

**PROJET DE TERRITOIRE POUR LA GESTION DES
RESSOURCES EN EAU
BASSIN VERSANT L'HUVEAUNE, DE SES
AFFLUENTS & AQUIFERES LIES**



**NOTE TECHNIQUE
NATURALISATION DES DEBITS**

Validée par la Commission Ressource du 06 fev.-25

Comité de suivi de l'étude : Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, Département des Bouches du Rhône, DDTM13, DREAL PACA, Région SUD Provence Alpes Côte d'Azur, Métropole Aix Marseille Provence, Agglomération de Provence Verte, ARS PACA, Chambre d'Agriculture des Bouches du Rhône et du Var, Parc Naturel Régional de la Ste Baume, FPPMA13, FDSH13.

Mission suivie par : **Eric Brenner**

Pilotage : **Roxane Roy**

Financée par :



Rapport rédigé par :



SOMMAIRE

I. NOTE TECHNIQUE HYDROLOGIE NATURELLE : PRINCIPES.....	7
II. METHODE GENERALE.....	7
II.1 MAILLAGE.....	10
II.2 HYDROMETRIE	10
II.3 INFLUENCES.....	11
III. INFLUENCES MODELISEES	11
III.1 DONNEES DE PRELEVEMENTS	12
III.1.a Prélèvements pour l'AEP	13
III.1.b Prélèvements industriels.....	14
III.1.c Prélèvements pour l'irrigation et les canaux	15
III.2 RATIO DES PRELEVEMENTS D'EAU SOUTERRAINE SUR LE DEBIT POUR EVALUER LEURS IMPACTS	22
III.2.a Prélèvements en milieu « homogène » – alluvions	23
III.2.b Prélèvements en milieu hétérogène - calcaires.....	25
III.3 APPORTS ET LEURS IMPACTS	28
IV. L'IMPACT DES USAGES SUR LES DEBITS MESURES : RESULTATS HYDROLOGIQUES.....	30
IV.1 L'HUVEAUNE A SAINT-ZACHARIE	30
IV.2 L'HUVEAUNE A ROQUEVAIRE	31
IV.3 L'HUVEAUNE A AUBAGNE	31
IV.4 L'HUVEAUNE A MARSEILLE.....	32
V. MODELISATION HYDROCLIMATIQUE DES DEBITS NATURELS.....	32
V.1 CALAGE DES MODELES HYDROLOGIQUES ET PERFORMANCE ASSOCIEE	32
V.2 RESULTATS DE CALAGE DES MODELES.....	33
V.2.a L'Huveaune à Saint-Zacharie.....	34
V.2.b L'Huveaune à Roquevaire	38
V.2.c L'Huveaune à Aubagne	40

VI. RESULTATS DE LA MODELISATION DES DEBITS NATURALISES	42
VI.1 BILAN HYDRIQUE DES STATIONS JAUGEEES	42
VI.1.a L'Huveaune à Saint-Zacharie.....	43
VI.1.b L'Huveaune à Roquevaire	43
VI.1.c L'Huveaune à Aubagne	44
VI.2 APPROCHE DES PERTES KARSTIQUES PAR LE BILAN HYDRIQUE	45
VI.3 REGIONALISATION DE L'HYDROLOGIE SIMULEE AUX SOUS BASSINS NON JAUGES	47
VI.3.a L'Huveaune à Marseille	48
VI.3.b L'aval du torrent du Fauge à Aubagne	49
VI.3.c Le Jarret à Marseille Saint Just	50
VII. CONCLUSION	51
VIII. FICHES DE SYNTHESE DES DEBITS MESURES ET DES DEBITS NATURALISES MODELE GR	51

FIGURES

Figure 1 - Sous bassins constituant le maillage de la modélisation.....	10
Figure 2 - Répartition de l'origine de l'eau prélevée sur le bassin versant l'Huveaune	12
Figure 3- Prélèvements des ressources locales en fonction des usages	13
Figure 4 - Volumes annuels par sous-bassins.....	13
Figure 5 - Répartition par sous-bassin des volumes annuels prélevés issus de la BNPE.....	14
Figure 6 - <i>prélèvements annuels d'irrigation par sous-bassin (source BNPE)</i>	15
Figure 7- Prélèvements du barrage du pont de l'Etoile à Aubagne (source BNPE).....	15
Figure 15 : Statistique du besoin théorique d'irrigation sur le bassin du Fauge.....	18
Figure 16 : Statistique du besoin théorique d'irrigation sur le bassin d'Aubagne	19
Figure 8- Sens d'écoulement des masses d'eau souterraines.....	22
Figure 9 - Schéma de principe du débit soustrait à la rivière en fonction du débit prélevé sur le forage	24
Figure 10- Schéma conceptuel du champ captant de Roquevaire lors de pompages d'essais en avril 2023.....	25
Figure 11- Prélèvements dans un aquifère hétérogène (exemple du forage de la Brise à St Zacharie).....	26
Figure 12- Les prélèvements et rejets par usages dans le bassin versant de l'Huveaune	28
Figure 13- Chronique de débit mesuré, les impacts des usages modélisés et les débits naturels reconstitués pour la station de St Zacharie en 2021 sur la période d'étiage.....	30
Figure 15- Chronique de débits mesurés, les impacts des usages modélisés et les débits naturels reconstitués pour la station de Roquevaire en 2021 sur la période d'étiage	31
Figure 17- Chronique de débit mesuré, les impacts des usages modélisés et les débits naturels reconstitués pour la station de Aubagne en 2021 sur la période d'étiage	31
Figure 19- Chronique des impacts des usages modélisés et les débits naturels reconstitués pour la station de Marseille en 2021 sur l'année	32
Figure 20 Débit simulé, naturalisé de référence et observé de l'Huveaune à Saint-Zacharie en 2021 et 2022.....	35
Figure 21 Volume d'eau annuel écoulé simulé et de référence de l'Huveaune à Saint-Zacharie	36
Figure 22 Courbe de débits classés modélisés et de référence pour la station de Saint-Zacharie.....	36
Figure 23 Comparatif des débits horaires et journaliers (observés et simulés) pour un évènement pluvieux en octobre 2021.....	37
Figure 24 Débit simulé, naturalisé de référence (calculé avec le modèle d'impact) et observé de l'Huveaune à Roquevaire en 2019 et 2021	38
Figure 25 Volume d'eau annuel Mm3 écoulé simulé et de référence de l'Huveaune à Roquevaire....	39
Figure 26 Courbe de débits classés modélisés et de référence pour la station de Roquevaire	39
Figure 27 Débit simulé, naturalisé de référence et observé de l'Huveaune à Aubagne en 2017 et 2021	40
Figure 28 Volume d'eau annuel écoulé simulé et de référence de l'Huveaune à Aubagne (2014/2022)	41
Figure 29 Courbe de débits classés modélisés et de référence pour la station d'Aubagne.....	42
Figure 21 Lames d'eau annuelles (mm) écoulées simulées et de référence ainsi que pluies pour l'Huveaune à Saint-Zacharie en mm/an	43
Figure 21 Lames d'eau annuelles écoulées simulées et de référence ainsi que pluies pour l'Huveaune à Roquevaire.....	44

Figure 21 Lames d'eau annuelles (mm) écoulées simulées et de référence ainsi que pluies pour l'Huveaune à Aubagne 45

Figure 33 Lames d'eau non efficace pour la rivière pour les bassins versants de l'Huveaune (en partie karstique), de l'Arc et de l'Argens (non karstique)..... 46

I. NOTE TECHNIQUE HYDROLOGIE NATURELLE : PRINCIPES

Les débits mesurés ne représentent qu'imparfaitement la ressource car ils sont influencés par les usages. Or, avant de réfléchir au partage de l'eau, ce qui est l'un des objectifs de ce projet, encore faut-il bien connaître ce qu'il y a à partager. La méthode de naturalisation des débits consiste à reconstituer l'hydrométrie qui aurait été observée en l'absence d'influences anthropiques (les pressions). Les pressions prises en compte ne sont pas exhaustives mais le sont dans la mesure du possible et cette incertitude ne réduit pas la pertinence de l'exercice. L'objectif est de décrire le régime des débits au pas de temps journalier. Un pas de temps inférieur est hors de portée des informations disponibles, le pas de temps hebdomadaire ou mensuel est moins incertain mais serait peut-être insuffisant pour décrire les périodes de tension les plus extrêmes.

