

Géologues

REVUE OFFICIELLE DE LA SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DE FRANCE
Géosciences appliquées



***Impact du changement global
sur les ressources en eau souterraine***

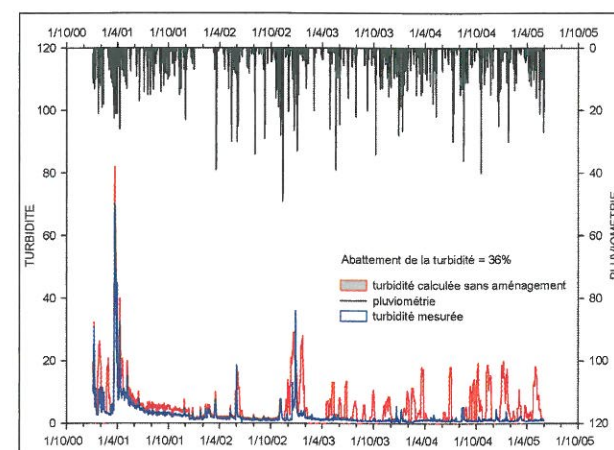


Figure 6. Comparaison entre turbidité observée et modélisée sans la réajustement des aménagements (source : document original des auteurs).

Impact des aménagements sur la réponse impulsionnelle turbide du captage

Selon la théorie de l'analyse systémique (Mangin, 1975), l'intercorrélation entre un signal d'entrée assimilable à un Dirac⁸ et un signal de sortie permet de caractériser la réponse impulsionnelle du système étudié. Ici, le Dirac est approximé par un épisode orageux horaire et le signal de sortie est la turbidité. Les réponses impulsionnelles sont complexes et composites. Il est possible de les décomposer en réponses impulsionnelles élémentaires pouvant être assimilées à des transports de matières en suspension par différents chemins karstiques. Ainsi, il est possible de comparer les temps modaux des réponses impulsionnelles élémentaires avec les temps modaux des traçages artificiels à la fluorescéine effectués dans le cadre des DUP (De la Quèrièrre, 1993 ; Gombert, 2001 ; 2004). Les points d'engouffrement qui ont été aménagés et tracés à la fluorescéine (ceux avec un temps modal de 9, 14 et 33 j) montrent une forte diminution de leur contribution, mettant ainsi en évidence l'impact de ces aménagements sur la réponse turbide au captage (Fig. 7).

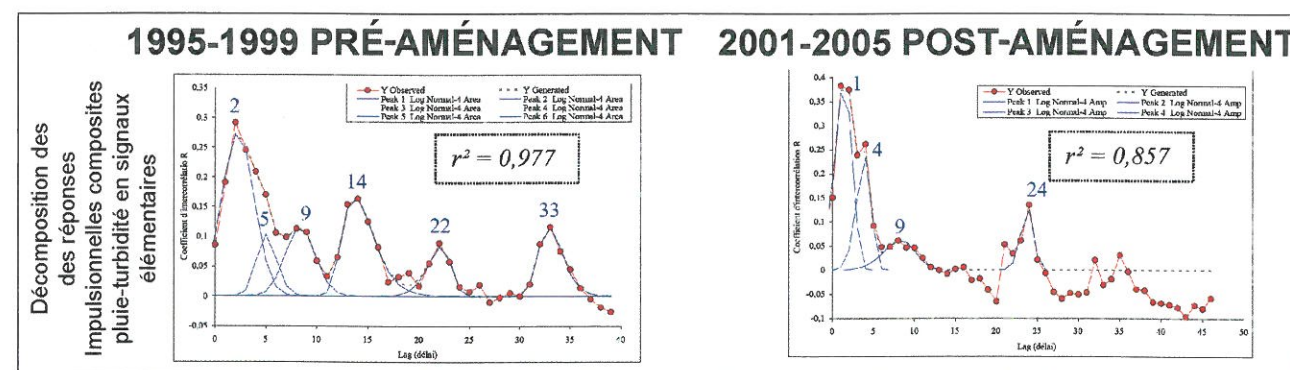


Figure 7. Décomposition de la réponse impulsionnelle turbide du captage des Varras (source : document original des auteurs).

8. Dirac : élément intense, de durée brève devant la durée de restitution. En hydrologie, les injections ponctuelles de traceur artificiel et les forts orages localisés sont assimilés à des Diracs.

Conclusion

L'occurrence des phénomènes turbides à un captage est fortement dépendante de la répartition temporelle des pluies. Le calcul du ratio entre turbidité et pluviométrie, comme indice de la sensibilité de la réponse du captage à la pluie, permettrait de s'affranchir de l'impact des variations interannuelles de la pluviométrie et ainsi d'évaluer les seuls impacts des aménagements de bassin versant. La décomposition du signal et sa reconstruction à partir des hautes et basses fréquences par transformée en ondelettes ont permis de constater une diminution de moitié de la sensibilité due aux infiltrations concentrées au niveau des bêttoires.

La modélisation du signal par interpolation paramétrique a permis de définir le signal qu'il y aurait eu sans les aménagements, puis de le comparer au signal observé. Les résultats ont montré une nette diminution de 36% de la turbidité au captage et une inversion de la tendance à l'augmentation. Cette diminution est imputable à l'aménagement des pertes engendrant une diminution de la réponse impulsionnelle turbide du système karstique.

Cette méthodologie peut être appliquée à d'autres captages karstiques étudiés dans le cadre du dispositif « Grenelle », mais aussi à des territoires où des changements d'occupation des sols et/ou de pratiques agricoles et/ou d'aménagements urbains et ruraux ont été effectués.

Références bibliographiques

- BRGM, David P.-Y., Moisan J., Nachbaur A., Dörflinger N., 2010. Aménagement des bêttoires en Haute-Normandie – État de l'art et préconisations de bonnes pratiques – Rapport final. Rap. BRGM/RP-58795-FR, 218 p., 39 ill., 10 ann.
- BRGM, David P.-Y., 2012. Inventaire régional Haute-Normandie des bêttoires, trajets souterrains des eaux (traçages) et des

exutoires - Rapport final d'année 4 et synthèse des 4 années. Rap. BRGM/RP-61691-FR, 128 p., 44 ill., 9 ann.

- DRAAF – SRISE de Haute-Normandie, 2014. Note Agreste Haute-Normandie n°83, août 2014, Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt.
- De La Quèrièrre P., 1993. Révision des périmètres de protection du captage des Varras. BRGM.
- Fournier M., 2008. Fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère de Caumont et incidence des aménagements de bassin versant sur la qualité des eaux du forage des Varras. SERSAEP – AESN – Université de Rouen.
- Gombert P., 2001. Expérience de traçage de la bêttoire n°3 avec suivi au captage des Varras. Gaudriot.
- Gombert P., 2004. Réalisation d'une opération de traçage sur la bêttoire n°10 : rapport final. Gaudriot.
- Labat D., Ababou R. et Mangin A., 1999a. Analyse en ondelettes en hydrologie karstique. 1^{ère} partie : analyse univariée de pluies et débits de sources karstiques. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science, 329, 873-879.
- Labat D., Ababou R. et Mangin A., 1999b. Analyse en ondelettes en hydrologie karstique. 2^{ème} partie : analyse en ondelettes croisée pluie-débit. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science, 329, 12, 881-887.

