

## Hydrogéologie karstique de l'Est de l'Unité du Beausset

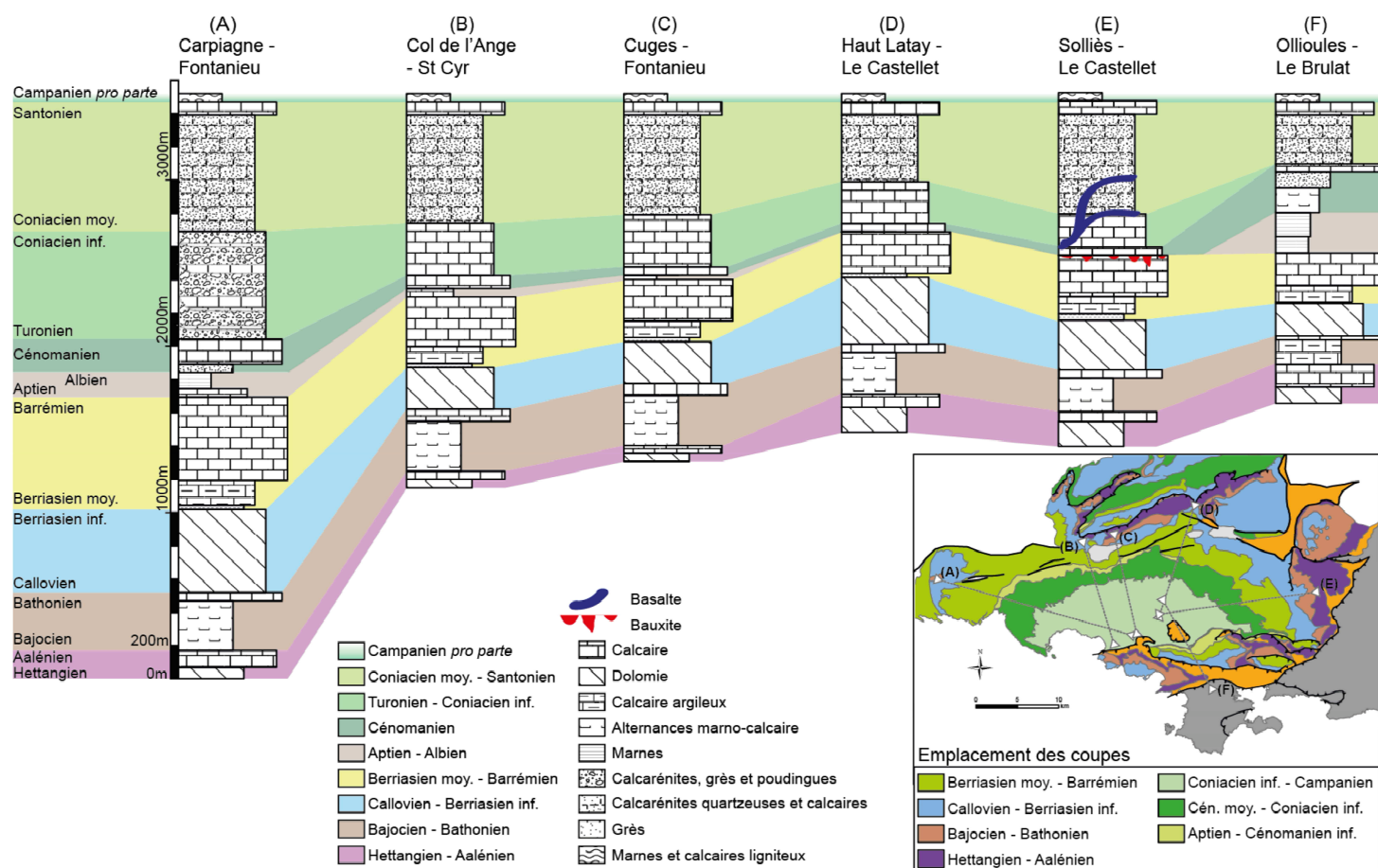
### La ressource en eau souterraine (Dardennes) et la contribution du karst aux crues éclair en milieu urbain (Las) Provence - Var – France

#### Sortie de terrain Hydrogéologie Master STPE M2 HYDRO – Hydrogéologie

Bruno ARFIB

Maître de Conférences Université Aix-Marseille,  
CEREGE Centre Saint Charles

[arfib@cerege.fr](mailto:arfib@cerege.fr) / [karsteau@gmail.com](mailto:karsteau@gmail.com)



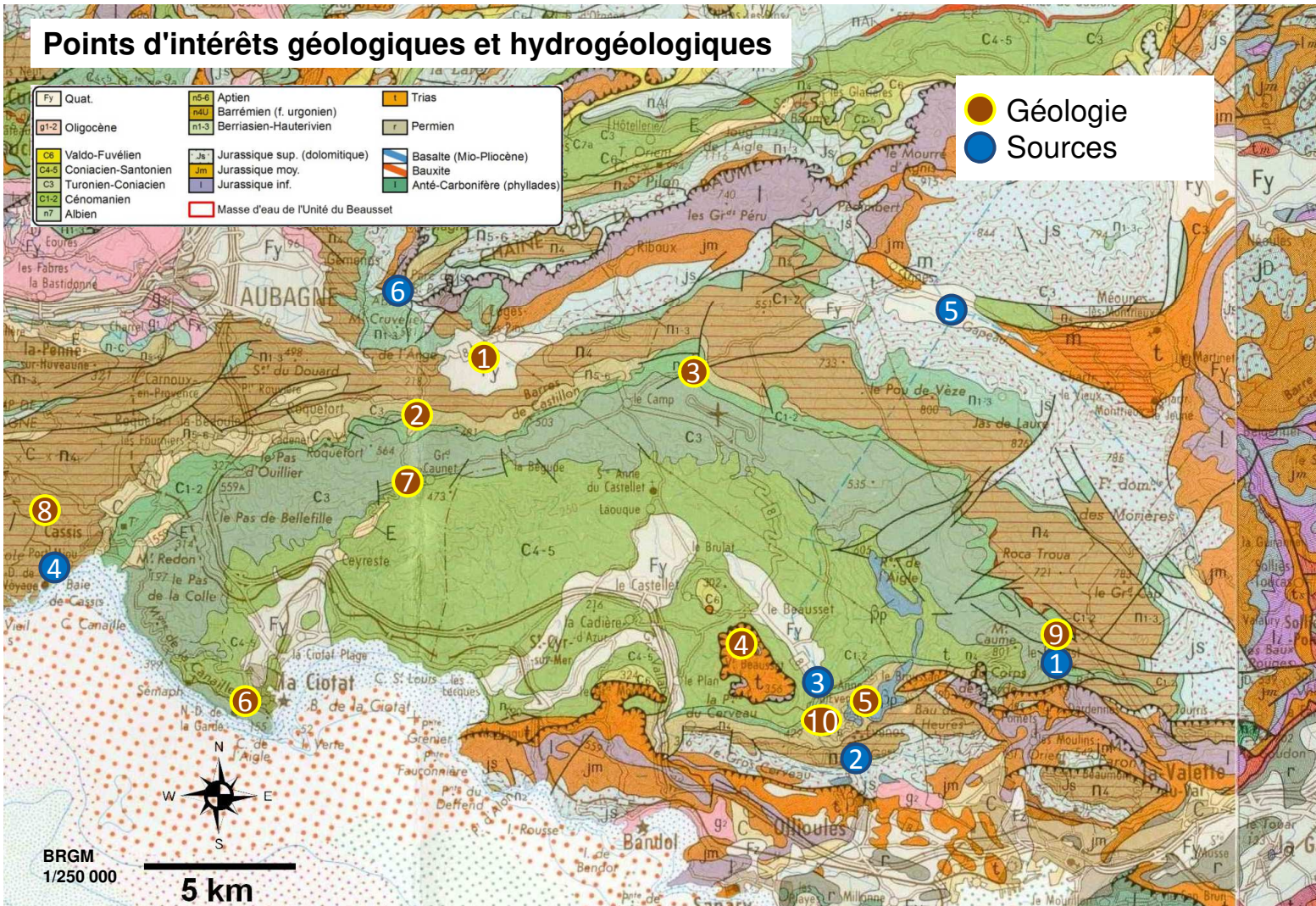




## Points d'intérêts géologiques et hydrogéologiques

|                          |                                  |                                    |
|--------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| Fy Quat.                 | n5-6 Aptien                      | Trias                              |
| g1-2 Oligocène           | n4U Barrémien (f. urgonien)      | Permien                            |
| C6 Valdo-Fuvélien        | n3 Jurassique sup. (dolomitique) | Basalte (Mio-Pliocène)             |
| C4-3 Coniacien-Santonien | jm Jurassique moy.               | Bauxite                            |
| C3 Turonien-Coniacien    | js Jurassique inf.               | Anté-Carbonifère (phyllades)       |
| C2 Cénomanien            |                                  |                                    |
| n7 Albien                |                                  |                                    |
|                          |                                  | Masse d'eau de l'Unité du Beausset |