La naturalisation implique de disposer d'une hydrométrie observée. La première étape consiste alors à définir en quels points effectuer cette naturalisation. Elle est opérée au niveau des stations de mesures ou tout autre point d'un cours d'eau disposant d'une hydrométrie observée à un pas de temps journalier. La connaissance des débits historiques est en effet la première brique descriptive du fonctionnement hydrologique du cours d'eau et constitue une information très précieuse. Chaque point donne à voir le bilan hydrologique de l'ensemble du bassin versant en amont au pas de temps journalier et souvent sur plusieurs années consécutives.

En parallèle, le bilan des influences anthropiques (relatives à certains usages tels que l'AEP, l'industrie, l'irrigation, les ouvrages de gestion, étant les principales influences prises en compte) s'exerçant sur ces bassins est effectué. Les volumes prélevés ou rejetés (exemple d'un rejet de station d'épuration, du canal de Marseille) à l'échelle de chaque bassin sont modélisés et transformés sous forme de chroniques de débits journaliers.

Celles-ci sont ensuite traduites en influences sur le cours d'eau car selon la ressource en eau depuis laquelle s'effectue le prélèvement, l'impact sur la rivière peut être différent. Par exemple, nous observons une atténuation ou un retard de l'effet du prélèvement lorsqu'il est effectué en nappe souterraine ou alors un impact immédiat et total du prélèvement lorsqu'il est effectué directement dans le cours d'eau.

Ces influences (en débit journalier) sont ensuite propagées de l'amont vers l'aval (avec prise en compte des temps de propagation d'un bassin à l'autre, et de l'organisation amont-aval du réseau). Le bilan du cumul de ces influences est réalisé au niveau de chaque station exutoire. Les impacts cumulés liés aux prélèvements sont alors ajoutés aux débits observés (il y aurait eu plus d'eau arrivant en ce point du cours d'eau en l'absence de ces prélèvements) ; les impacts cumulés liés aux rejets sont eux retirés (il y aurait eu moins d'eau arrivant en ce point du cours d'eau en l'absence de ces rejets).

II. METHODE GENERALE

La naturalisation des débits observés suit un ensemble d'étapes décrites dans les parties ci-dessous :

De manière générale, la méthode consiste au séquençage suivant :

1. Définition de la maille territoriale (ensemble des sous-bassins) constitutive du modèle global et récupération des chroniques de débit mesurés par l'Etat.

2. Projection spatialisée des volumes prélevés et rejetés, déclarés à l'Agence de l'eau sur chacun de ces sous-ensembles et fournis par la Société des eaux de Marseille, pour chaque ressource (eau souterraine et superficielles), pour chaque usage et pour chaque année de données disponibles et réputées fiables, soit de 2012 à 2021 pour l'Agence de l'eau et de 2014 à 2023 pour la Société des eaux de Marseille.
3. Transformation des données volumétriques annuelles en chroniques journalières. Rappelons que la connaissance des prélèvements au pas de temps journalier sur l'ensemble de la période d'étude est l'exception. Pour les usages peu soumis aux fluctuations saisonnières (eau potable, industrie), les règles de répartition des volumes en débit journalier sont très simples. L'irrigation, climato-dépendante, est considérée de manière simplifiée car les prélèvements pour cette activité sont principalement d'origine externe (canal de Marseille et canal de Provence).
4. Prise en compte de la gestion des principaux ouvrages de régulation. Les données de rejets du canal de Marseille ont été réparties en débits moyens journaliers selon les sous-bassins du maillage. La période de disponibilité de ces données est principalement de 2014 à 2023.
5. Calcul :
 - a. Etablissement de règles hydrauliques spatiales et temporelles permettant de cumuler des impacts (propagation de l'amont vers l'aval).
 - b. Génération des chroniques journalière des prélèvements et rejets puis agrégation et transformation en impact hydrologique (fonction d'amortissement, délais de propagation).
 - c. Application aux débits mesurés.

Pour les prélèvements réalisés sur des ressources souterraines depuis des nappes connectées aux cours d'eau, l'impact d'un prélèvement sur le cours d'eau s'est basé sur deux principaux critères :

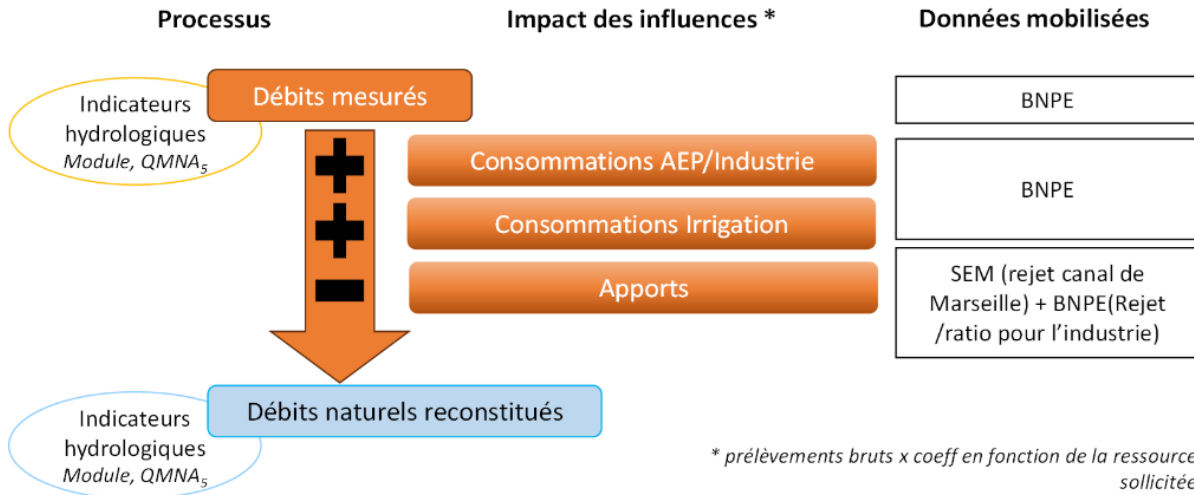
- Milieu homogène - Pour les alluvions, des solutions analytiques permettant d'évaluer l'influence d'un pompage en nappe sur la rivière ;
- Milieu hétérogène - Les études hydrogéologiques structurantes du territoire et les données existantes d'exploitation et de suivi.

Pour les prélèvements hors des nappes connectées, ceux-ci sont considérés comme ayant un impact nul sur les débits des cours d'eau.

Chaque maille d'analyse hydrologique du territoire c'est-à-dire chaque sous-bassin dispose :

- D'un **exutoire**, pourvu de données hydrométriques (débits mesurés) à partir de stations hydrométriques. C'est en ces points que les débits sont naturalisés ;
- D'un ensemble d'**influences** s'exerçant sur ce périmètre élémentaire.

Le schéma synthétique du processus de calcul pour chaque point de maillage est le suivant :



II.1 Maillage

Les stations modélisées permettent d'avoir un point de vue sur l'hydrologie naturelle de chaque sous-bassin correspondant, elles sont présentées sur la carte ci-dessous :