- Laignel B., 1997. Les altérites à silex de l'ouest du Bassin de Paris. Caractérisation lithologique, genèse et utilisation potentielle comme granulat. Thèse Université Rouen, Éditions BRGM.
- Mangin A., 1975. Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse d'État, Université de Dijon.
- Mangin A., 1984. Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatrice et spectrale. Journal of Hydrology, 67, 25-43.
- Mathevet T., Lepiller M., Mangin A., 2004. Application of time-series analyses to the hydrological functioning of an Alpine karstic system: the case of the Bange-L'Eau-Morte karstic system. Hydrology and Earth systems sciences, 8 (6), 1051-1064.
- Rodet J., 1991. Les karsts de la craie : étude comparative. Thèse d'État, Université Paris IV.
- Rossi A., 2007. Variabilité du transfert hydrosédimentaire dans le bassin versant du Mississippi dans le contexte du changement global : forçage climatique et modélisation de l'impact anthropique. Rapport M2R, Université de Rouen.
- Sébire G., 2005. Étude du risque potentiel de contamination vis-à-vis des pollutions phytosanitaires ponctuelles dispersées sur le bassin d'alimentation des captages de Varras-Moulineaux. Rapport de fin d'études, Institut supérieur d'agriculture de Beauvais.

Changements globaux : quels impacts sur l'aquifère de la Crau ?

Antoine Baillieux¹, Albert Oliso², Fabienne Trolard², André Chanzy², Rémi Lecerf², Patrice Lecharpentier², Olivier Banton², Françoise Ruget² et Stéphane Ruy².

Introduction

La gestion durable d'une nappe phréatique nécessite de sortir des actions locales ou cantonnées aux limites administratives, pour adopter une cohérence globale des actions à l'échelle du bassin hydrogéologique, voire de l'hydrosystème, généralement plus large, dont il dépend. Cette stratégie s'affirme dans les SDAGE³ et se met en place sur tout le territoire métropolitain avec un programme de mesures pluriannuelles visant à atteindre le bon état des masses d'eau conformément à la Directive cadre européenne sur l'eau⁴. Les mesures engagées doivent tenir compte de l'impact des changements globaux, attendus dans les prochaines décennies, sur la qualité des eaux souterraines et sur leur équilibre quantitatif. Elles doivent proposer une adaptation ou un plan de réduction des risques (e.g. inondation, pénurie d'eau, intrusion saline). Cependant, cette construction de mesures se heurte à la complexité des interactions entre les différents compartiments de l'hydrosystème.

Dans le bassin méditerranéen, les interactions entre agriculture et ressources en eaux souterraines caractéri-

sent bien cette complexité. Dans cette zone, une partie des cultures est irriguée avec des eaux qui peuvent avoir deux origines. D'une part, les aquifères peuvent être la principale source d'approvisionnement et l'agriculture sera considérée comme consommatrice d'eau souterraine. Dans ce cas, les autres usages des eaux souterraines sont en concurrence avec les besoins agricoles. D'autre part, lorsque les eaux d'irrigation proviennent des rivières, la recharge de la nappe peut dépendre significativement des pratiques d'irrigation, en particulier lorsqu'il s'agit d'irrigation gravitaire. Dans ce cas, en participant au renouvellement des eaux souterraines, l'agriculture a un rôle positif pour les autres usages de ces eaux. L'irrigation et, plus généralement, la gestion des eaux agricoles deviennent ainsi des déterminants fondamentaux dans la gestion quantitative des eaux souterraines, en agissant à la fois comme « fournisseur » et « consommateur » d'eau.

La gestion efficace d'une ressource en eau souterraine doit être fondée sur une bonne compréhension des différentes interactions entre les compartiments de l'hydrosystème. En zone agricole méditerranéenne, une attention particulière doit être portée à la place de l'irrigation dont

1. Syndicat mixte de gestion de la nappe phréatique de la Crau, Istres, antoine.baillieux@symcrau.com
2. UMR EMMAH, INRA-Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, Avignon.
3. Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux.
4. Directive n° 2000/60/CE du 23/10/2000.

la pérennité des cultures irriguées est aussi dépendante de la viabilité économique des cultures. Afin d'avoir une vision prospective sur l'avenir des ressources en eaux souterraines, il est donc impératif de développer une démarche intégrée qui permette d'évaluer le rôle passé, actuel et futur de l'agriculture dans le cycle hydrologique, sur l'ensemble du territoire concerné. Barthel *et al.* (2012) ont développé une modélisation intégrée de l'impact des changements globaux sur l'agriculture et les eaux souterraines dans un contexte périalpin. Ce type de démarche intéresse tout particulièrement les organismes gestionnaires de milieu, tel le SYMCRAU⁵ qui est en charge de la gestion de la nappe phréatique de la Crau et du maintien de son équilibre quantitatif. Néanmoins, les exemples d'outils d'évaluation des changements globaux, combinant modèles climatiques, modèles de cultures et modèles de nappes, sont rares. Dans cette optique, l'unité mixte de recherche EMMAH a développé une chaîne de modélisation numérique pour la simulation de l'impact des changements globaux sur la production agricole, les écoulements souterrains et leurs interactions sur le territoire de la Crau.

L'Agro-hydrosystème de la Crau

Le territoire de la Crau est localisé à l'est du delta du Rhône, dans les Bouches-du-Rhône. C'est une vaste plaine de 600 km², constituant le paléo-cône de déjection de la Durance et renfermant un aquifère (540 km²) qui alimente près de 300 000 habitants (Arles, Salon-de-Provence...), des activités industrielles (zone industrialoportuaire de Fos-sur-Mer...) et agricoles (foin, élevage ovin, maraîchage, arboriculture...). La Crau est connue pour la production de son foin labellisé AOP⁶, cultivé sur une surface de près de 15 000 ha de prairies irriguées par l'eau de la Durance, grâce à un réseau dense de canaux (Fig. 1). Le bocage des prairies irriguées forme, au Nord, la « Crau humide ». La moitié sud du territoire, la « Crau sèche », présente un paysage de steppe originelle, appelée « cous-souls » et classée Réserve Naturelle. Ces deux entités paysagères sont placées sous protection Natura 2000.