● Géologie  
● Sources



## Points d'intérêts géologiques et hydrogéologiques

### Géologie - Karst

- ① Poljé de Cuges les Pins et embuts
- ② Calcaires marneux de l'Aptien (Gargasien)
- ③ Plateau du Camp
- ④ Klippe du Beausset
- ⑤ Basaltes d'Evenos
- ⑥ Conglomérat du Bec de l'Aigle
- ⑦ Perte de Mauregard
- ⑧ Calanques de Marseille à Cassis
- ⑨ Bauxite du Revest
- ⑩ Du crétacé sup. au jurassique sup. à travers les gorges d'Ollioules

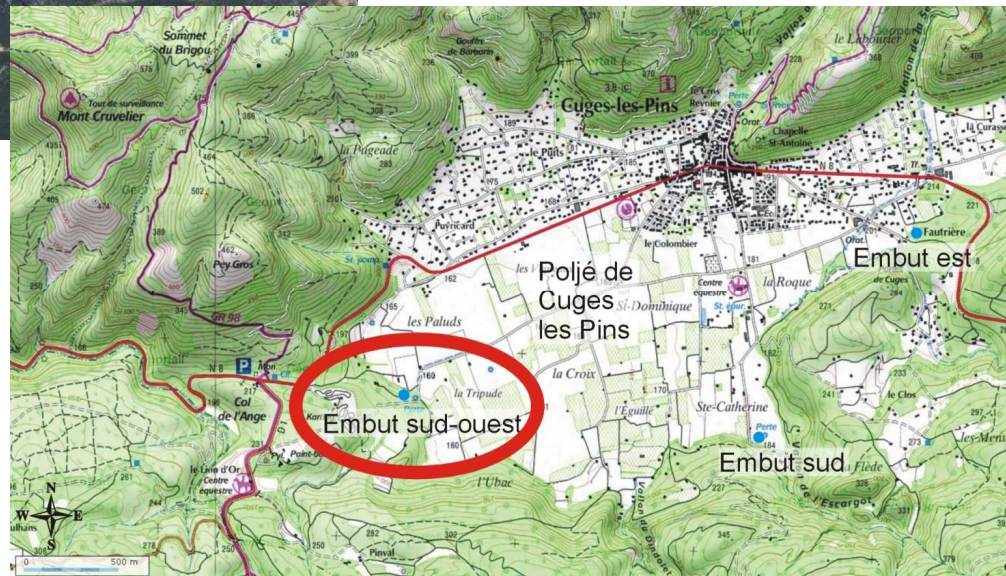
*Santonien marneux, Coniacien calcaire, calcarénite, resédimentation carbonatée, Cénomanien calcaire marbrier, Albien-Aptien calcaire marneux, Urgonien calcaire, Jurassique supérieur dolomitique*

### Sources

- ① Retenue de Dardennes – Le Revest les Eaux
- ② Sources des gorges d'Ollioules (Labus, Trou de la bombe, Maire des Fontaines, Bonnefont)
- ③ La Foux de Sainte Anne d'Evenos
- ④ Sources sous marine de Cassis (Port Miou et Bestouan)
- ⑤ Source du Gapeau
- ⑥ Source de Saint Pons



## Les morphologies karstiques autour de Cuges les pins



## Le bassin versant des sources de Dardennes





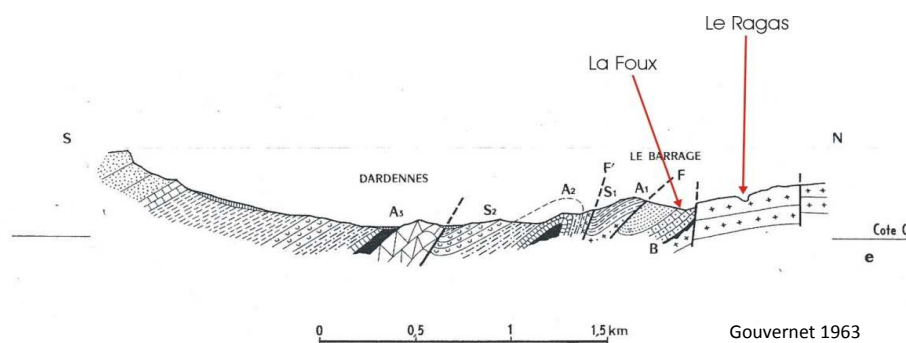
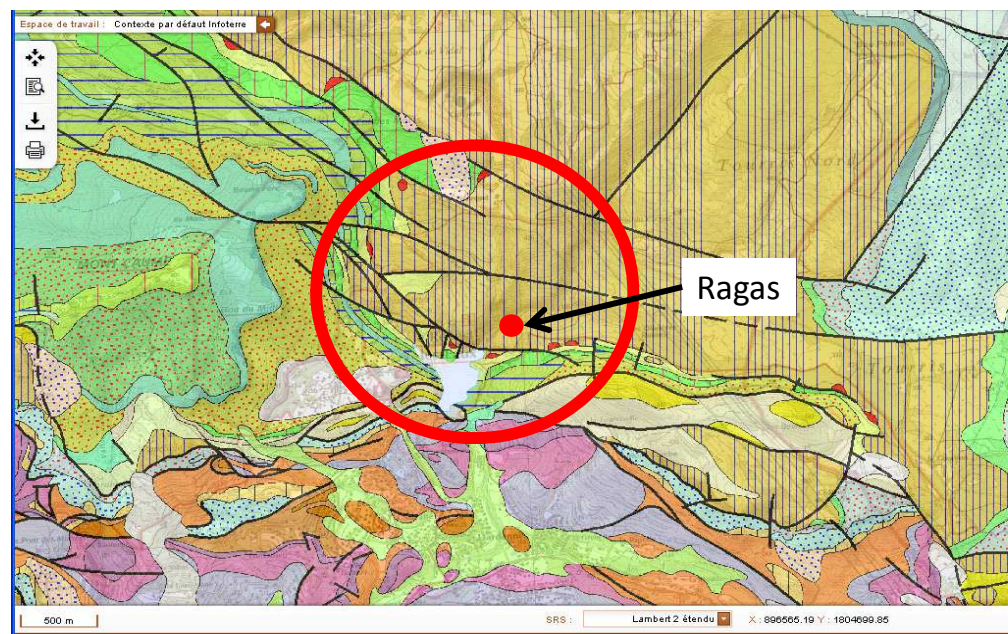
The stratigraphic column is divided into several geological units, each with a characteristic lithology and an associated age range:

- Crétacé Supérieur** (Green): 100Ma to 145Ma. Includes the **U<sub>4</sub>** unit (dashed blue line).
- Crétacé Inférieur** (Dark Green): 145Ma to 160Ma. Includes the **U<sub>3</sub>** unit (dashed blue line).
- Jurassique Supérieur** (Light Blue): 160Ma to 200Ma. Includes the **U<sub>2</sub>** unit (dashed blue line).
- Jurassique Inférieur Moyen** (Dark Blue): 200Ma to 250Ma. Includes the **U<sub>1</sub>** unit (dashed blue line).
- Trias** (Orange): 250Ma to 300Ma.
- Permien** (Pink): 300Ma to 360Ma.
- Silicé** (Dark Pink): 360Ma to 400Ma.

The column also shows the **Bauxite** layer (red) and the **β** layer (dashed blue line). The **Unité réservoir** is indicated by a dashed blue line. The **Sources de Dardennes** are marked with a blue dot. The lithologies are represented by patterns: Grès (diagonal lines), Calcaire (horizontal lines), Dolomie (wavy lines), Marnes (stippled), and Evaporite (dotted).

Figure 1: Stratigraphic correlation chart (Stratigraphic correlation) showing geological layers from Toulon to Siou Blanc. The chart includes a legend for geological periods (Crétacé Sup., Crétacé Inf., Jurassique Sup., Jurassique Inf. et Moy., Trias, Permien, Socle (Paléozoïque)), lithology (Bauxite), and specific sources (Sources, Source de Dardennes, Source St Antoine). The chart also indicates the Niveau marin (sea level) and the décrochement faille du Cierge (Cierge fault offset).