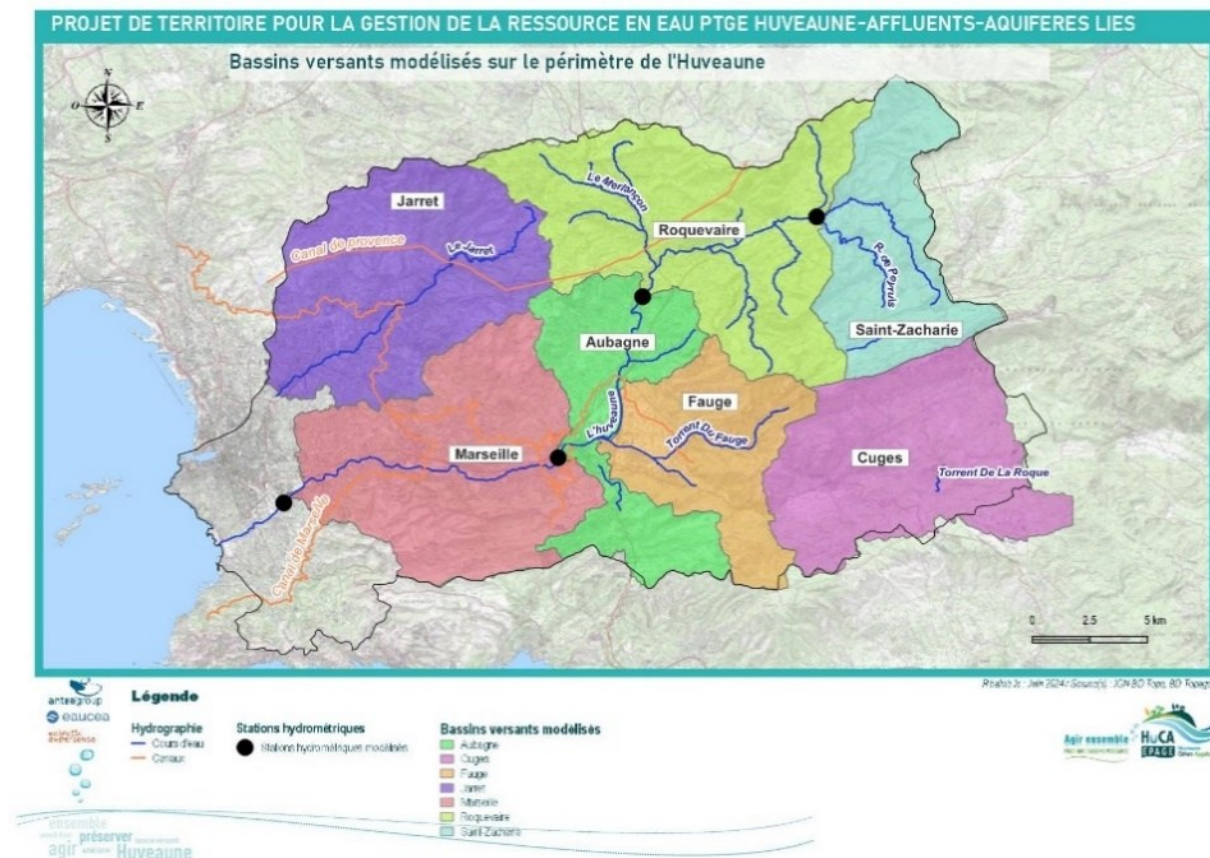


Figure 1 - Sous bassins constituant le maillage de la modélisation

Certains bassins comme celui du Jarret et du Fauge ne disposent pas de station hydrométrique à leur exutoire. Afin de reconstituer l'hydrologie naturelle de ces bassins, une modélisation hydrologique par régionalisation à partir de l'hydrologie des bassins voisins sera réalisée. Cette modélisation sera décrite dans la partie des modélisations pluie-débits réalisées à la suite de la naturalisation des débits mesurés. Des données hydrométriques complémentaires sur le Jarret pourront être utilisées avec prudence selon la qualité des mesures.

II.2 Hydrométrie

Les chroniques de débits mesurés (hydrométrie) sont celles disponibles sur Hydroportail¹. Le tableau ci-après identifie chaque station, le bassin versant situé immédiatement en aval, et le temps de propagation vers la station exutoire de celui-ci :

¹ <https://hydro.eaufrance.fr>

Code bassin	Libellé	Code station	Temps de propagation (jours)	Bassin versant aval
CUGES	CUGES	CUGES	0	
Y441403001	Roquevaire	Y441403001	0	Aubagne
Y441401501	Saint-Zacharie	Y441401501	0	Roquevaire
Jarret	Jarret	Jarret	0	
Y442404001	Aubagne	Y442404001	0	Marseille
Y442501301	Marseille	Y442501301	0	
Fauge_aval	Fauge	Fauge_aval	0	Aubagne

Tableau 1 - Station hydrométriques en aval de chaque sous bassin temps de propagation vers la station exutoire de celui-ci

Remarque : le linéaire de cours d'eau étant réduit, la propagation d'un effet entre l'amont et l'aval du cours d'eau a été considérée inférieure à 1 jour.

Le bassin du Jarret rejoint l'Huveaune en aval de la station hydrométrique de Marseille, ce bassin est donc considéré comme isolé des autres (n'influençant aucun bassin aval dans le modèle).

La qualité de la mesure des données hydrométriques est importante, surtout en étiage. Un échange avec la DREAL en charge du suivi des stations hydrométriques du bassin de l'Huveaune a permis de préciser le cadre de validité des mesures réalisées par les stations hydrométriques.

Les stations hydrométriques sont jaugées au moins une fois par mois en étiage et ces jaugeages sont doublés. Pour la station de l'Huveaune à Saint-Zacharie, la lame d'eau en étiage sévère est très faible et l'incertitude de mesure du niveau augmente en conséquence. Dans ce cas précis l'incertitude de la mesure de débit augmente aussi, malgré le suivi régulier avec de nombreux jaugeages.

Les données mobilisées pour ces stations sont toutes disponibles sur la période de naturalisation des débits, soit de 2014 à 2022. Des fiches de synthèse sont présentées en annexe.

II.3 Influences

Les influences considérées pour la naturalisation des débits sont détaillées dans les paragraphes suivants. Elles comportent deux composantes principales :

- Les impacts des prélèvements ;
- Les impacts des apports correspondants aux différents rejets.

III. INFLUENCES MODELISEES

Toutes les données de prélèvements utilisées proviennent des déclarations faites auprès de l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse (AERMC) et ont été téléchargées sur le site de la banque nationale des prélèvements quantitatifs (BNPE)².

² <https://bnpe.eaufrance.fr/presentation>

Les données des apports proviennent des données fournies par la Société des Eaux de Marseille (SEM) auprès de l'EPAGE HuCA.

III.1 Données de prélèvements

L'origine de l'eau prélevée du bassin versant provient :

- A 86 % des ressources extérieures que sont le canal de Marseille (Durance) et le canal de Provence (Verdon) ;
- A 14 % des ressources locales que sont les eaux souterraines et les prises d'eau dans les cours d'eau dont le total atteint 7 227 052 m³/an.

Pour l'impact des prélèvements, seules les ressources locales sont prises en compte dans la modélisation de la naturalisation des débits du bassin versant de l'Huveaune.

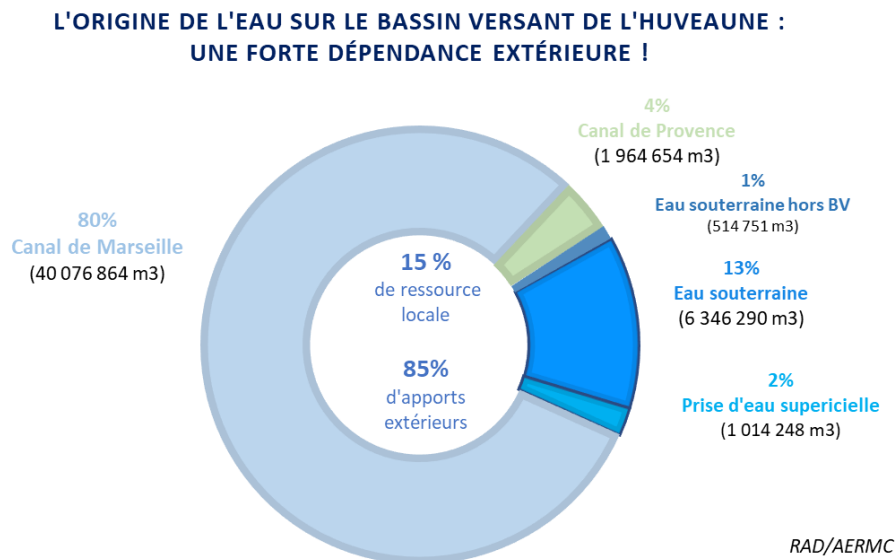


Figure 2 - Répartition de l'origine de l'eau prélevée sur le bassin versant l'Huveaune

Selon les données de l'agence de l'eau de 2021 (dernières données validées lors du démarrage de l'étude), les prélèvements dans les nappes d'eau souterraine des différentes masses d'eau sont principalement effectués selon la répartition suivante :

- AEP pour 66 % des prélèvements soit 4 761 000 m³ ;
- Industriels pour 21% soit 1 539 000 m³ ;
- Irrigation pour 13% soit 919 000 m³ qui concerne seulement deux prises d'eau superficielles (Saint-Pons et Pont de l'Etoile à Roquevaire).