Les pratiques de l'irrigation gravitaire par submersion existent en Crau depuis le XVI^e siècle, avec la mise en place des premiers canaux. Étant, à l'origine, sur-

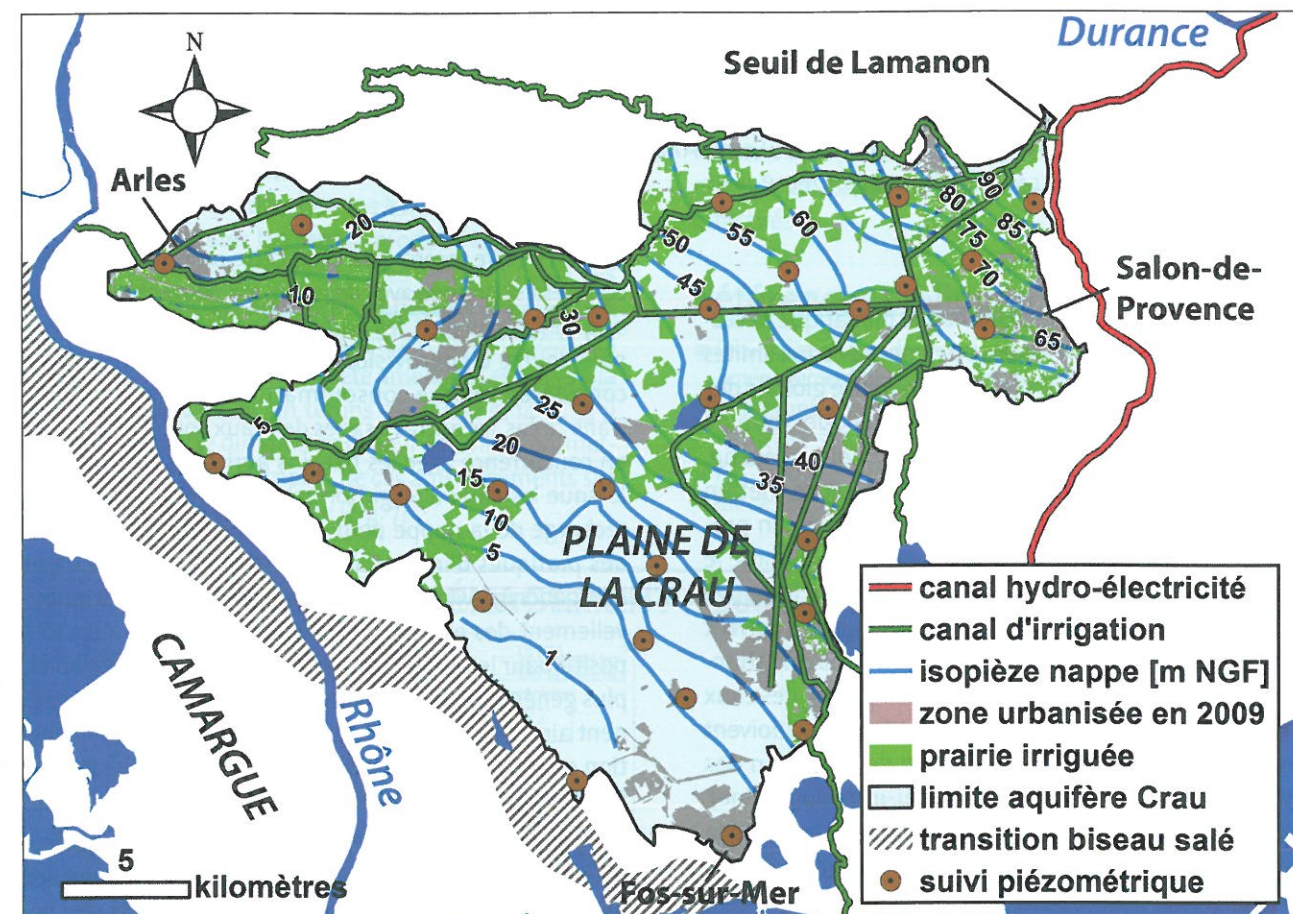


Figure 1. L'agro-hydrosystème de la plaine de la Crau dans les limites de la nappe libre, isopièzes octobre 2013 établies à partir de 132 ouvrages (SYMCRAU, 2015). Les piézomètres indiqués sur la figure sont ceux du réseau ADES.

5. Syndicat mixte de gestion de la nappe phréatique de la Crau.
6. Appellation d'Origine Protégée.

tout construits pour faire fonctionner des moulins, la fonction agricole des canaux n'a pris un véritable essor qu'à partir du XIX^e siècle (Aspe, 2015). Le principal bénéficiaire de l'irrigation gravitaire est l'AOP foin de Crau (seule appellation française sur production à destination de l'alimentation animale). L'irrigation consiste à inonder les surfaces de prairie par une lame d'eau durant quelques heures selon une rotation (tour d'eau) d'environ 10 jours. L'irrigation s'effectue de mars à octobre. L'eau en excès, non retenue dans le sol, non consommée par la plante ou non reprise dans les canaux de drainage (colature), s'infiltre dans le sol et alimente la nappe phréatique. Selon les dernières estimations (Oliosio *et al.*, 2013), la part de l'irrigation dans la recharge de la nappe est de l'ordre de 75%.

Le type de cultures (prairies) et le cahier des charges limitent l'ajout d'engrais et de produits phytosanitaires. La fertilisation est en partie apportée par le pâturage des brebis qui, d'octobre à avril, par l'élevage extensif en Crau, favorise le maintien de la biodiversité (entretien des milieux ouverts, apport de graines des estives). Bourrié *et al.* (2013) déterminent par ailleurs que les quantités d'éléments minéraux dissous dans les eaux de la Durance assurent la fertilisation du foin en couvrant la quasi-totalité des besoins des plantes. La recharge de la nappe de la Crau bénéficie donc d'une eau d'irrigation de bonne qualité (peu d'intrants agricoles) s'infiltant sous prairies irriguées. Les autres activités agricoles importantes sur la plaine sont l'arboriculture (environ 5 000 ha), majoritairement irriguée par goutte-à-goutte, et le maraîchage sous serre, cultures alimentées en eau par pompage dans la nappe.

L'aquifère des cailloutis de la Crau

L'aquifère des cailloutis est constitué des dépôts fluviatiles duranciens, datant du Plio-Pléistocène, à galets siliceux dominants, localement cimentés par une matrice calcaire (poudingue). Il forme un vaste plan incliné partant du seuil de Lamanon (voir figure 1) et s'enfonçant sous les limons du delta du Rhône en Camargue, entre Arles et Fos-sur-Mer. Le substratum est constitué des calcaires et marnes du Miocène. Les cailloutis de la Crau présentent une perméabilité élevée, généralement comprise entre 10⁻³ et 10⁻² m/s. Cette caractéristique, alliée aux apports massifs d'eau durant les périodes d'irrigation (environ 20 000 m³/ha/an), définissent un régime de nappe hautement dynamique, où les niveaux piézométriques observés sont activement soutenus par la recharge, épisodique mais régulière, en provenance des prairies irriguées. L'épaisseur moyenne de la nappe est de 10 m, mais peut localement atteindre 40 m. Le battement de la

nappe dans certains secteurs irrigués, principalement au Nord, peut atteindre 10 mètres. Les capacités d'exploitation de la ressource sont donc fortement dépendantes du fonctionnement de l'irrigation gravitaire sur la plaine. L'exutoire naturel de la nappe libre de la Crau se situe principalement sur la bordure ouest du territoire, où les écoulements souterrains sont drainés par la vaste zone de marais s'étendant en longueur entre Arles et Fos-sur-Mer (BRGM, 1970). Cet exutoire représente un patrimoine naturel remarquable constituant le site Natura 2000 des Trois Marais, incluant la Réserve naturelle nationale des Marais du Vigueirat.