## Une géologie complexe : zone du Revest-les-Eaux



- | Projet : Var |                                                                                     |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|              | Quaternaire : argiles de décalcification remplissant des poches karstiques          |
|              | Eboulis récents                                                                     |
|              | Würm : cailloutis, graviers, sables                                                 |
|              | Würm : épandages locaux, colluvions, cailloutis, limons                             |
|              | Santonien : intercalations mameuses                                                 |
|              | Conacien : calcaires à Rudistes                                                     |
|              | Turonien supérieur et Coniacien inférieur : grès glauconieux et mames sableuses     |
|              | Turonien supérieur : calcaires à Rudistes                                           |
|              | Turonien moyen : grès                                                               |
|              | Turonien inférieur : calcaires gréseux et mames                                     |
|              | Cénomanien : calcaires à Rudistes, calcaires argileux                               |
|              | Cénomanien supérieur : mames grises                                                 |
|              | Cénomanien inférieur : grès et sables, calcaires gréseux, mames sableuses           |
|              | Clansayésien : mames                                                                |
|              | Aptien supérieur (Gargasien) : mames                                                |
|              | Aptien inférieur (Bédoulien) : calcaires et calcaires marneux siliceux ou à silex   |
|              | Bauxite                                                                             |
|              | Barremien : calcaires à Rudistes (faciès urgonien), dolomitisé à la base            |
|              | Valanginien-Hauterivien indifférenciés                                              |
|              | Valanginien : mames et calcaires, lumachelles                                       |
|              | Jurassique supérieur indifférencié dolomitique                                      |
|              | Tithonien (Portlandien) : calcaires blancs                                          |
|              | Tithonien moyen (Portlandien supérieur) : calcaires zoogènes blancs et calcaires d' |
|              | Bathonien supérieur : mames et marno-calcaires                                      |
|              | Bajocien supérieur-Bathonien inférieur : marno-calcaires                            |
|              | Bajocien et Bathonien non différenciés : calcaires mameux, calcaires phosphatés     |
|              | Lias moyen à Bajocien inférieur : calcaires à silex                                 |
|              | Hettangien : dolomies blanchâtres ou gris cendré; calcaires, mames                  |
|              | Rhétien : calcaires en plaquettes, cargneules, mames vertes réséda                  |
|              | Keuper : argiles rouges, gypse, dolomies, cargneules                                |
|              | Muschelkalk : calcaires et dolomies                                                 |
|              | Trias inférieur (grès bigarré provençal) : grès arkosiques à dragées de quartz      |
|              | Réseau hydrologique                                                                 |



Octobre 2013

Le RAGAS

Photo : Projet SpéléH2O, P. Maurel et T. Lamarque

Janvier 1999

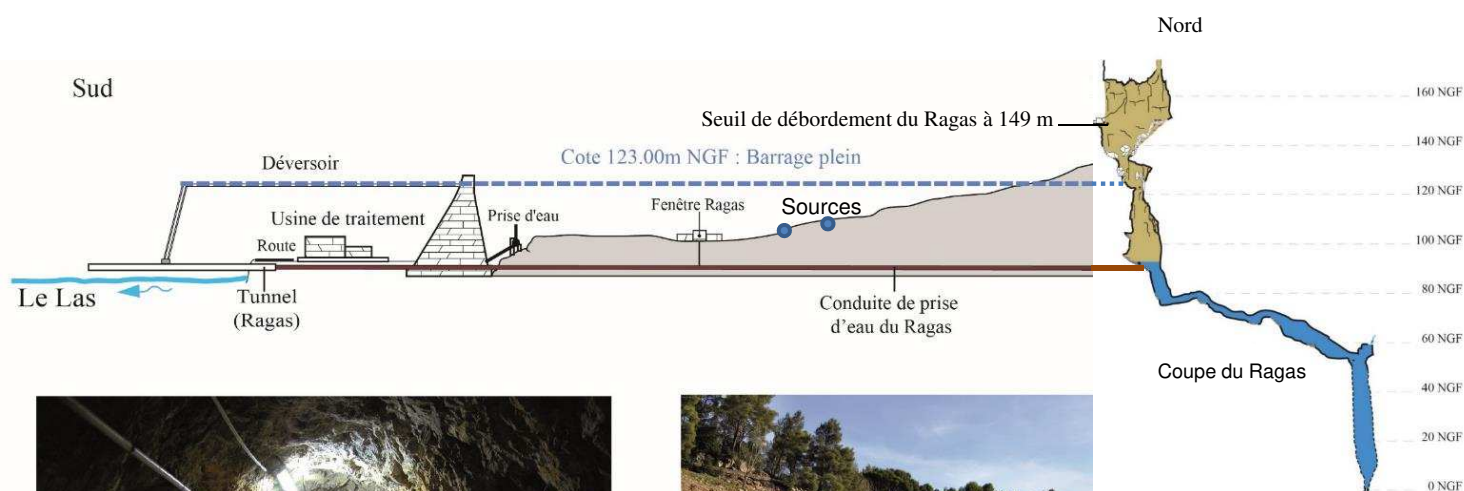
En crue



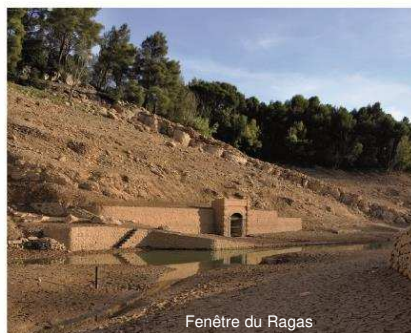
Sans eau



## Le barrage de Dardennes et le Ragas



Tunnel du Ragas



Fenêtre du Ragas

Levés topographiques : Jean-Pierre Lucot  
Assisté de : Thierry Lamarque, Philippe Maurel et Luc Rossi  
Topographie de la partie souterraine immergée : Michel Guis,  
CRPS, Jean-Jacques Bolanz et Claude Touloundjian  
Reports : Jean-Pierre Lucot  
Synthèse générale et illustration : Philippe Maurel  
Modifié par Bruno Arfib, 01/10/2018



Conductivité électrique des sources de l'unité du Beausset suivies durant les thèses Fournillon (2012) et Baudement (2018)

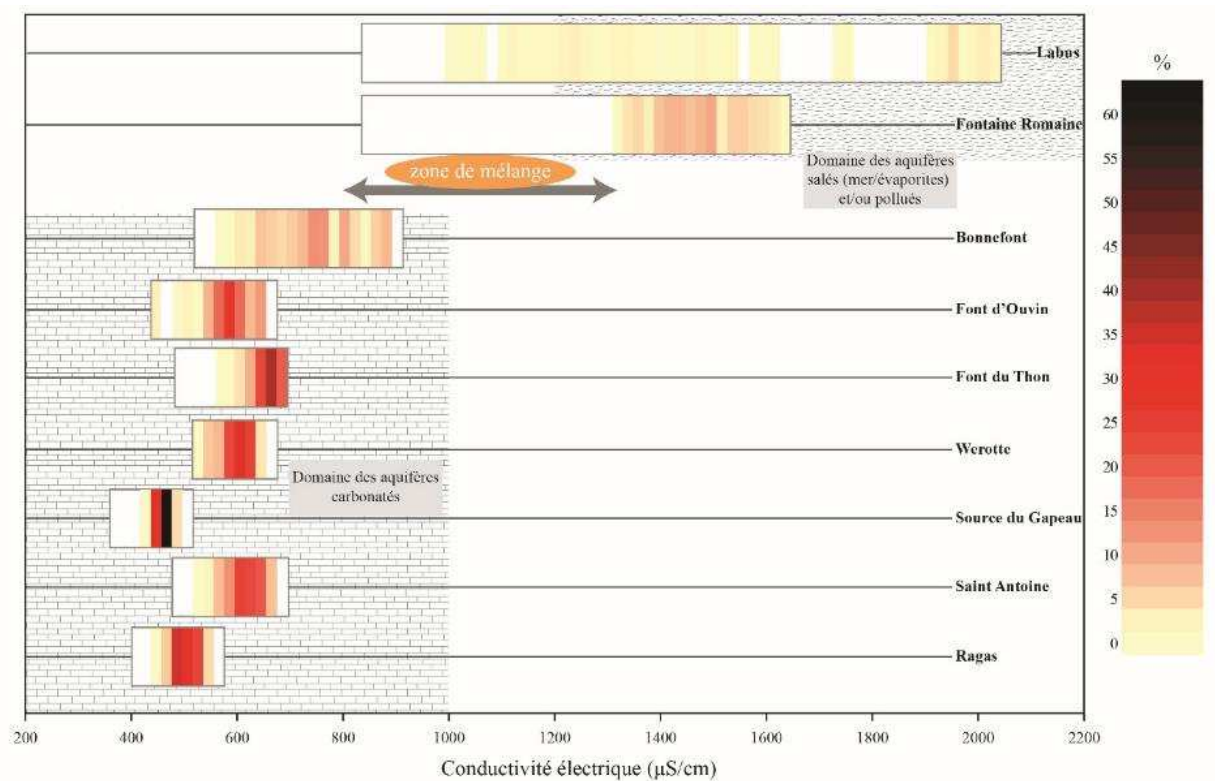
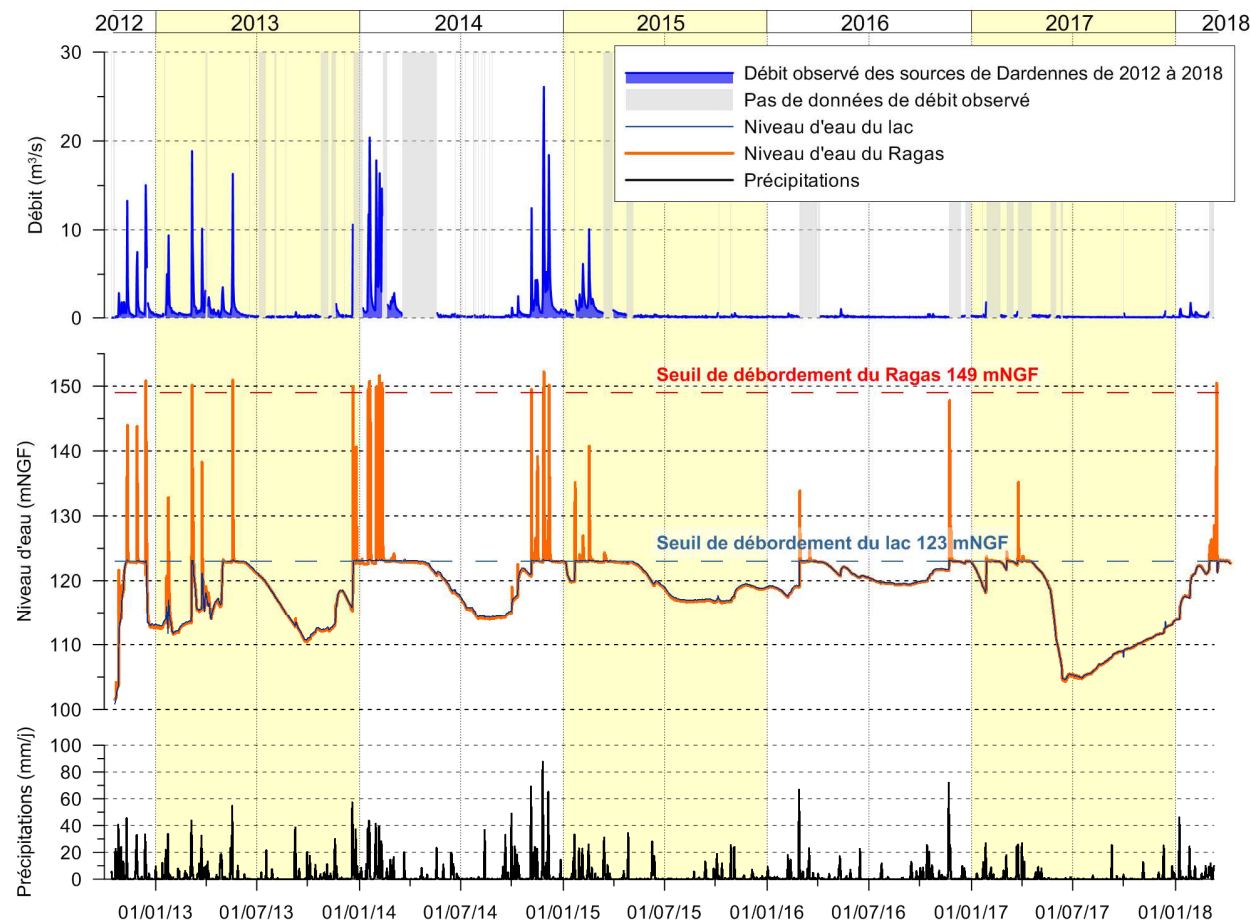