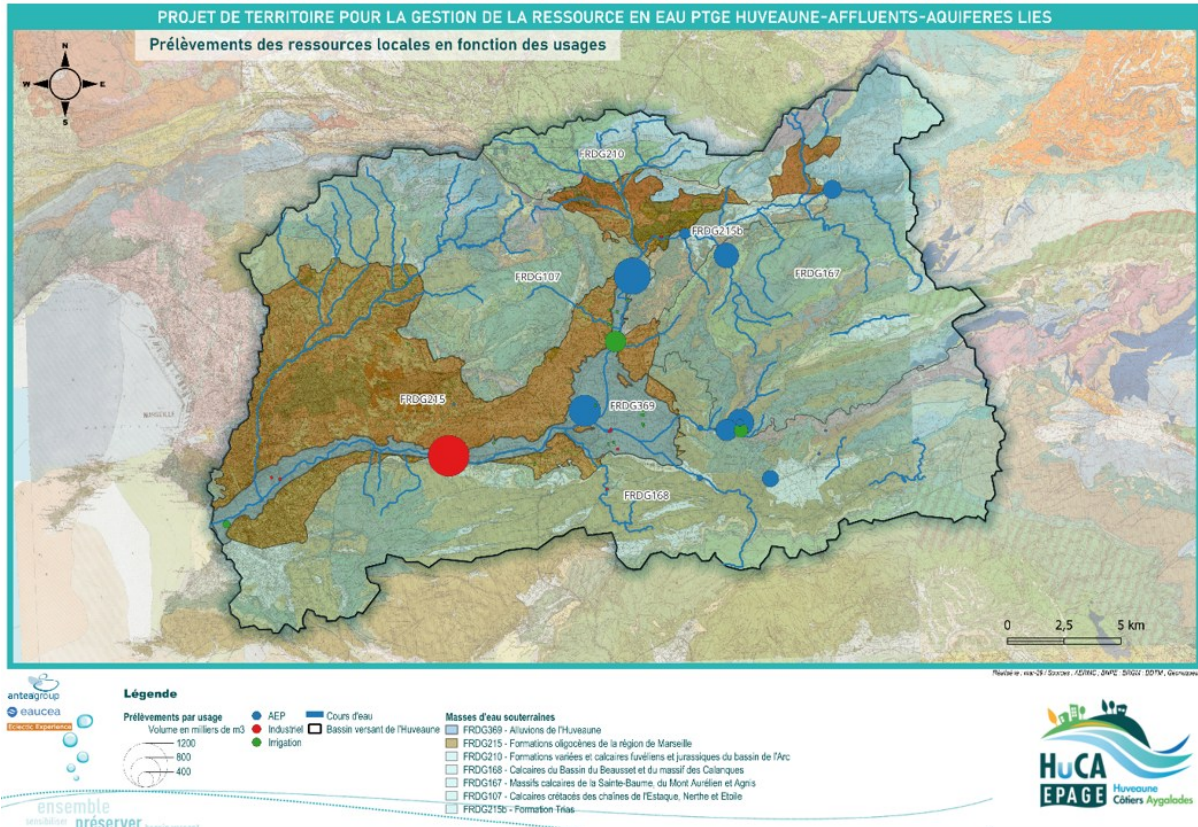


Figure 3- Prélèvements des ressources locales en fonction des usages

III.1.a Prélèvements pour l'AEP

Les points de prélèvements pour l'AEP issus de la BNPE sont regroupés selon les sous-bassins de la modélisation représentant le maillage (cf. § Maillage). Les volumes annuels par sous-bassin sont présentés sur la figure suivante

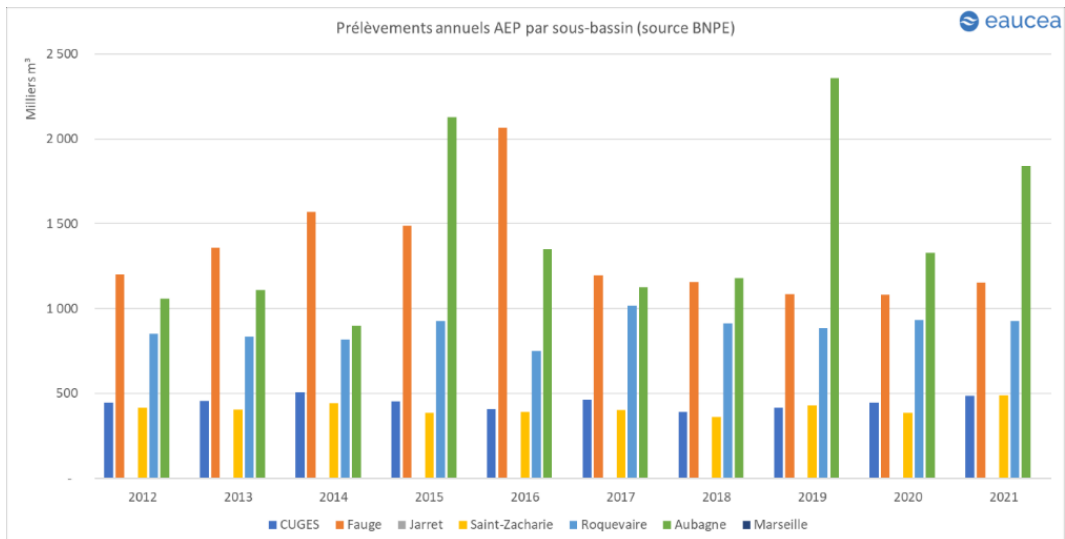


Figure 4 - Volumes annuels par sous-bassins

A partir de ces données, une généralisation de la répartition mensuelle (et journalière) des volumes prélevés est réalisée en appliquant les mêmes coefficients pour tous les prélèvements AEP annuels de la BNPE par la procédure suivante :

- Les volumes annuels de la BNPE sont divisés en 12
- Pour les mois de mai à août, un coefficient multiplicateur de 1,1 est appliqué, ce coefficient n'est pas spécifique au bassin de l'Huveaune et il peut être revu en fonction des informations disponibles.
- Pour les autres mois, le volume restant est réparti de manière homogène après avoir retranché les volumes des mois traités.

Les volumes mensuels sont ensuite divisés selon le nombre de jours de chaque mois pour en déduire les volumes et débits journaliers de prélèvements. Il en résulte des chroniques au pas de temps journalier, une par bassin versant intermédiaire, dont les débits sont constants chaque mois.

III.1.b Prélèvements industriels

La répartition par sous-bassin des volumes annuels prélevés issus de la BNPE sont représentés sur la figure suivante

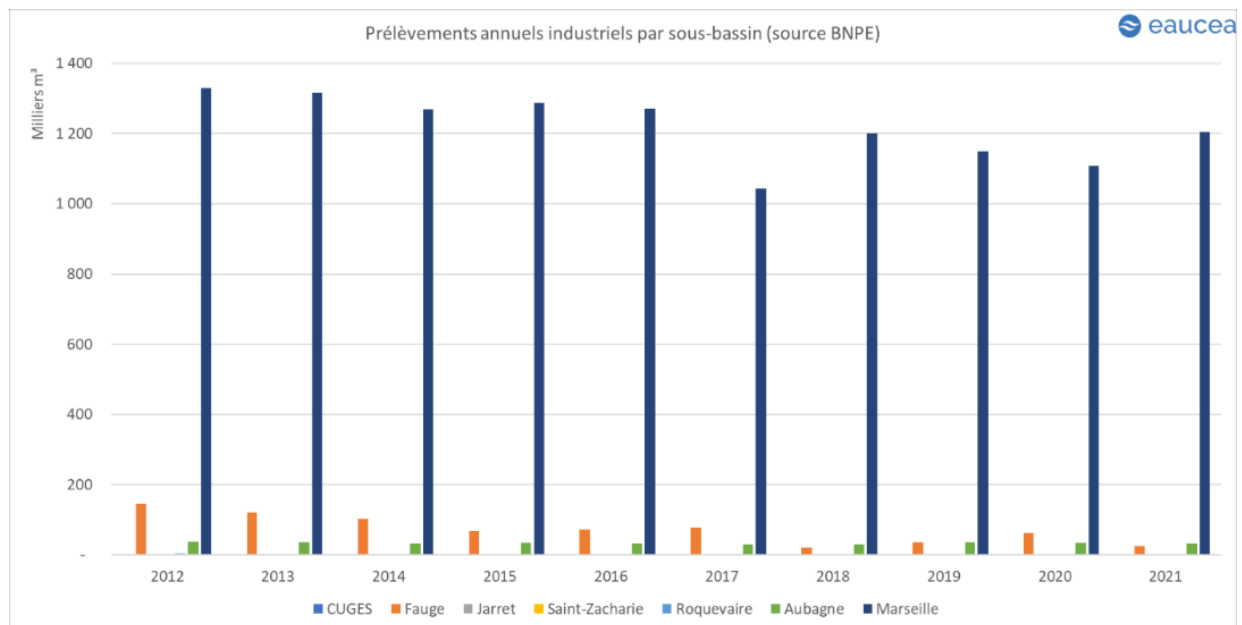


Figure 5 - Répartition par sous-bassin des volumes annuels prélevés issus de la BNPE

L'essentiel de ces prélèvements se situent entre Aubagne et Marseille. La répartition temporelle de ces prélèvements est réalisée en divisant le volume annuel par le nombre de jours de l'année. Aucune saisonnalité n'est appliquée par manque d'information.

