aux chroniques piézométriques et aux écoulements karstiques de surface devra être mise en œuvre de façon spécifique ou conjointe. On peut même envisager, en complément, une application, par exemple, à des chroniques thermiques.

Pour ce qui est de la St Baume, ces analyses montrent que l'on peut améliorer, voire préciser, certains points du fonctionnement en réanalysant des chroniques anciennes. Il faudra aussi voir si les écarts aux modèles « généraux » (pour la Font Alaman en raison de crues et pour Saint-Pons en raison de l'absence de débit maximum majeur) se retrouvent

ailleurs et si les relations qui semblent structurelles se confirment. Toutes ces informations, et en particulier la diversité observée, sont cohérentes avec un soulèvement d'ensemble et une subsidence relative de la partie sud-ouest du massif. Ceci est en outre en accord avec les profils des talwegs levés à la main il y a bien longtemps (Martin Ph., 1991, Fig. 259, 260, 261, 262, 286 et 287). On y lit l'ampleur de l'érosion régressive dans le Caramy et ses affluents. En particulier on peut identifier dans le Caramy aval une reprise d'érosion qui contrôle le positionnement des sources les plus basses : Font noire, Figuière et Lieutaud.

Techniquement, l'une des grandes questions à aborder maintenant est celle de la transformation des résultats en fonction du pas de mesure. Existe-t-il une loi scalaire de variation des paramètres par phase (cycle, récession ou montée de crue) ou généraux (statistique des I_v ou I_{v_m}) en fonction du pas de mesure et donc de l'échelle de la résolution de la mesure.

Par ailleurs, on peut se demander ce qu'une descente dans les échelles fera apparaître comme phénomène(s) jusque-là non perçu(s) ? Ceci nécessitera avant, de régler la question du « bruit aléatoire » que génèrent les sondes utilisées actuellement, de façon notable pour certaines et plus limitée pour d'autres.

Tout ceci prouve bien la nécessité de réfléchir à comment sauvegarder ces données anciennes (et bien d'autres) qui constituent des références historiques même si aujourd'hui on peut produire des données en bien plus grande quantité et de meilleure qualité, avec, en particulier, des résolutions temporelles qui ouvrent sur d'autres problèmes.

Références

- Cognard-Plancq A. L., Gévaudan C., Emblanch C., (2006.a), Historical monthly rainfall-runoff database on Fontaine de Vaucluse karst system: review and lessons. In Duran J.J., Andreo B., Carrasco F., (eds): Karst, cambio climato y aguas subterranas. Publication des Instituto Geological y Minero de Espagna. Serie : Hydrogeologia y Aguas Subterranas n° 18, p.465-475. Madrid.
- Cognard-Plancq A. L., Gévaudan C., Emblanch C., (2006.b), Apports conjoints de suivis hydroclimatologique et hydrochimique sur le rôle de filtre des aquifères karstiques dans l'étude de la problématique de changement climatique — application au système de la Fontaine de Vaucluse. Proceedings of 8e conference on limestone hydrogeology, 21–23 septembre 2006, Neuchatel Switzerland – ISBN 2-84867-143-2, p.67-70.
- Coulier Ch., (1985), Hydrogéologie karstique de la St Baume occidentale, Bouches-du-Rhône, Var ; France. Thèse 3e cycle, Université de Provence Aix – Marseille I, 400 p.
- Coulier Ch., (1986), Le karst de la St Baume (Bouches-du-Rhône et Var ; France). Structure et évolution : l'approche hydrogéologique. Karstologia n° 8, p.7-12.
- Martin Ph., (1986), Les travertins du vallon de Saint-Pons (Gémenos, B. du Rh.), Table Ronde : Travertins I. s. et évolution des paysages holocènes dans le domaine méditerranéen, Méditerranée, t. 57, n° 1-2, p. 92-100.
- Martin Ph., (1991.a), Hydromorphologie des géosystèmes karstiques des versants nord et ouest de la St Baume (B. du Rh., Var ; France). Étude hydrologique, hydrochimique et de vulnérabilité à la pollution. Thèse Université d'Aix Marseille II, 412 p., 291 fig., 68 tab. (Tirage diffusé : même document, mais présenté en 321 p.).
- Martin Ph., (1991.b), Diversité de fonctionnement des aquifères carbonatés d'un karst méditerranéen drainé à 3 niveaux selon 3 orientations : le cas du massif de la St Baume (B. du Rh., Var ; France), Comité des Travaux historiques et scientifiques, Section géographie physique et humaine, actes du 115^e Congrès national des Sociétés savantes (Avignon, 1990) : Milieux calcaires et politique hydraulique, p.39-64.
- Martin Ph., (1991.c), Quantification des flux carbonatés exportés par les aquifères de la St Baume (B. du Rh., Var ; France) et estimation de la dissolution spécifique sur ce massif. Travaux de l'UA 903 du CNRS, n° XX, Aix-en-Provence, p.25-36.
- Martin Ph., (1991.d), Diversité de fonctionnement et faible pollution actuelle des aquifères du karst de la St Baume ; B. du Rh., Var ; France. Colloque géologie et santé, Toulouse 14-17 mai 1991, actes du colloque, BRGM Orléans, p.178-191.
- Martin Ph., (1991.e), Quantification et modélisation du fonctionnement hydrologique des principaux aquifères carbonatés du karst de la St Baume (B. du Rh., Var ; France). — Actes de la Table ronde Franco – Slovène, Acta Carsologica XX, p.87-106.
- Martin Ph., (1992), Quantification et modélisation du fonctionnement hydrologique de la Foux de Nans (Nans-les-Pins, Var). — Symposium « la spéléologie et l'eau », actes du XIX^e Congrès national de Spéléologie, Montpellier, Spélunca Mémoire, n° 19, p. 57-70.
- Martin Ph., (1993), Hydrologie du massif karstique de la St Baume. Approche systémique. Mélanges FRECAUT, Presses universitaires de Nancy, p.225-234.
- Martin Ph. (1995.b), Les formes fluviales du massif karstique de la St Baume (B. du Rh., Var ; France). Actes du 13^e Symposium international de karstologie théorique et appliquée, Roumanie, Theoretical and Applied Karstology, n° 8, p.103 -115.
- Martin Ph., (1996), De l'organisation des formes superficielles et souterraines du massif karstique de la St Baume (B. du Rh, Var ; Fr.). Ukpíc n° 8, Université de Fribourg, Suisse, M. MONBARON et S. FIERZ éditeurs, p.45-64.
- Martin Ph., (1997.a), Structures hiérarchiques dans le karst de la St Baume (B. du Rh, Var ; France) 12^e Congrès de spéléologie, Symposium 7, Vol.1, Union internationale de spéléologie et Société suisse de spéléologie éditeurs, p.129-132.