Figure 2.31 : Synthèse de la distribution fréquentielle de la conductivité électrique des sources étudiées (modifié de Fournillon, 2012). Extrait de Baudement 2018.

Les sources de Dardennes et le Ragas



Extrait de Garin et Arfib, 2018

Figure 4 : Chronique de pluie, niveau d'eau et débit pour l'étude du karst de Dardennes entre octobre 2012 et mars 2018. Les précipitations journalières sont la moyenne des stations de Toulon La Mitre, Le Castellet aérodrome et La Limate. Le niveau d'eau dans le lac de Dardennes est mesuré une fois par jour par Véolia. Le niveau d'eau du Ragas est enregistré automatiquement toutes les 15 minutes. Les niveaux sont exprimés en altitude. Le débit observé est le débit total des sources de Dardennes au pas de temps journalier, incluant le débit vers le Las à l'aval du barrage, le débit capté pour l'AEP, l'évaporation sur le lac et le stockage/déstockage du lac.



# Crues du Ragas de Dardennes

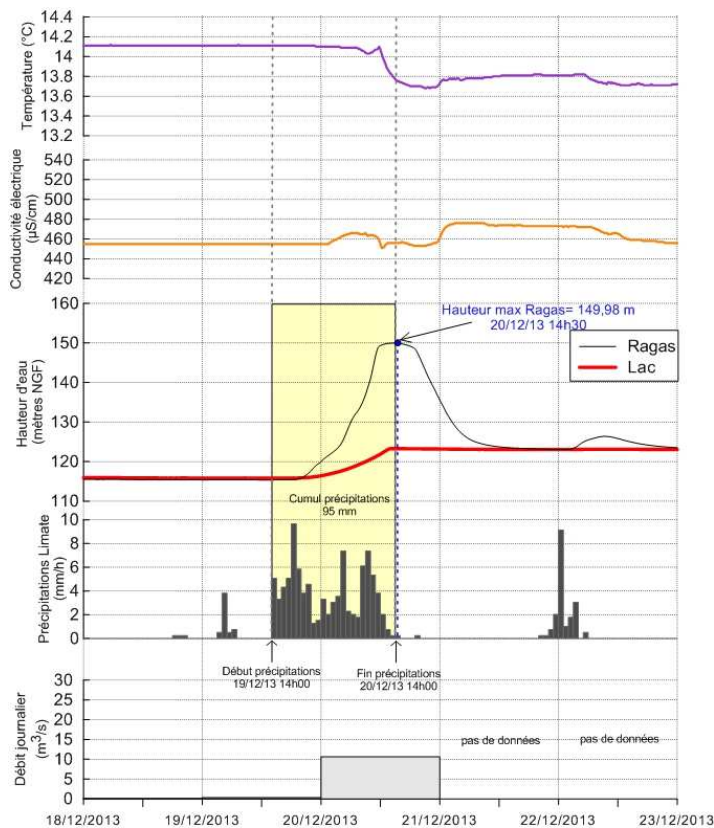


Figure 2 34 Données CTD de la crue du 20 décembre 2013 : température, conductivité électrique, hauteur d'eau, précipitations horaires (pluviomètre de la Limate) et débit journalier. Le rectangle beige représente la durée des précipitations. Extrait de Baudement 2018

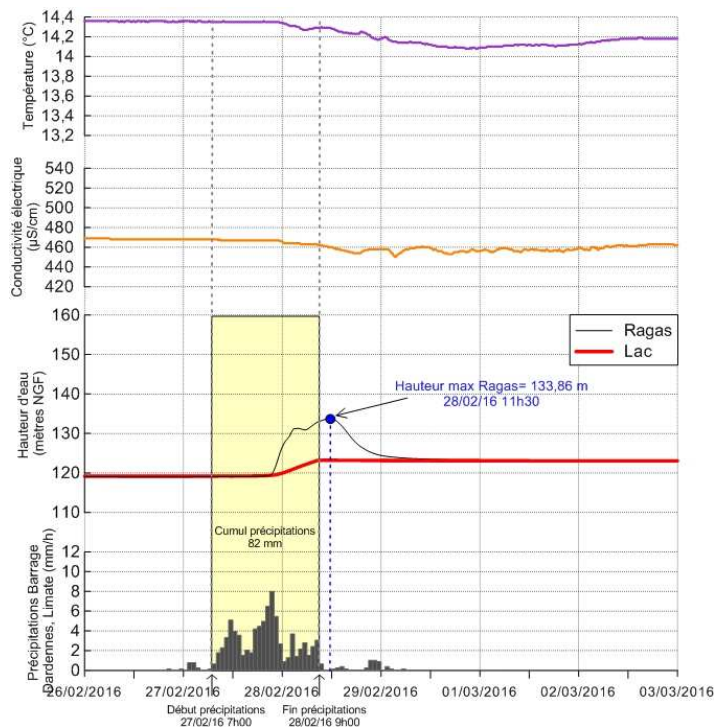


Figure 2 36 Analyses CTD de la crue des 27 et 28 février 2016 : température, conductivité électrique, hauteur d'eau, précipitations journalières. Le rectangle beige représente la durée des précipitations. Le débit journalier n'est pas disponible pour cette crue. Extrait de Baudement 2018

Figure 2 37 Hauteur d'eau dans le lac et dans le Ragas. Les crues étudiées sont numérotées de 1 à 20. Extrait de Baudement 2018