III.1.c Prélèvements pour l'irrigation et les canaux

Les prélèvements pour l'irrigation et les canaux réalisés sur la ressource locales sont présentés ensemble car sur le bassin de l'Huveaune les prélèvements pour les canaux sont à usage d'irrigation (barrage du Pont de l'Etoile). La seule différence est le traitement de la répartition temporelle de ces prélèvements : pour l'irrigation les volumes annuels sont répartis en fonction d'un régime de besoin théorique d'irrigation dépendant du climat, du sol et de l'assolement irrigué et pour les canaux, les volumes sont répartis sans saisonnalité sur tous les jours de l'année.

Remarque : les prélèvements pour l'irrigation depuis le canal de Marseille sont limités à la période allant d'avril à septembre.

Les graphes suivants représentent respectivement les prélèvements pour l'irrigation et pour les canaux.

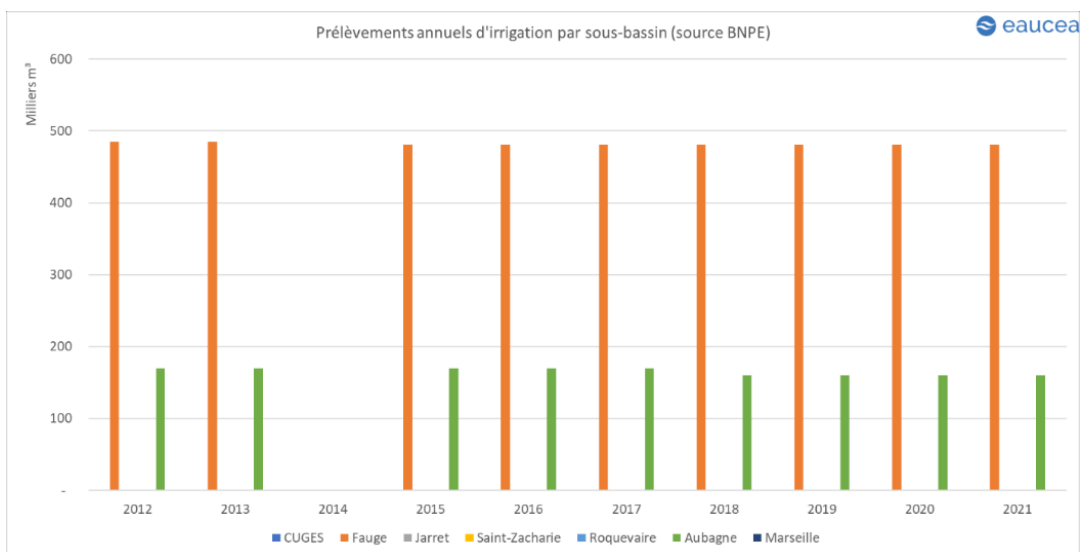


Figure 6 - prélèvements annuels d'irrigation par sous-bassin (source BNPE)

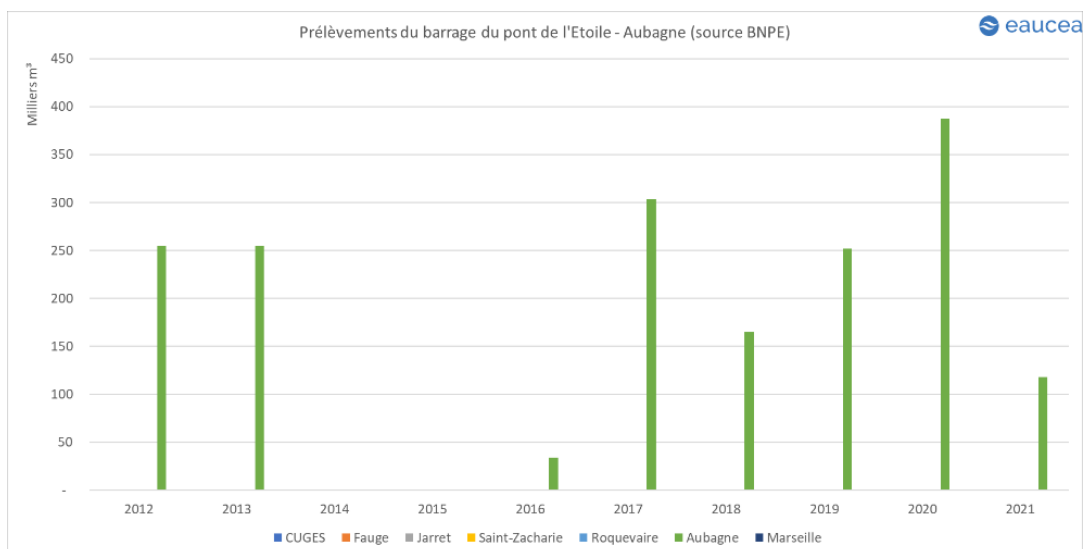


Figure 7- Prélèvements du barrage du pont de l'Etoile à Aubagne (source BNPE)

Habituellement les prélèvements pour l'irrigation sont très dépendants des conditions climatiques et donc changent chaque année. Les prélèvements déclarés sur le bassin du Fauge sont identiques chaque année et ne varient pas beaucoup pour le sous-bassin de l'Huveaune en amont d'Aubagne. *Il s'agit certainement de volumes forfaitaires avec pour ratio 10 000m³/ha pour l'irrigation gravitaire.*

Besoins en eau des plantes et irrigations

Les règles de bonne gestion agronomique de l'irrigation visent à satisfaire les besoins de la plante pour qu'elle exprime au mieux son potentiel de production (rendement ou qualité). Comme l'irrigation est onéreuse, l'optimum agronomique et économique implique un apport d'eau au plus juste.

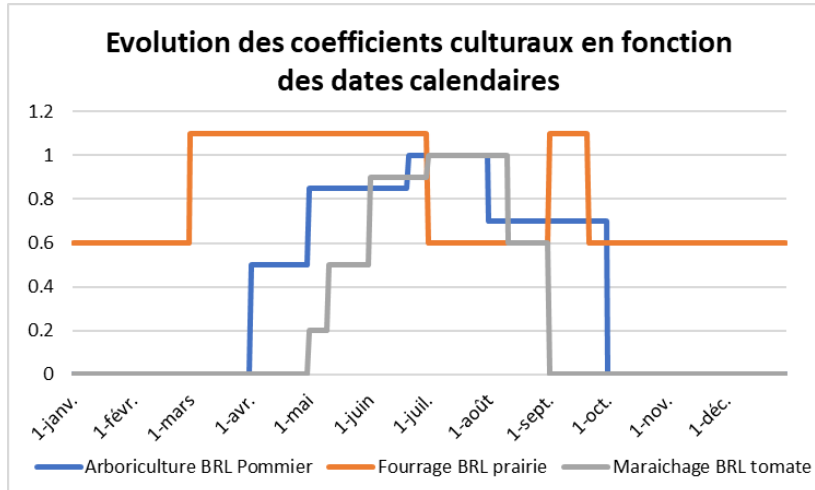
Ce besoin en eau évolue donc dans le temps en fonction du stade de la plante et du climat. Le modèle Irrid développé par Eaucea permet d'estimer ces besoins d'irrigation au pas de temps journaliers et pour différentes cultures.