- Martin Ph., (1997.b), Dynamique non linéaire et fonctionnement hydrodynamique de l'endokarst du massif de la St Baume [B. du Rh, Var ; France). Actes du 14^e Symposium international de karstologie théorique et appliquée, Roumanie, Theoretical and Applied Karstology, n° 10, p.29-43.
- Martin Ph., (1997.c), Relations entre le fonctionnement hydrologique et les structures géomorphologiques du karst de la St Baume (B. du Rh., Var ; France) ; essai de modélisation. Actes du colloque de l'AFK et de l'URA 903 Aix-en-Provence, octobre 1997.
- Martin Ph., (1999.a), Quantification fractale des formes superficielles du karst. L'exemple du massif de la St Baume (Bouches du Rhône, Var ; France). Actes du colloque : Montagnes méditerranéennes, Aix-en-Provence, oct. 1998, in Études de géographie physique, travaux 1999, n° XXVIII, CAGEP — URA 903 du CNRS, Université de Provence, p.127-136.
- Martin Ph., (2000.a), Quelle est la dimension du massif karstique de la St Baume ? Éléments pour une théorie spatiale et fractale du karst. Karstologia, n° 35, p.13-26.
- Martin Ph., (2000.b), Forme et rugosité des surfaces karstiques. Conséquences pour une théorie spatiale et fractale de l'interface terrestre. Karstologia, n° 36, p.1-16.
- Martin Ph., (soumis), Le Modèle Hydrologique Différentiel (MHD. Application d'une nouvelle méthode d'analyse aux cycles et récessions : exemple de ceux de la Fontaine de Vaucluse mesurés entre 1966 et 2014.
- Martin Ph., Kabo R., (2015), Variations du débit de la Fontaine de Vaucluse entre 1877 et 2014. Évolutions tendancielle des débits moyens et des étiages. Karstologia, n° 66, p.37-47.
- Nicod J., (1967), Recherches morphologiques en Basse — Provence calcaire. Thèse d'état, Université Aix — Marseille II, Louis Jean éditeur, Gap, 557 p.
- Tassy A., (2012), Karsts côtiers et canyons sous-marins de la marge provençale au Cénozoïque : contrôle géodynamique, eustatique, hydrologique et structural. Thèse Aix-Marseille université, 416 p.