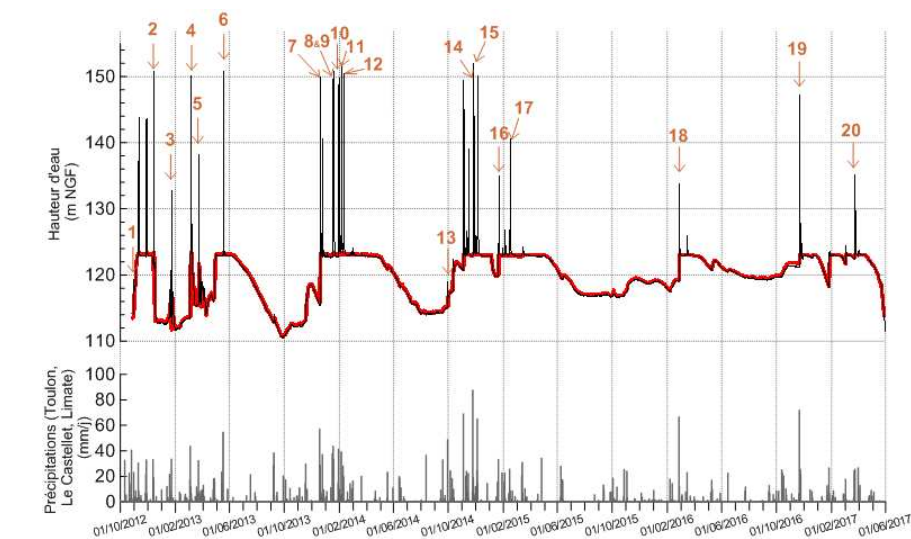
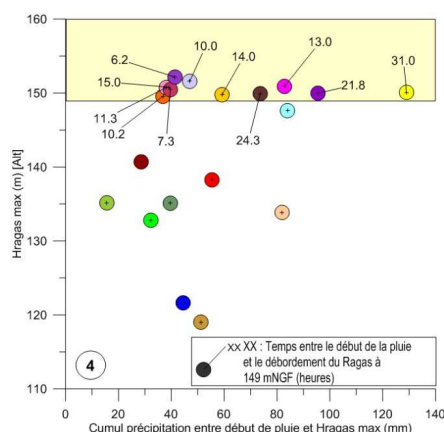
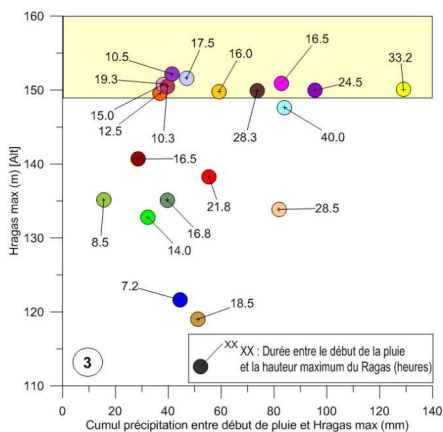
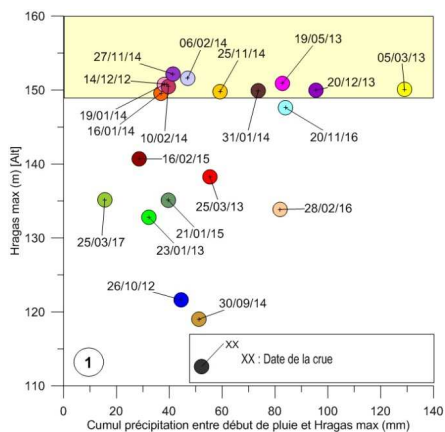
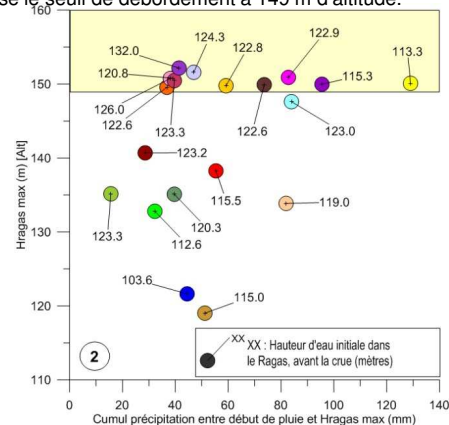


Figure 2 38 Relation entre la hauteur maximale atteinte dans le conduit du Ragas (Hmax) lors des différentes crues en fonction du cumul des précipitations entre le début de celles-ci et Hmax. Le rectangle beige représente toutes les crues dont le niveau d'eau du Ragas a dépassé le seuil de débordement à 149 m d'altitude.





## Modélisation Pluie-Débit avec KarstMod

### Le débit des sources de Dardennes :

Séparation du débit total entre le débit de M vers S (écoulement de base) et le débit de C vers S (écoulement rapide) avec le modèle Dard\_Non\_Lin calé sur la période P1 (22/12/2012 au 30/08/2014)

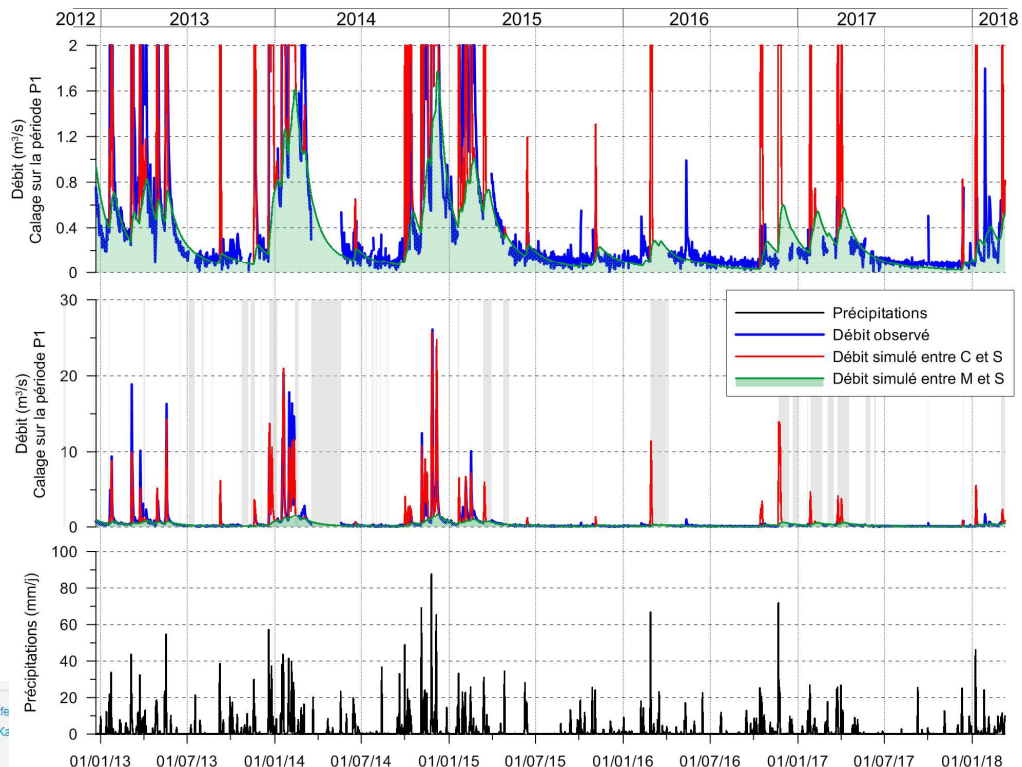
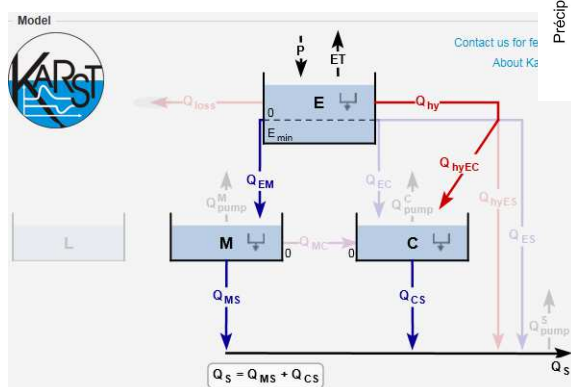
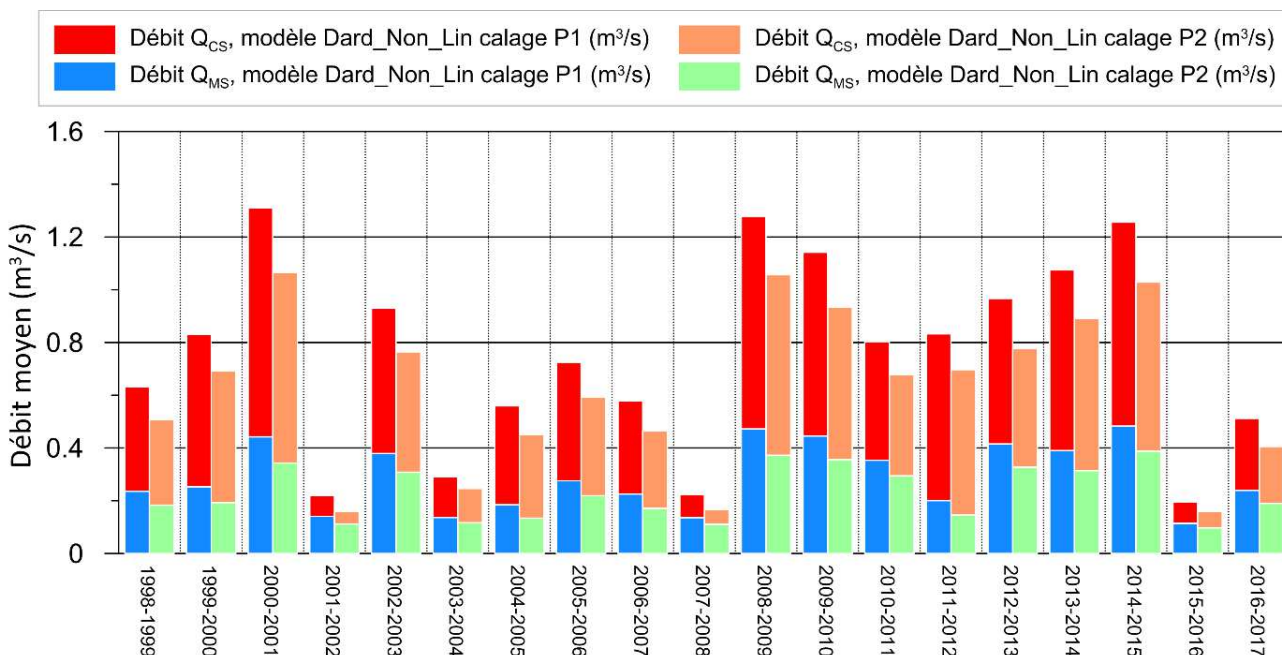