Il est alimenté par les hypothèses suivantes pour le bassin de l'Huveaune :

- L'assolement irrigué. Sur le territoire il s'agit principalement de cultures arboricoles, maraichères et de fourrage répartis par secteur comme suit :

Assolement	Fauge	Aubagne
ARBORICULTURE	0	6
FOURRAGE	0	5
MARAICHAGE	48	6

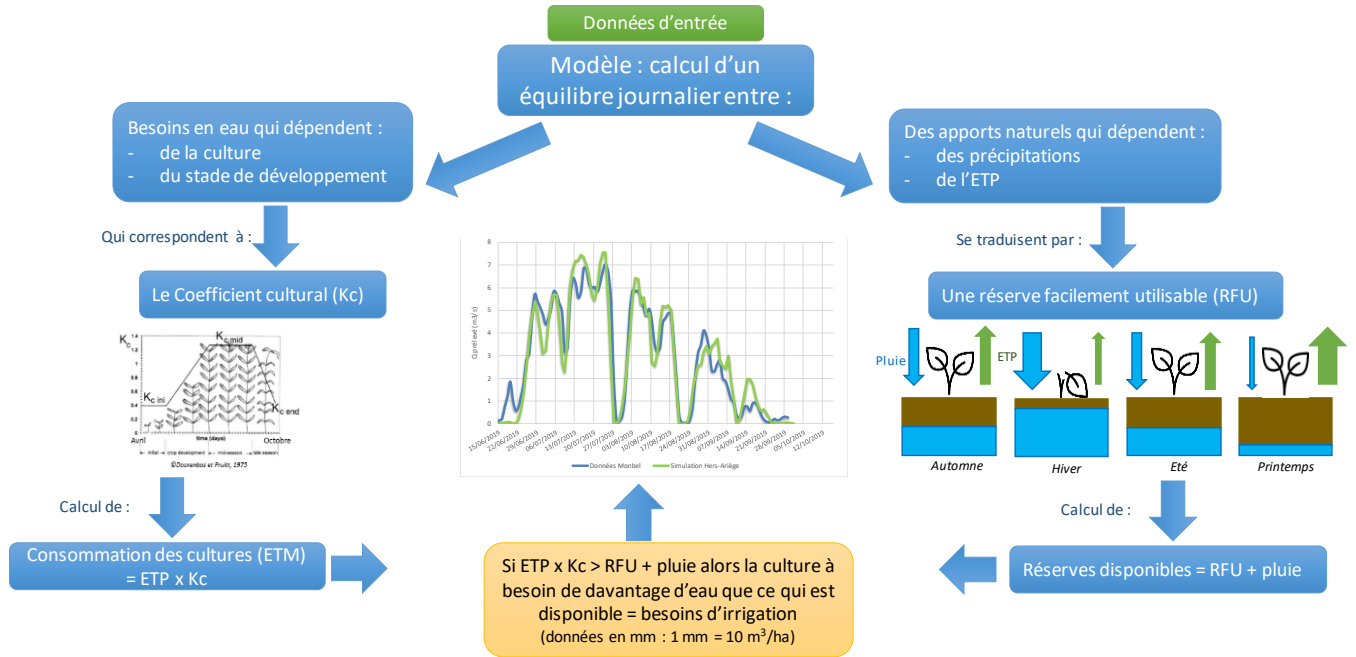
- Les coefficients culturaux (stades phénologiques des plantes). Ils sont déterminés à partir des analyses bibliographiques. Ils sont fixés en fonction du calendrier pour les cultures considérées :



- Réserve utile (RU) des sols. Cette dernière est estimée à partir des données pédologiques disponibles à l'échelle nationale, sur le territoire elle est d'environ 75 mm soit une Réserve Facilement Utilisable (RFU) de 50 mm ($RFU = 2/3 * RU$) ;
- De données météorologiques (précipitations, évapotranspiration, température) issues de la grille SAFRAN de météo France.

Les besoins en eau d'irrigation dépendent d'un équilibre journalier entre la disponibilité naturelle en eau du système et les besoins théoriques des plantes. Si la disponibilité en eau dans la réserve utile est suffisante pour répondre aux besoins de la plante (après une pluie par exemple), il n'est pas simulé d'irrigation. A l'inverse, en cas de déficit en eau du sol, les besoins manquants sont comblés par un apport d'irrigation simulé.

Le résultat de la modélisation est un hydrogramme type des débits calculés au pas de temps journalier sur la période 2000 à 2022. En l'absence de mesure quotidienne directe par l'ensemble des irrigants cette méthode est la seule capable de reconstituer la pression d'irrigation en débit journalier.



Ainsi il est possible à partir de la connaissance des hectares irrigués d'estimer les régimes de prélèvement :