Un territoire en mutation

L'activité d'irrigation gravitaire est fragilisée par d'importantes mutations économiques, sociales et environnementales. Les producteurs de foin de Crau se heurtent à des difficultés économiques, menaçant la rentabilité des exploitations agricoles. Les charges opérationnelles des ASA⁷ s'accroissent alors que le nombre d'agriculteurs irrigants et leurs capacités financières s'amenuisent. De même, la pression foncière a entraîné la conversion de surfaces agricoles en zones urbaines. Entre 1997 et 2009, plus de 800 ha de surfaces cultivées ont disparu (Trolard *et al.*, 2013a).

La part des eaux provenant de la Durance allouée à la Crau est en compétition avec les autres usages de l'eau, comme les allocations pour l'agriculture sur les autres territoires de la vallée de la Durance, le maintien du débit réservé de la Durance, ou encore les usages énergétiques (hydroélectricité), industriels et touristiques (notamment pour les activités nautiques sur le lac du barrage de Serre-Ponçon). Les prédictions à l'horizon 2035-2065 (Sauquet, 2014), montrent que les changements climatiques auraient pour conséquence un décalage au printemps de la disponibilité des eaux du lac du barrage de Serre-Ponçon, ce qui devrait entraîner une diminution des volumes disponibles durant la pleine période d'irrigation (Chanzy *et al.*, 2015 ; Sauquet, 2014). Ceci intervient alors que les seuils réglementaires du débit réservé de la Durance, en cours de révision, pourraient augmenter. Ainsi, la fréquence d'apparition des pénuries d'eau, comme celle observée en 2007, pourrait augmenter dans les prochaines années, pour passer de une année sur quinze dans la période récente, à près d'une année sur quatre à l'horizon 2035-2065, dans le cas du scénario le plus pessimiste (Sauquet, 2014). En années de restriction d'eau pour l'irrigation, la recharge de la nappe phréatique serait ainsi fortement diminuée.

La ressource en eau souterraine de la Crau est donc

7. Association Syndicale Autorisée, en charge de gérer l'irrigation sur la Crau.

dépendante d'une chaîne de décisions, allant du contexte général durancien à la gestion locale de l'usage des sols, qui s'inscrit dans un contexte de contraintes économiques, climatiques et environnementales, mais qui dépend aussi des choix politiques sur la gestion des eaux, de l'aménagement du territoire et des pratiques agricoles. Pour le SYMCRAU, un modèle dynamique, à la fois dans l'espace et dans le temps, de l'agro-hydrosystème de la Crau représente donc un outil intéressant d'évaluation de l'impact des politiques territoriales.

Modélisation des productions de foin et de la recharge de la nappe

La chaîne de modélisation (Fig. 2) a été développée dans le cadre des projets de recherche ASTUCE&TIC (2008-2011) (De Mordant de Massiac *et al.*, 2011) et SIRRI-MED (2011-2013). L'approche consiste à distribuer spatialement des modèles numériques décrivant le fonctionnement des couverts végétaux et des sols sur le territoire de la Crau et à transférer les drainages simulés à un modèle de nappe, selon plusieurs scénarios prospectifs. Les changements globaux sont évalués à l'horizon 2030 selon trois variables : les changements climatiques, l'évolution de l'occupation des sols et la baisse des dotations en eau pour l'irrigation.

Le modèle de culture utilisé pour simuler la production de foin, ainsi que le drainage sous prairie irriguée et sous grande culture (blé, tournesol), est l'outil STICS (Brisson *et al.*, 2003). La qualité du modèle de culture a été évaluée et validée à partir de données observées sur le rendement des cultures et les volumes d'irrigation (Oliosio *et al.*, 2013). Le drainage sous les autres surfaces agricoles, naturelles ou urbaines, a été simulé en utilisant une simple approche par bilan hydrique tenant compte des pluies et de l'évapotranspiration, fondée sur l'approche de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998). La bibliothèque de fonctions MultiSimLib (Buis *et al.*, 2011), développée par l'UMR EMMAH, a été utilisée pour réaliser en une seule opération les multiples simulations de STICS sur les 6 500 parcelles de prairies irriguées répertoriées. Un module spécifique à la Crau a été développé sous MATLAB, (i) afin de générer les données d'entrée nécessaires à STICS pour chaque parcelle de prairie de foin de Crau et

(ii) pour agréger les données du drainage calculé sous les différentes surfaces. La recharge de la nappe et les écoulements souterrains ont été simulés par le programme MODFLOW (McDonald et Harbaugh, 1988). Les paramètres d'ajustement du modèle sont la répartition des perméabilités et le coefficient d'emménagement. Ils sont calibrés à l'aide d'observations piézométriques ponctuelles, existant sur 45 points, et de chroniques complètes issues de la base de données ADES⁸ (voir figure 1).

La modélisation de l'agro-hydrosystème a été réalisée, en mode transitoire, durant une période allant de 2001 à 2010, en utilisant les données climatiques (rayonnement solaire, température, précipitations, vent et humidité) acquises par une station agro-climatique Inra localisée à Salon-de-Provence. Les données d'occupation du sol, correspondant à l'état du territoire en 2009, résultent de l'agrégation d'informations cartographiques issues du CRIGE PACA⁹, d'images satellitaires (Landsat, SPOT,

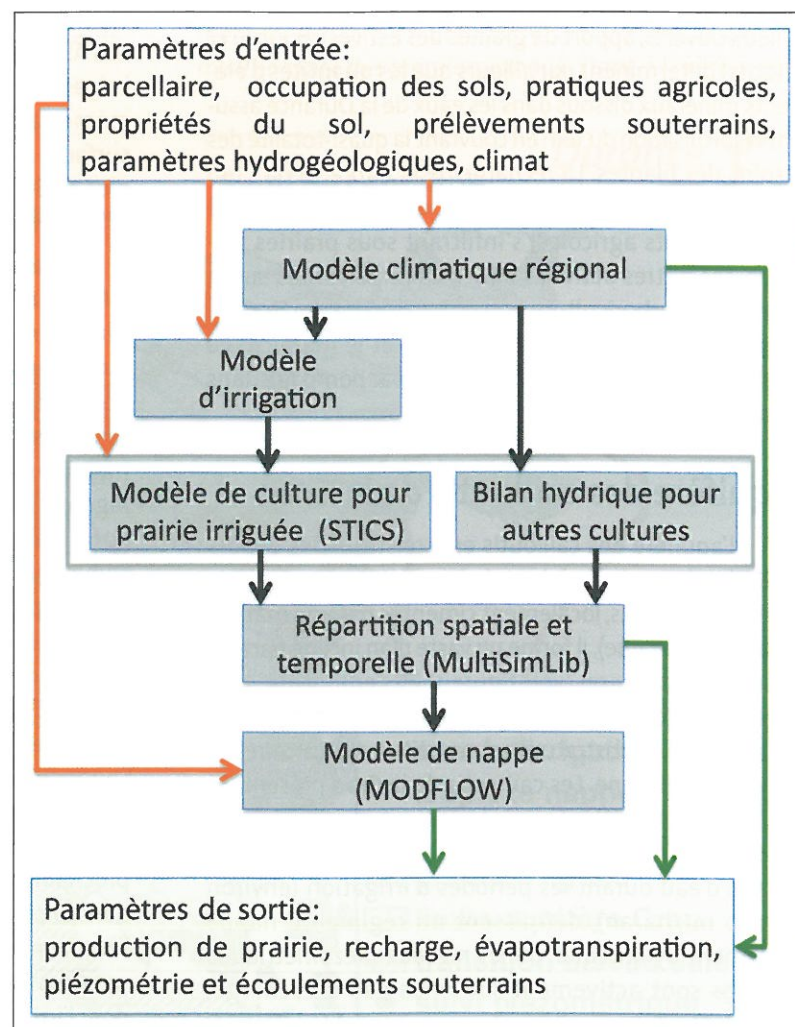


Figure 2. Architecture de la chaîne de modélisation de l'agro-hydrosystème de la Crau (figure originale des auteurs).