Schéma conceptuel de modélisation Pluie-Débit de l'aquifère karstique des sources de Dardennes proposé par Baudement (2018)

Extrait de Garin et Arfib, 2018

## Modélisation Pluie-Débit avec KarstMod : écoulement lent et écoulement rapide entre 1998 et 2017



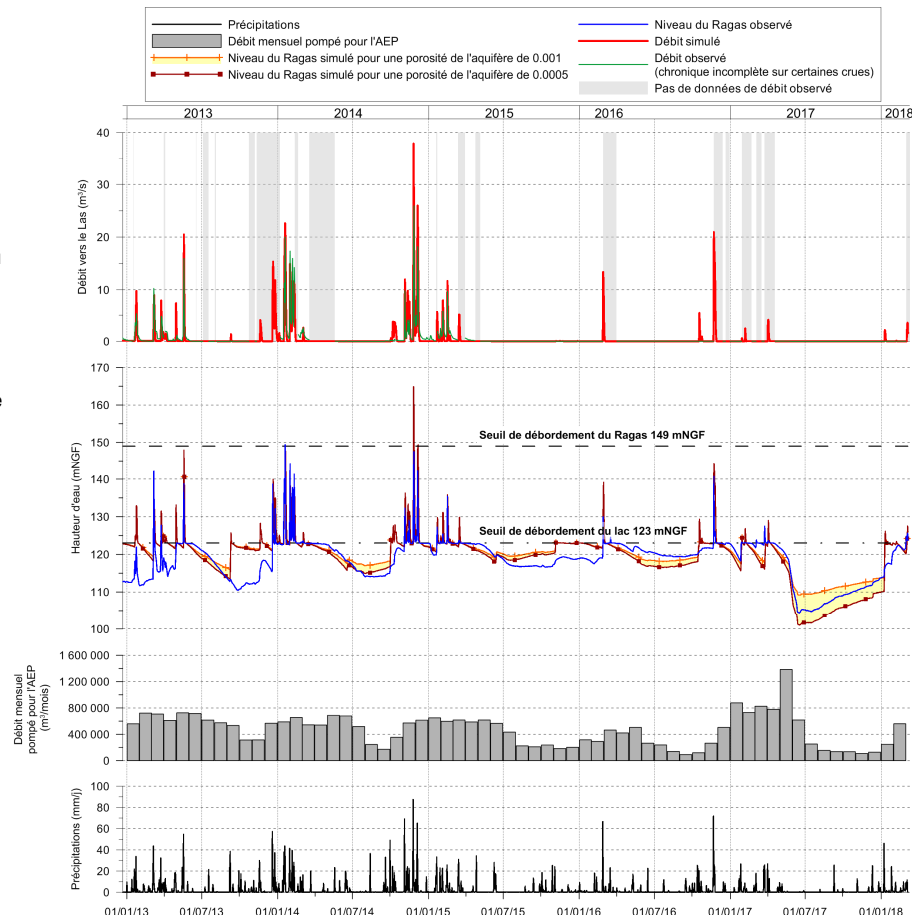
Déconvolution entre l'écoulement lent (débit QMS) et l'écoulement rapide (Débit QCS) par cycle hydrologique du débit moyen annuel aux sources de Dardennes, simulé avec le modèle Dard\_Non\_Lin (calage sur la période P1 et la période P2), entre 1998 et 2017 (1er septembre N au 31 août N+1)

Extrait de Garin et Arfib, 2018



# Modélisation Pluie-Débit-Niveau avec KarstMod

Simulation par le modèle Dard\_Sans\_Fond du niveau d'eau moyen journalier dans le Ragas et du débit vers le Las à l'aval du barrage de Dardennes (ce débit inclut aussi la part d'eau évaporée du lac), entre 2013 et 2018. Le niveau d'eau simulé est proposé pour deux gammes de porosité de l'aquifère. Le débit mensuel pompé pour l'AEP et les précipitations journalières sont également représentées. Le débit pompé du mois de juin 2017 inclut environ 640 000 m<sup>3</sup> d'eau lâchés dans le Las par ouverture des vannes du barrage pour la vidange décennale.



Structure du modèle Dard\_Sans\_Fond, simulant le débit des sources de Dardennes alimentant le Las à l'aval du barrage de Dardennes, et tenant compte du prélèvement AEP dans le réservoir C.

Extrait de Garin et Arfib, 2018

## Le Las

- 8 km de long
- Climat méditerranéen
- Bassin versant karstique ~70 km<sup>2</sup>
- Bassin versant topographique : quelques km<sup>2</sup>
- Deux aménagements anthropiques :
  - le barrage
  - la rivière couverte





## Le risque d'inondation de la ville de Toulon



21

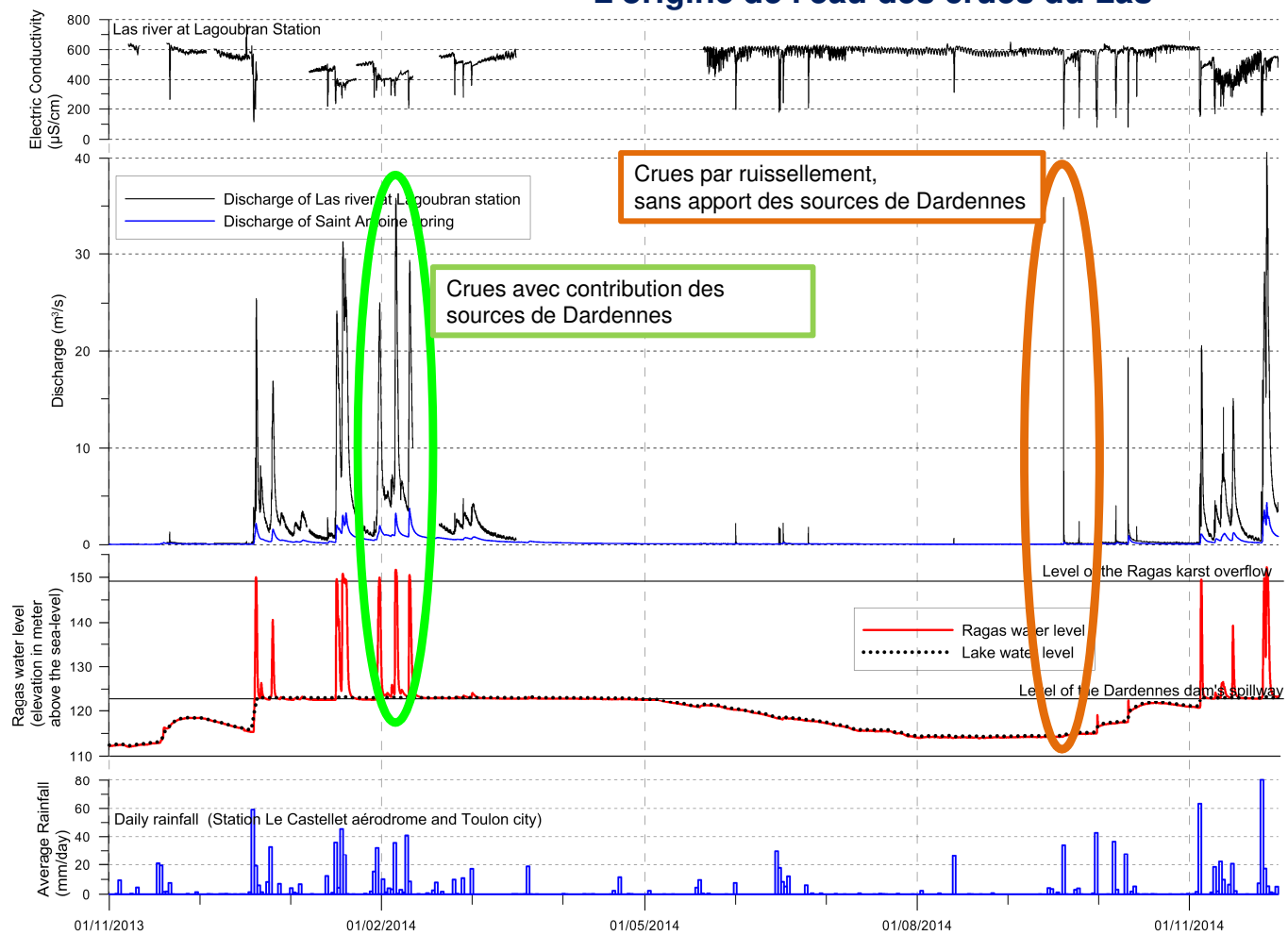
## Les sources de la retenue de Dardennes