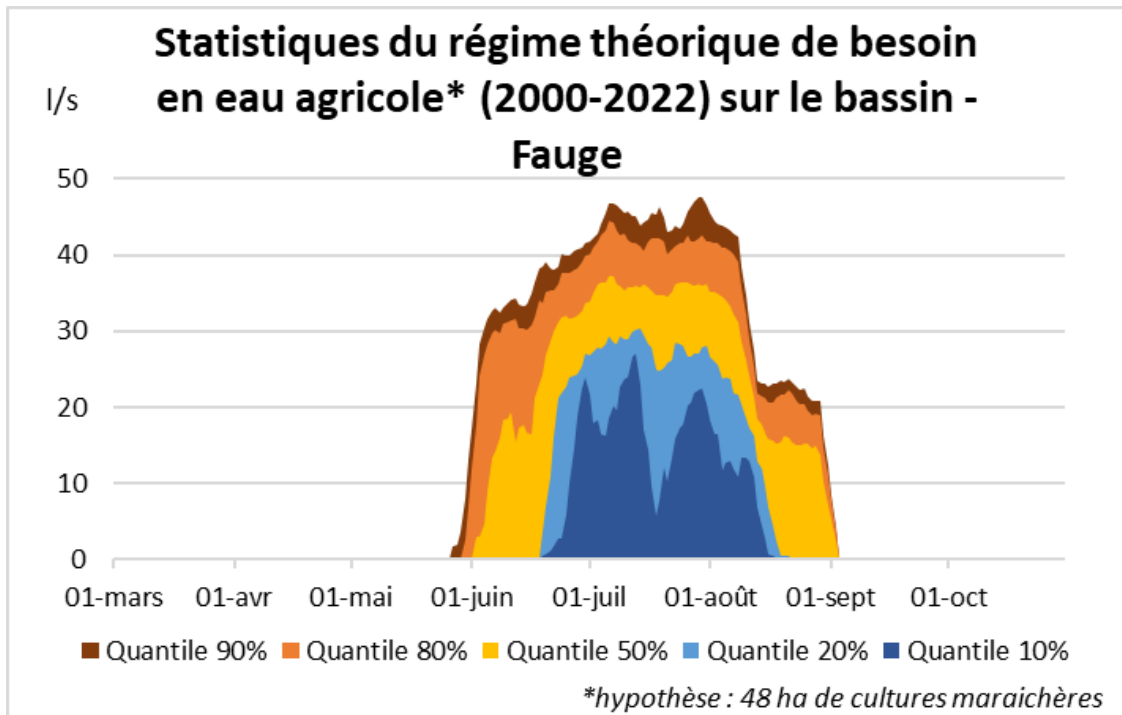


Figure 8 : Statistique du besoin théorique d'irrigation sur le bassin du Fauge

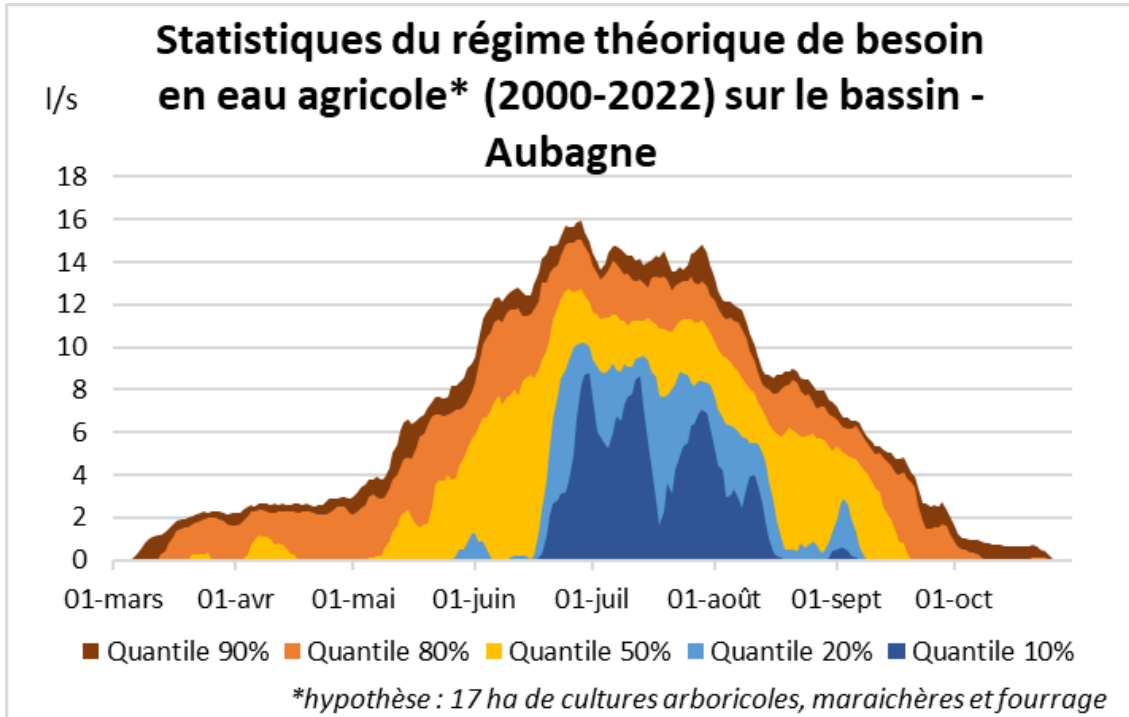
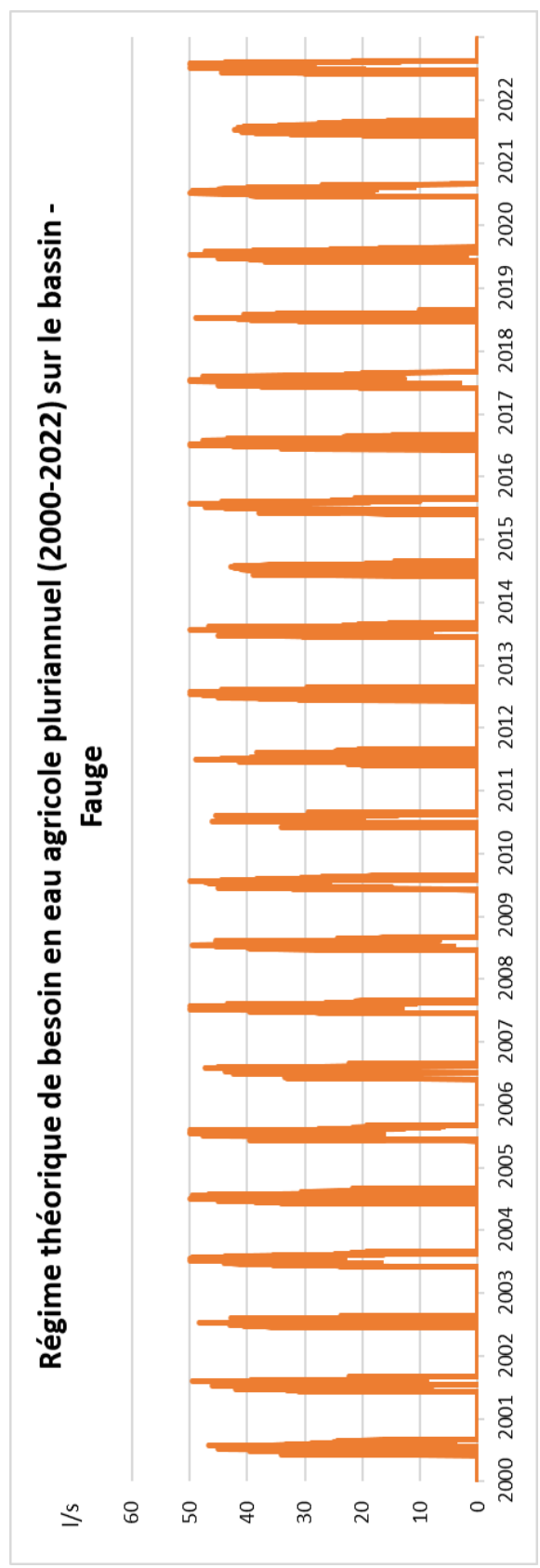
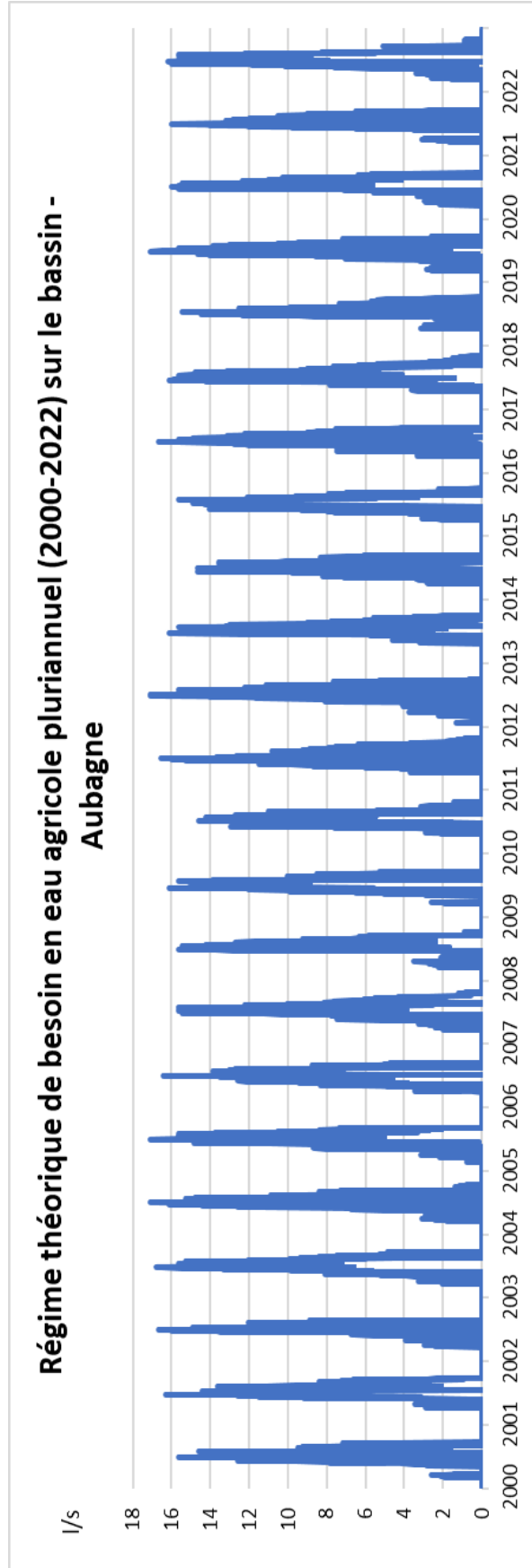


Figure 9 : Statistique du besoin théorique d'irrigation sur le bassin d'Aubagne

Ces 2 ASA prélèvent en pointe réciproquement 45 l/s et 16l/s.





III.2 Ratio des prélèvements d'eau souterraine sur le débit pour évaluer leurs impacts

L'impact d'un prélèvement sur le cours d'eau est un exercice difficile à estimer en dehors d'une modélisation par modèle maillé dans un milieu considéré comme homogène (alluvions) ou d'une étude spécifique sur un prélèvement donné dans un milieu discontinu (calcaires fissurés ou karstiques).

On définira par la suite le « ratio » comme le pourcentage du débit de pompage au forage provenant directement de la rivière.

Les prélèvements en rivière possèdent donc un ratio de 100 %. C'est le cas pour l'ASA de Saint-Pons et de Longuelance à Pont de l'Etoile.

Les prélèvements non connectés avec les eaux superficielles sont considérés avec un ratio de 0% soit un impact nul sur les débits des cours d'eau. Cela concerne les forages de Cuges-les-Pins et le forage de Coulin à Gémenos qui captent la masse d'eau des calcaires des calanques (exutoire vers les sources de Cassis).