Quikbeard et Modis) et d'observations de terrain (De Mordant de Massiac *et al.*, 2011). Les propriétés des sols ont été évaluées à partir de la carte pédologique d'Arles (Bouteyre et Duclos, 1994) et d'hypothèses liant l'épaisseur des sols à l'âge des prairies irriguées. Les itinéraires techniques de production du foin ont été définis avec des tours d'eau dépendants du cahier des charges de la culture du foin de Crau, des règles d'allocation de l'eau établies dans chacune des 11 ASA et des règles de décisions suivies par les agriculteurs en fonction de la météorologie (pluie et vent) (Oliosio *et al.*, 2013).

Scénarios de changements globaux

Les scénarios prospectifs à l'horizon de 2030 ont été établis sur la base des conclusions du programme ASTUCE&TIC sur l'évolution climatique et socio-économique du territoire de la Crau (De Mordant de Massiac *et al.*, 2011 ; Trolard *et al.*, 2013a,b). Les données climatiques futures correspondent aux données du modèle climatique global (GCM) Arpège-Climat, selon le scénario climatique A1B médian défini par le GIEC¹⁰ (GIEC, 2007). Ce scénario suppose un développement économique rapide s'appuyant sur des sources d'énergie équilibrées entre énergie fossile et autres (nucléaire, renouvelables). Ce scénario conduit à une augmentation des températures et de l'évapotranspiration. Les précipitations n'évoluent pas notablement en cumul annuel, mais devraient s'intensifier en hiver au détriment de l'été. Le déficit hydrique devrait s'accroître dans le futur (Oliosio *et al.*, 2013). Le changement d'occupation des sols a été simulé par l'outil Metronamica (RIKS, 2005), qui utilise comme

paramètres d'entrée des informations spatiales (e.g. réseau de transports, densité de l'habitat, type d'urbanisation...) et des statistiques socio-économiques disponibles sur le territoire (en particulier données INSEE¹¹). Le modèle de la Crau utilise le scénario 2 du rapport ASTUCE&TIC (De Mordant de Massiac *et al.*, 2011) qui privilégie un développement des activités tertiaires et résidentielles au nord de la Crau et une stagnation des activités industrielles au sud (ZIP de Fos). Selon ce scénario, où les zones urbaines s'accroissent de 4 400 ha, ce sont environ 1 700 ha de prairies irriguées qui seraient consommés par l'urbanisation sur l'emprise de la nappe, soit environ 12% de la surface de prairies en 2009.

D'ici à 2030, il est difficile d'estimer l'évolution des volumes disponibles pour l'irrigation depuis le bassin de la Durance. En effet, ces volumes sont tributaires des décisions prises sur les volumes réservés à l'hydroélectricité et de l'évolution réglementaire sur les débits naturels réservés. Néanmoins, il est pris comme hypothèse que les conflits d'usage sur la Durance, ainsi que la raréfaction de la ressource disponible, pourraient se traduire par une baisse de la dotation en eau pour l'irrigation d'environ 30%. Ce chiffre est une hypothèse de travail réaliste, mais il ne repose pas sur une analyse très fine des possibles évolutions futures. Ceci se traduit par un allongement des tours d'irrigation de 10 à environ 14 jours. Au final plusieurs scénarios de changements globaux, combinant évolution de l'occupation, évolution climatique et baisse de la dotation en eau sont établis (Tabl. 1) et testés dans la chaîne de modélisation de l'agro-hydrosystème de la Crau. Le scénario ref_f prend en compte les changements climatiques seuls, à l'horizon 2030. Le scénario sc2_f prend

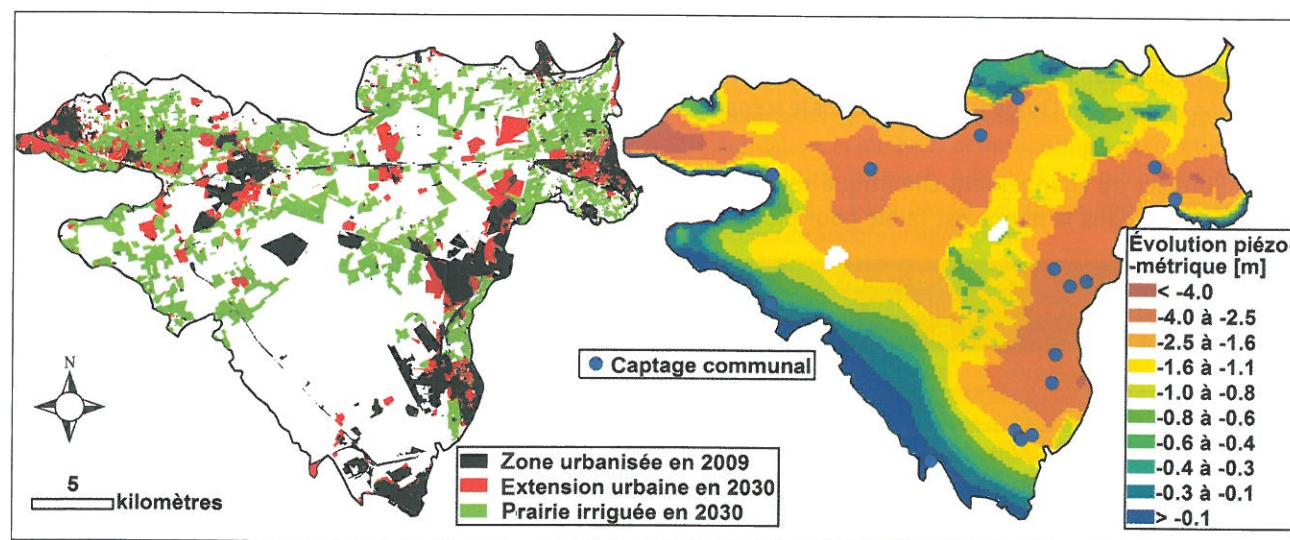


Figure 3. Étalement urbain modélisé à l'horizon 2030 sur l'emprise territoriale de la nappe de la Crau et évolution simulée du niveau piézométrique selon le scénario prospectif rte_sc2_f combinant étalement urbain, baisse des dotations en eau et changements climatiques (figure originale des auteurs).