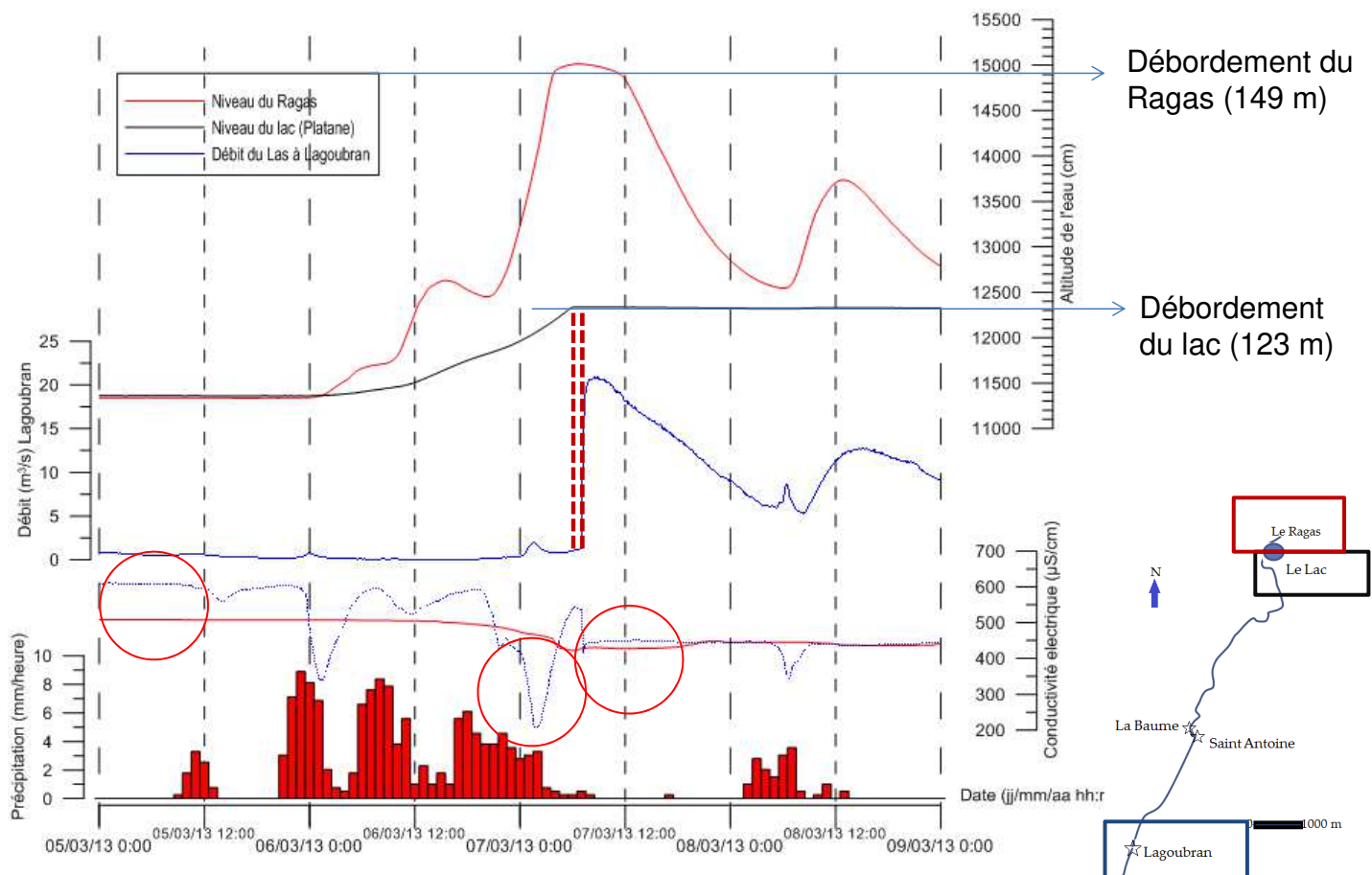
Val d'As – 2008 – Le Las : Une rivière dans la ville



## L'origine de l'eau des crues du Las



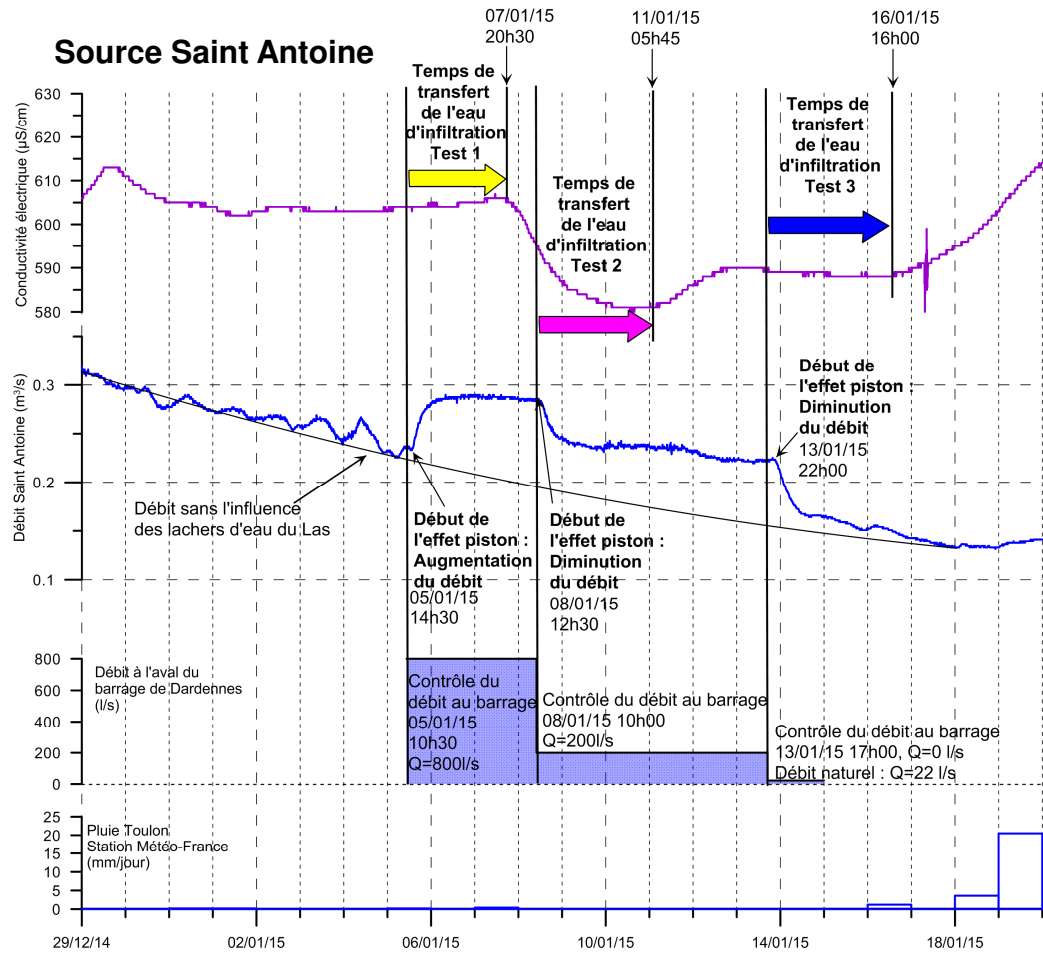
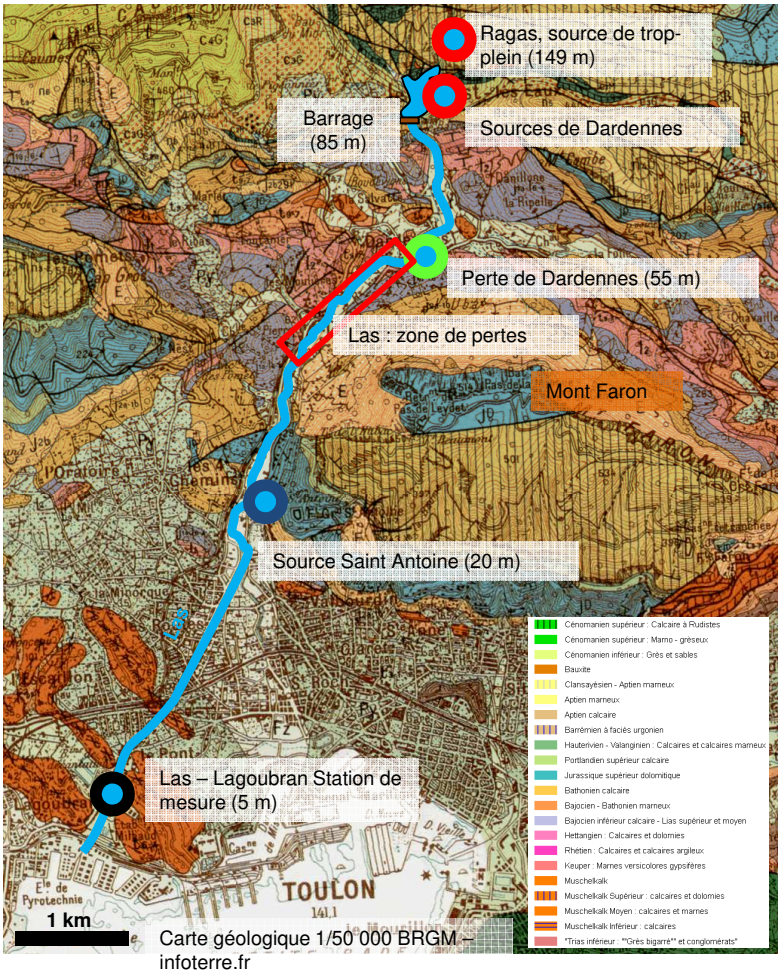
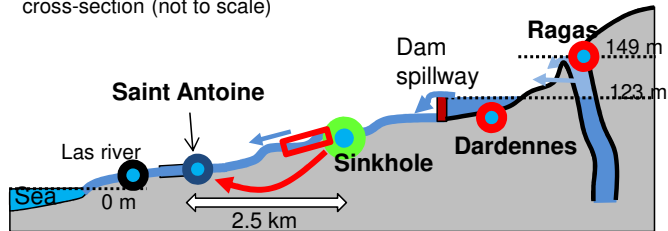
## Crue éclair karstique dans le Las