8. Portail national d'accès aux données sur les eaux souterraines.
9. Centre régional de l'information géographique de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur.

10. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.
11. Institut national de la statistique et des études économiques.

en compte l'étalement urbain seul. Le scénario *rte_f* considère la baisse de dotation en eau pour l'irrigation de 30%. Le scénario *rte_sc2_f* (Fig. 3) est une combinaison des trois précédents. L'impact de ces scénarios de changements globaux sur la production de foin de Crau et sur la ressource en eau souterraine est étudié par comparaison avec les données moyennes simulées sur la période proche 2001-2010 (scénario *ref_a*).

Résultats

État quantitatif actuel de l'aquifère de la Crau

La production moyenne en foin pour la période récente (scénario *ref_a*) est évaluée à environ 8 t/ha/an, avec une variation de 6,9 à 10,4 t/ha/an suivant les caractéristiques locales (voir tableau 1). La recharge moyenne sur l'aire de la nappe est évaluée à 513 mm/an, avec des variations allant de 50 mm/an dans les Coussouls à plus de 2 500 mm/an sur certaines prairies irriguées présentant des sols particulièrement drainant. Environ 74% de l'eau d'irrigation s'infiltre dans la nappe. La contribution de l'eau d'irrigation à la recharge totale de la nappe depuis la surface est évaluée à 77%. En utilisant une porosité typique de 10% pour un aquifère alluvionnaire, le volume d'eau souterraine est estimé à 550 millions de m³.

Évolution de l'état quantitatif de l'aquifère de la Crau à l'horizon 2030

La *recharge moyenne de la nappe en 2030* a tendance à diminuer quel que soit le scénario envisagé. La baisse est très faible (2%) pour le scénario *ref_f* modélisant le seul changement climatique. La baisse de recharge est directement proportionnelle à la diminution de surface irriguée simulée dans le scénario *sc2_f* et à la baisse de la dotation en eau pour l'irrigation simulée dans le scénario *rte_f*.

L'impact du changement climatique seul sur le *bilan hydrique* dans la nappe est faible pour plusieurs

raisons. L'évapotranspiration a tendance à augmenter dans le futur, diminuant l'excès d'eau rechargeant la nappe, mais cette augmentation est contrebalancée par l'augmentation des flux d'irrigation, liée à l'accroissement du besoin des plantes. Au final, en l'absence de restriction sur la dotation en eau et sans changement d'occupation des sols, le volume d'eau souterraine disponible sur la Crau en 2030 serait identique à celui simulé dans la période proche (2001-2010, scénario *ref_a*). Par contre, les baisses de recharge simulées par les autres scénarios ont pour conséquence une diminution de 6% du volume d'eau souterraine pour le scénario *sc2_f* et de 20% pour le scénario *rte_f*. Il est observé une baisse piézométrique de plusieurs mètres dans certains secteurs de la nappe, en particulier dans des zones d'approvisionnement en eau potable (voir figure 3), et certains secteurs exploités par des captages agricoles, seraient asséchés. Concernant la *production de foin*, l'augmentation de la température dans le futur aurait pour conséquence un accroissement du rendement du foin (+11% de rendement pour le scénario *ref_f*) et ceci même en cas de restriction sur la dotation en eau pour l'irrigation (+3% pour le scénario *rte_f*).

Discussion et conclusions

Il convient de souligner les limites du modèle et les besoins de développement futur. Celui-ci ne tient pas compte du changement qui pourrait avoir lieu sur la composition spécifique du foin de Crau. De plus, il ne considère pas les changements de pratiques des irrigants, qui pourraient s'opérer dans le futur afin de s'adapter aux changements globaux. Enfin, une perspective de travail intéressante serait de réaliser un véritable couplage de cette chaîne avec un modèle de gestion du système durancien. La nappe de la Crau dépend en effet d'un système beaucoup plus large, le bassin versant de la Durance. Le changement climatique devrait y avoir un impact profond sur le cycle de l'eau et, compte tenu des tensions à venir, un arbitrage devra avoir lieu sur les volumes alloués aux différents usages. Le modèle montre qu'une baisse de 30%

Scénario	Paramètres d'entrée			Eau d'irrigation	ETP	Résultats		
	Climat	Occupation du sol	Dotation eau d'irrigation			Recharge moyenne	Volume nappe	Rendement moyen foin
ref_a	2001-2010	2009	100%*	288 hm³/an	590 mm/an	513 mm/an	553 hm³	7.9 t/ha/an
ref_f	2025-2035	2009	100%*	+3.7%*	+8.7%*	-1.4%*	+0.1%*	+11.1%*
sc2_f	2025-2035	2030	100%*	-9.0%*	-2.6%*	-13.3%*	-5.7%*	+11.2%*
rte_f	2025-2035	2009	70%*	-25.9%*	+6.7%*	-31.1%*	-20.5%*	+3.0%*
rte_sc2_f	2025-2035	2030	70%*	-25.8%*	-3.6%*	-30.6%*	-19.3%*	+6.1%*

Tableau 1. Paramètres des scénarios prospectifs de changements globaux et principaux résultats de la modélisation ; *variation par rapport aux données moyennes simulées en 2001-2010 (référence actuelle correspondant aux données climatiques de 2001 à 2010 et occupation du sol de 2009 : scénario *ref_a*) (source : résultats originaux des auteurs).

de l'irrigation n'entraînerait pas de perte sur la production de foin. Néanmoins l'impact de cette baisse de l'irrigation sur la ressource conduit à un assèchement de certains secteurs exploités pour d'autres types de culture et à une tension sur les volumes exploités pour l'eau potable, d'autant plus que la nappe de la Crau est la seule ressource en eau souterraine identifiée sur le territoire pour les collectivités locales et environnantes. L'étalement urbain se traduirait aussi par une diminution des volumes d'eau souterraine. Ces changements affecteraient également d'autres services rendus par la nappe, comme l'alimentation des milieux humides à l'exutoire du système.

L'influence des changements globaux sur la qualité des eaux souterraines n'a pas fait l'objet d'une analyse particulière dans cet article, mais les résultats permettent d'émettre des hypothèses sur leurs évolutions futures. Les changements globaux se traduiraient par une mutation des pratiques agricoles : le remplacement des prairies irriguées par des cultures intensives (maraîchage, arboriculture) pourrait augmenter les pollutions diffuses. La baisse des charges hydrauliques dans la nappe aurait tendance à diminuer la capacité de dilution des polluants dans l'aquifère, ce qui pourrait provoquer, à flux massique entrant équivalent, une augmentation de leurs concentrations. Enfin, une baisse du gradient hydraulique dans la nappe devrait physiquement engendrer un déplacement du biseau salé (voir figure 1) vers l'amont hydraulique. L'élévation en cours du niveau de la mer (Church *et al.*, 2013) pourrait accroître ce phénomène.