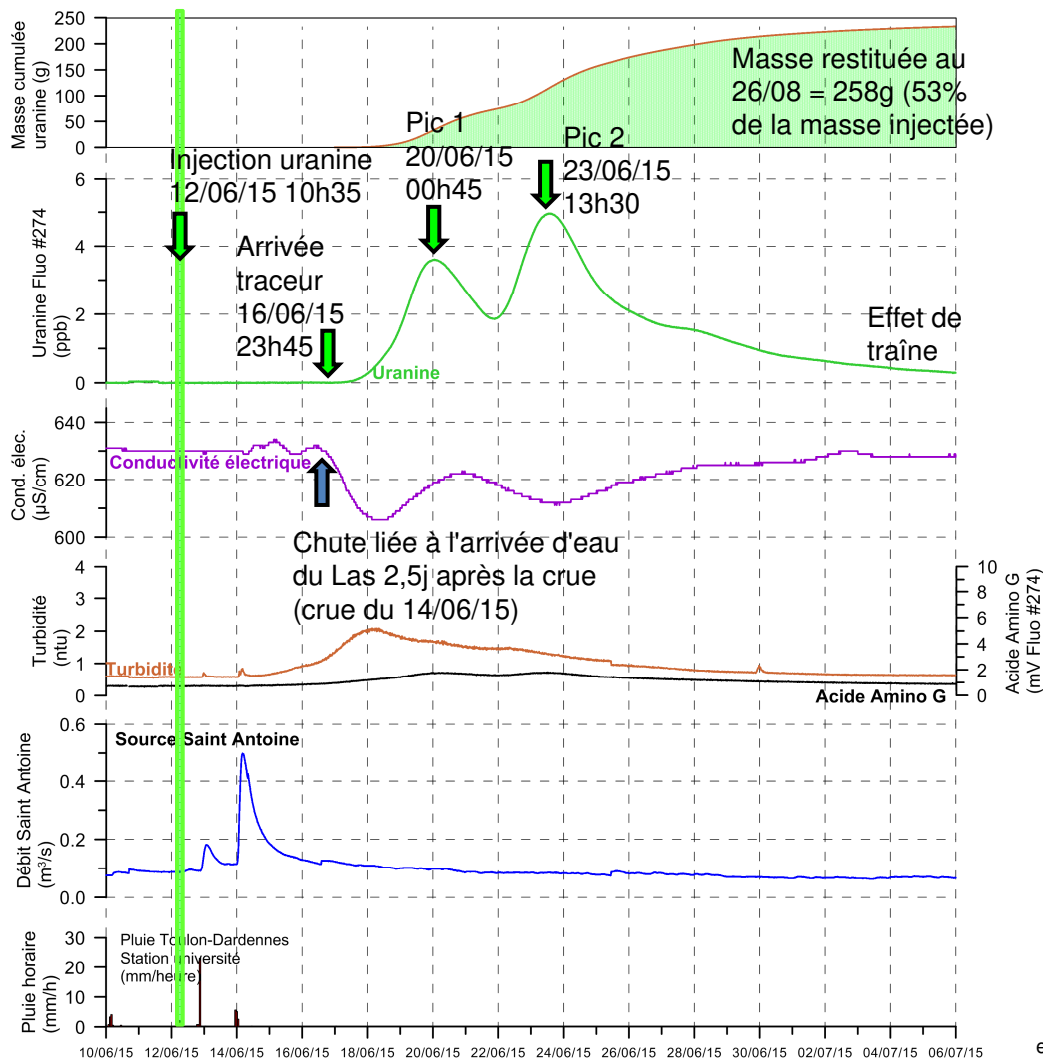


cross-section (not to scale)



| # Test hydraulique | Débit de lâcher d'eau du barrage dans le Las | Temps de réaction de la source par effet piston | Temps de transfert de l'eau d'infiltration des pertes du Las | Débit des pertes du Las alimentant la source à la fin du test / Pourcentage par rapport au débit de la source                    |
|--------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                  | 800 l/s                                      | 4 heures                                        | 2 jours 10 h (=58 h)                                         | 88 l/s / 31%                                                                                                                     |
| 2                  | 200 l/s                                      | 2 h 30                                          | 2 jours 20 h (=68 h)                                         | 58 l/s / 26%                                                                                                                     |
| 3                  | 0 l/s                                        | 5 h 00                                          | 2 jours 23 h (=71 h)                                         | 0 l/s<br>(le débit naturel de 22 l/s s'infiltrait également dans les pertes du Las mais n'est pas comptabilisé dans ces calculs) |





## Traçage artificiel

Figure 6 : Evolution au cours du temps des mesures CTD et du fluorimètre GGUN au pas de temps de 15 minutes sur la source Saint Antoine lors du traçage artificiel du 12/06/2015 à la perte du Las au hameau de Dardennes

27

extrait de Lamarque et al. Conférence Eurokarst 2016

## Bruit de fond naturel variable au cours des crues

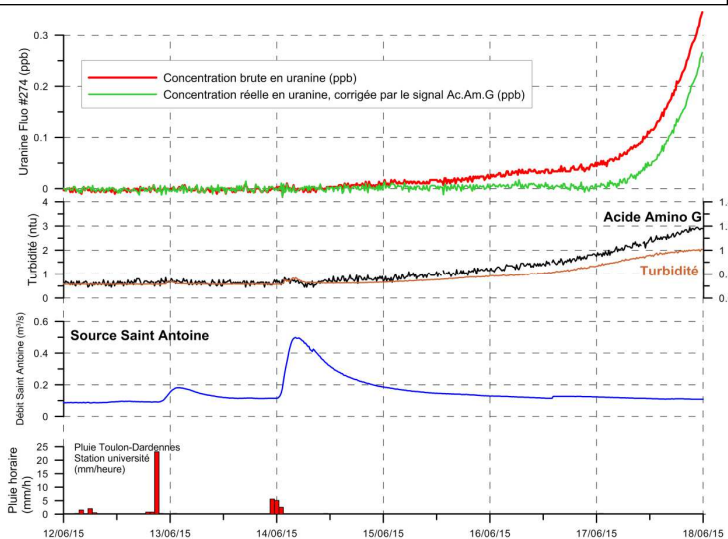


Figure 7 : Concentration en uranine brute (correction sur la turbidité uniquement) et réelle avec une correction supplémentaire utilisant le signal de l'Acide Amino G du fluorimètre (GGUN Cat. 3) représentatif de la fluorescence de la Matière Organique variable en fonction des crues

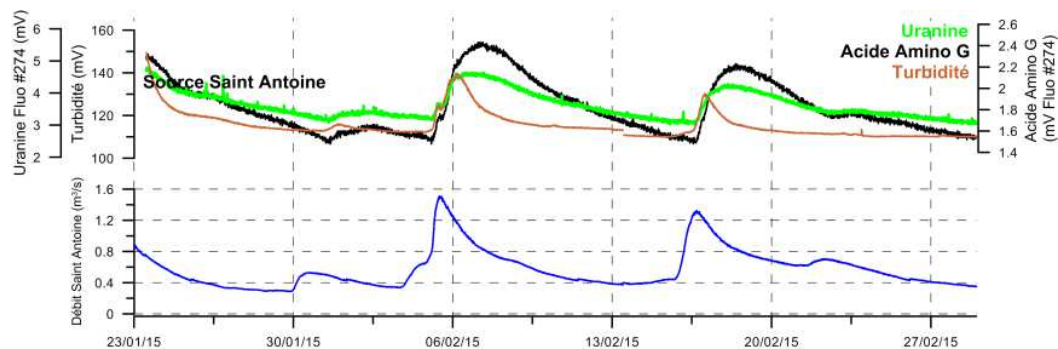
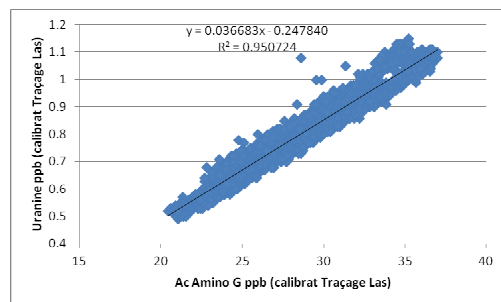


Figure 8 : Corrélation entre les variations du signal Uranine et Acide Amino G correspondant au bruit de fond naturel variable au cours des crues

28

extrait de Lamarque et al. Conférence Eurokarst 2016