Dans un système largement anthropisé, comme celui dont dépend la nappe de la Crau, ce sont avant tout les choix politiques qui détermineront l'avenir de la ressource. Ces décisions devront porter sur la répartition des volumes alloués pour les différents usages des eaux de la Durance, sur l'aménagement du territoire (étalement urbain et infrastructures qui peuvent affecter les surfaces de prairies) et sur la sauvegarde de la pratique de l'irrigation gravitaire sur la Crau.

L'outil de modélisation permet d'accompagner ces prises de décisions par des éléments tangibles. Dans les prochaines années, le SYMCRAU envisage, par exemple, d'utiliser cet outil pour estimer la répartition, entre les différentes catégories d'usagers, des volumes prélevables dans la nappe, notamment en cas de crise hydrique sur la Durance.

Soutien

Le programme SIRRIMED (2012-2014) s'inscrit dans le 7^{ème} programme-cadre de l'Union européenne. Le programme ASTUCE&TIC (2008-2011) a été financé par le

Fond unique interministériel et la Région PACA. Cette étude a reçu la contribution des acteurs locaux de la Crau : D. Tronc (Comité du Foin de Crau), L. Arlot (Association des arrosants de la Crau), F. Charron (Domaine du Merle, SupAgro Montpellier), J. Jarrige (agriculteur), C. Alcazar, D. Villessèche (SYMCRAU) et L. Morel (Chambre d'agriculture des Bouches-du-Rhône). La modélisation s'inscrit dans le programme d'action du Contrat de nappe de la Crau 2016-2021. Nous remercions le lecteur pour les commentaires et améliorations apportées au manuscrit.

Références

■ Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M., 1998. Crop Evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage, 56 p.

■ Aspe C., 2015. Adaptation de l'agriculture et rôle de l'hydraulique agricole en Provence-Alpes-Côte d'Azur, une région face au changement climatique. Édité par GREC PACA, p. 13.

■ Barthel R., Reichenau T.G., Krimly T., Dabbert S., Schneider K., Mauser W., 2012. Integrated Modeling of Global Change Impacts on Agriculture and Groundwater Resources. Water Resour. Manag., 26(7), 1929-1951, doi: 10.1007/s11269-012-0001-9.

■ Bourrié G., Trolard F., Chanzy A., Ruget F., Lecerf R., Charron F., 2013. Sustainable intensive agriculture: evidence from aqueous geochemistry. Procedia Earth and Planetary Science, 7, 93-96.

■ Bouteyre G., Duclos G., 1994. Carte pédologique de France à 1/100 000 : Arles (n°22).

■ BRGM, 1970. Carte hydrogéologique au 1/50 000 La Crau, Istres, Eyguières + notice explicative.

■ Brisson N., Gary C., Juste E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., Burger P., Bussièrre F., Cabidoche Y.M., Cellier P., Debaeke P., Gaudillère J.P., Maraux F., Seguin B., Sinoquet H., 2003. An Overview of the Crop Model STICS. European Journal of Agronomy, 18(3-4), 309-332, doi: 10.1016/S1161-0301(02)00110-7.

■ Buis S., Wallach D., Guillaume S., Lecharpentier P., Launay M., Gueriff M., Bergez J.-E., Justes E., 2011. The STICS Crop Model and Associated Software for Analysis, Parameterization and Evaluation. In Methods of Introducing System Models into Agricultural Research. Advances in Agricultural Systems Modeling 2. Édité par by L.R. Ahuja and L. Ma, 395-426. American Society of Agronomy.

■ Chanzy A., Sauquet E., Banton O., Roche N., 2015. Ressources hydriques en milieu méditerranéen. In. Provence-Alpes-Côte d'Azur, une région face au changement climatique. Édité par GREC-PACA, 10-12.

■ Church J.A., Clark P.U., Cazenave A., Gregory J.M., Jevrejeva S., Levermann A., Merrifield M.A., Milne G.A., Nerem R.S., Nunn P.D., Payne A.J., Pfeffer W.T., Stammer D., Unnikrishnan A.S., 2013. Sea level change. In Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Édité par Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V. and Midgley

- P.M., 1137-1216, Cambridge University Press, Cambridge.
- De Mordant de Massiac J.C., Trolard F. et Bourrié G. (pilotes de l'étude), 2011. ASTUCE&TIC : Anticipation sécurisée des territoires urbanisés des campagnes et de leur environnement fondée sur les nouvelles technologies de l'information et des communications. Rapport final, 1 480 p.
 - GIEC, 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 996 pp., Cambridge University Press, Cambridge.
 - McDonald M.G., Harbaugh A.W., 1988. A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Groundwater Flow Model. Edité par le US Geological Survey, Reston, VA.
 - Oliosio A., Lecerf R., Chanzy A., Ruget F., Huard F., Baillieux A., Rossello P., Lecharpentier P., Trolard F., Charron F., Ruy S., Alkacem Alosman M., Cognard-Plancq A.-L., Seguin B., Courault D., Gallego-Elvira B., Garrigues S., 2013. Bilan hydrique des agro-systèmes de Crau face aux changements globaux. In *Écologie et conservation d'une steppe méditerranéenne - La plaine de la Crau*. Edité par Tatin L., Wolff A., Boutin J., Colliot E. et Dutoit T. Éditions Quae, 266-288.

- RIKS, 2005. Metronamica - A Dynamic Spatial Land Use Model, 17 p. Maastricht.
- Sauquet E. (coordinateur), 2014. Projet R2D2 2050 Risques, Ressource en eau et Gestion durable de la Durance en 2050. Rapport de fin de contrat, 243 p.
- SYMCRAU, 2015. Bulletin sur l'état quantitatif de la nappe de la Crau - Période décembre 2013 - décembre 2014, juillet 2015, 24 p.
- Trolard F., Reynnders S., Dangeard M.L., Bourrié G., Descamps B., Keller C., de Mordant de Massiac J.C., 2013a. Territoires, villes et campagnes, face à l'étalement urbain et au changement climatique. Une démarche intégrative pour préserver les sols, l'eau et la production agricole. Éditions Johanet, 148 p.
- Trolard F., de Mordant de Massiac J.C., Dangeard M.L., Bourrié G., Lecerf R., Le Pors B., Chanzy A., Dangeard A., Keller C., Charron F., consortium Astuce et tic, 2013b. La disparition des habitats naturels et agricoles vue par le programme ASTUCE et TIC. In *Bilan hydrique des agro-systèmes de Crau face aux changements globaux*. Edité par Tatin L., Wolff A., Boutin J., Colliot E. et Dutoit T. Éditions Quae, 229-245.

Impact de l'exploitation intensive des eaux souterraines pour l'agriculture sur le bassin de l'Oronte (Liban et Syrie)

Michel Bakalowicz¹, François Zwahlen² et Myriam Saadé-Sbeih³.

Introduction

Une étude du World Resources Institute (Luo *et al.*, 2015) annonce que, sur les trente-trois pays les plus menacés par le manque d'eau à l'horizon 2040, quatorze sont situés au Moyen-Orient. De ce fait, les risques de voir l'instabilité régionale s'aggraver du fait du manque d'eau sont très grands. En fait, dans la plupart des bassins du Moyen-Orient, dès les années 70, la réalisation de grands travaux hydrauliques, barrages, réseaux hydrauliques et champs de forages, a conduit au développement intensif de l'irrigation pour développer une agriculture intensive de céréales et d'arbres fruitiers (amandiers, oliviers). Les conséquences directes ont été une altération profonde et durable des cycles hydrologiques des fleuves, dont l'Euphrate (Voss *et al.*, 2013), l'abaissement du niveau des nappes et la réduction du débit ou même l'assèchement de certaines sources. Parmi les conséquences indirectes, il faut noter les conflits entre pays voisins, notamment entre la Syrie et la Turquie.

Le cas du bassin de l'Oronte, dont l'essentiel est en

Syrie, est probablement le plus significatif, dans la mesure où les tensions à l'origine de la grave crise syrienne actuelle sont apparues à la faveur de la conjonction d'une exploitation non contrôlée des eaux souterraines, d'une sécheresse prolongée et d'une crise économique. Sans même parler de changement climatique, on se trouve donc dans un cas typique de « changement anthropique ». Selon Maddocks *et al.* (2015), en regard des conflits du Moyen-Orient, la question de l'eau peut sembler « secondaire ». Mais ces auteurs observent que la sécheresse inédite qui a sévi en Syrie entre 2006 et 2010 a aggravé la situation liée à la mauvaise gestion chronique des nappes. Cette situation a contraint plus de 1,5 million d'habitants, surtout des paysans, à migrer vers les agglomérations. Cette migration a aggravé la déstabilisation générale de la Syrie et a contribué aux troubles qui ont alimenté la guerre civile.

Les conditions environnementales qui ont conduit à cette crise, qui touche maintenant une large partie du Proche-Orient, ont fait l'objet d'études et de synthèse dans le cadre du projet Oronte de l'Institut des Hautes

Études Internationales et du Développement (IHEID) de Genève (Saadé-Sbeih et Jaubert, 2013 ; Saadé-Sbeih *et al.*, 2014). Le présent article, qui est une contribution du projet Oronte de l'IHEID, présente seulement une synthèse des connaissances hydrogéologiques sur le bassin de l'Oronte, de manière à montrer la dégradation des ressources en eau souterraine de la région au cours des 40 dernières années. Les informations dont nous disposons indiquent clairement que cette dégradation est d'abord et surtout le fait d'une exploitation incontrôlée des nappes, conjoncturellement aggravée par des sécheresses périodiques.

Hydrogéologie du bassin de l'Oronte

L'Oronte ou Nahr el Asi est le principal fleuve méditerranéen du Proche-Orient (voir localisation sur la figure 2). Son cours est pour l'essentiel orienté sud-nord, car il suit la série des grandes dépressions prises entre le Mont Liban et l'Anti-Liban d'abord, puis entre le Djabal Zawiye et le désert syrien. Ce n'est que dans le nord-ouest de la Syrie qu'il s'oriente brusquement vers l'ouest entre le Djabal Zawiye et le Massif Calcaire pour se jeter dans la Méditerranée près du port turc d'Antakya, l'Antioche de l'Antiquité. Ce qu'il est convenu d'appeler Massif Calcaire est un ensemble de chaînons calcaires séparant l'Oronte de son affluent turc, l'Afrin.

L'organisation et l'orientation du cours de l'Oronte ont été déterminées depuis la fin du Miocène par la tectonique régionale, résultant de la remontée vers le Nord de la plaque arabique contre la plaque africaine, dont la côte levantine, Chypre et le Taurus sont les avant-postes. La grande faille transformante S-N de la Mer Morte (Walley, 1998 ; Butler *et al.*, 1998) est essentielle dans la structuration géologique et hydrogéologique régionale ; elle constitue la limite occidentale du bassin de l'Oronte.

Le bassin de l'Oronte est alimenté par d'importantes ressources en eau souterraine fournies par des aquifères carbonatés karstifiés. Le débit de l'Oronte était, dans les années 50, de l'ordre de 25 m³/s à Sheizar et de 70 m³/s à Jisr al Shogour, alors que vers la fin des années 90, il n'atteignait plus, à ces deux seuils, que respectivement 2 et 12 m³/s (Hamade et Tabet, 2013). Plus en aval, à la frontière entre la Syrie et la Turquie, il atteignait même près de 100 m³/s dans les années 60, alors qu'il était presque nul pendant les années 2000.

À partir des années 70, l'irrigation intensive a profondément désorganisé les écoulements souterrains à l'origine des nombreuses sources de cette région. Certaines d'entre elles ont même été asséchées plus ou moins délibérément. La documentation précise de ce déclin est délicate à établir du fait de l'absence ou de l'indisponibi-

lité de données fiables (Métral et Métral, 1979). Grâce aux données de géologie régionale, il a été possible de reconstituer la délimitation approximative des régions du bassin correspondant de manière prépondérante aux zones d'alimentation des sources ou des regroupements de sources importantes. Sur la base de l'inventaire des sources et des données afférentes, tiré des études et publications en relation avec l'hydrologie et l'hydrogéologie de ce bassin, l'historique des profondes altérations du régime des écoulements souterrains et de l'évolution du débit des sources et du fleuve Oronte a été reconstitué. Enfin, une carte hydrogéologique générale des formations aquifères du bassin et quelques coupes hydrogéologiques ont été dressées. Ainsi, cette étude vise surtout à mettre en évidence les particularités hydrogéologiques du bassin de l'Oronte et les effets du développement incontrôlé de l'irrigation sur les écoulements souterrains et le comportement des sources principales. Elle illustre aussi indirectement la nature et l'importance relative des écoulements souterrains qui, depuis le Liban, atteignent la Syrie.

Hydrogéologie générale et aquifères correspondant aux sources importantes et aux forages d'exploitation d'eau souterraine profonde

Les aquifères principaux, à l'origine des grandes sources jalonnant le bassin dans ses parties méridionale et médiane, sont constitués par d'épaisses formations calcaires du Jurassique et du Crétacé moyen (Fig. 1), alors qu'au nord, ils correspondent aux formations calcaires plus récentes de l'Éocène et du Miocène. Le bassin de l'Oronte comprend par ailleurs plusieurs formations aquifères secondaires du Crétacé supérieur et du Paléogène qui affleurent sur de grandes surfaces. Du fait de leur faible porosité et de leur perméabilité relativement élevée, ces formations aux ressources en eau modestes sont souvent significativement surexploitées. Cependant, elles retrouvent tout ou partie de leur niveau piézométrique initial après des années particulièrement pluvieuses.

Complexe aquifère Jurassique - Crétacé

L'épaisseur des formations aquifères fracturées et généralement karstifiées du Jurassique et du Crétacé, affleurant de manière prépondérante au sud et au sud-ouest du bassin, atteint plusieurs centaines de mètres. Ces formations sont séparées par 200 à 300 m de Crétacé inférieur imperméable dans l'ensemble (voir figure 1). Malgré tout, les échanges hydrauliques entre elles peuvent exister du fait des nombreux et divers accidents tecto-

1. HydroSciences, Université de Montpellier, France.

2. CHYN, Université de Neuchâtel, Suisse.

3. IHEID, Genève, Suisse.