Pour les eaux souterraines, l'approche prise en compte pour déterminer ce ratio a été réalisée suivant deux contextes hydrogéologiques différents ;

- Prélèvement en milieu considéré comme « homogène » pour la nappe alluviale de l'Huveaune malgré sa complexité hydrogéologique avec des flux privilégiés suivant différents horizons ;
- Prélèvements dans un milieu hétérogène en connexion hydraulique avec le cours d'eau ou les alluvions.

Le pourcentage de ces ratios concerne un volume annuel de 5 105 000 m³.

La synthèse des directions d'écoulement est présentée ci-dessous :

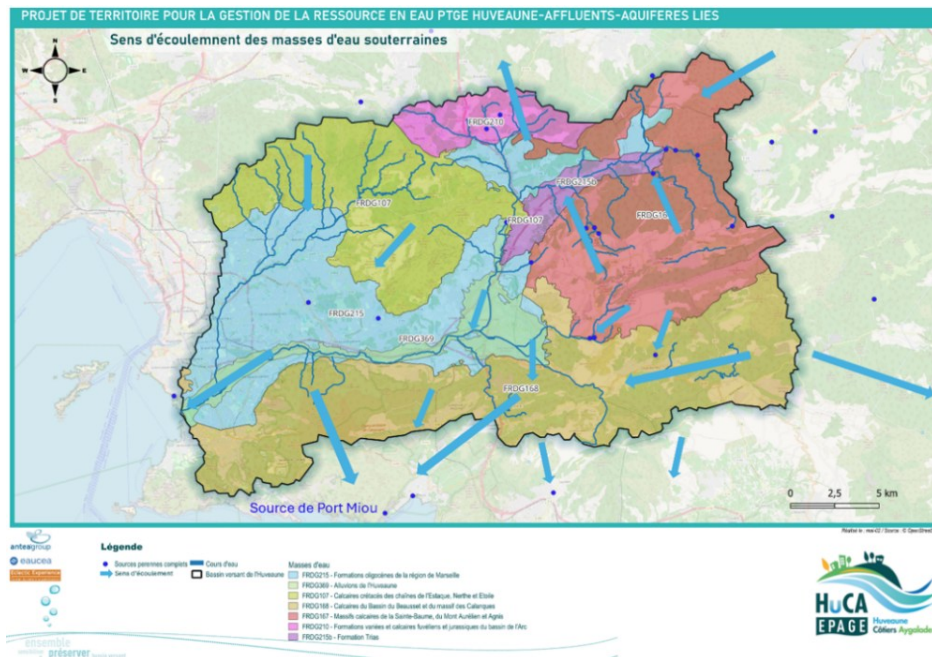


Figure 10- Sens d'écoulement des masses d'eau souterraines

III.2.a Prélèvements en milieu « homogène » – alluvions

Pour les prélèvements en nappe alluviale plusieurs paramètres interviennent selon les secteurs, en particulier :

- Les paramètres hydrodynamiques des alluvions, en lien avec leur nature et le recouvrement (cela diffère si le cours d'eau est établi dans ce recouvrement ou au sein des alluvions sollicitées) ;
- La piézométrie (sens d'écoulement de la nappe et son gradient pour évaluer les apports en provenance des coteaux). La piézométrie de référence sur la nappe alluviale de l'Huveaune est celle de l'étude du BRGM de 2014, seule information publiée à ce jour sur ce territoire ;
- Le positionnement des points de prélèvements par rapport au cours d'eau ;
- L'importance du colmatage du lit du cours d'eau ;
- L'importance du prélèvement.

Des solutions analytiques permettant d'évaluer l'influence d'un pompage en nappe sur la rivière selon deux modalités principales :

- Le premier cas correspond au calcul de la part du débit de pompage provenant directement de la rivière, lorsque celle-ci est située dans le cône de rabattement aval du forage. Elle ne s'applique que pour des pompes fonctionnant depuis un temps suffisamment long (régime permanent).
- Le second cas proposé correspond au calcul d'un préjudice instantané à la rivière engendré par la présence du pompage en nappe, qui intègre à la fois les débits soutirés directement à la rivière, et les débits de nappe qui auraient alimenté la rivière en l'absence de pompage en nappe. Ce calcul est basé sur le temps écoulé depuis le début du pompage, et est donc adapté pour des pompes non permanents.

Les solutions utilisées ont été proposées par le BRGM dans un rapport datant de 1976 intitulé « Evaluation des débits soustraits à une rivière par un pompage dans un puits riverain » (Rapport BRGM 76-SGN-032-AME).

Dans les deux cas présentés, certaines hypothèses de base sont faites sur la configuration d'écoulement de la nappe. Ces hypothèses sont les suivantes :

- Hypothèse de Dupuit : la nappe est considérée comme ayant une épaisseur mouillée fixe (constante et homogène), ne variant pas du fait de l'influence des pompes. Dans les cas réels, cette hypothèse est vérifiée si les rabattements induits par les pompes sont très faibles devant l'épaisseur mouillée de la nappe, dans le cas d'une nappe libre.
- L'aquifère qui contient la nappe dans laquelle s'effectuent les pompes est un milieu homogène d'extension infinie. En pratique, toute limite d'écoulement de la nappe se situe

à une distance suffisamment grande de la rivière, par rapport à la distance entre la rivière et le pompage.

Le débit est calculé en régime permanent, c'est-à-dire qu'il est valable seulement pour des temps de pompages longs, après stabilisation du régime hydrodynamique.

Sur le territoire, les principaux prélèvements concernés sont les forages d'Aubagne, le champ captant de Roquevaire et l'usine chimique Arkema.

Les paramètres du calcul et les résultats obtenus pour les forages de Roquevaire sont détaillés ci-dessous :

Transmissivité (m²/s)

0,05

Distance entre la rivière et le pompage (m)

10

Débit de pompage (m³/h)

350

Gradient de la nappe

0,003

Epaisseur de l'aquifère (m)

7

En l'absence de données, aucun colmatage du lit de la rivière a été pris en compte (hypothèse sécuritaire).

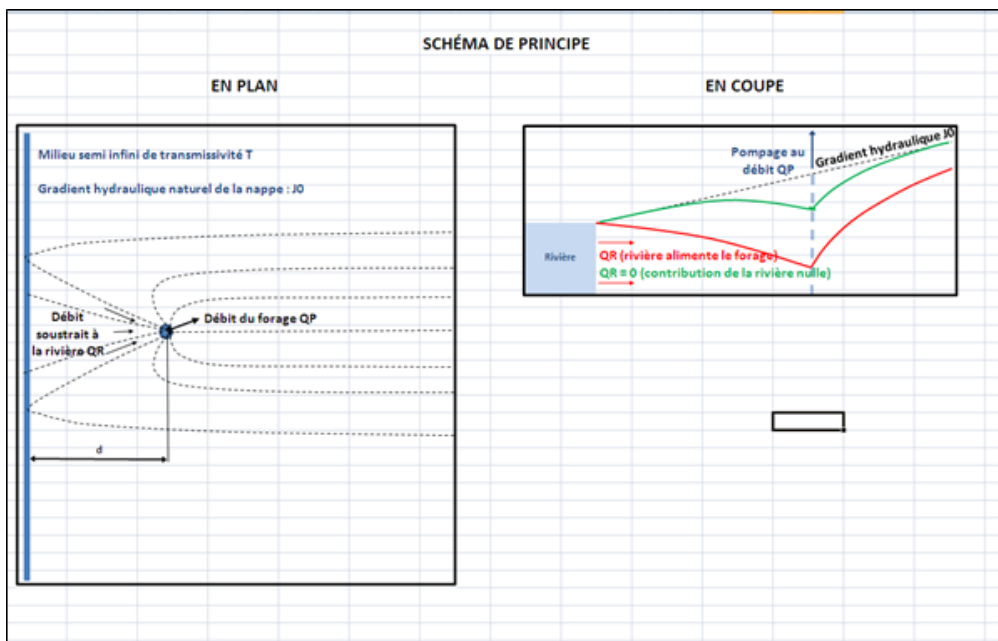


Figure 11 - Schéma de principe du débit soustrait à la rivière en fonction du débit prélevé sur le forage

La méthode de calcul permet d'obtenir un ratio de 72 % du débit de la rivière sur le débit pompé :



Ces ratios ont ensuite été réalisés pour l'ensemble des prélèvements en nappe alluviale. Un coefficient de sécurité de 10 % a été ensuite appliqué. **Au final le ratio retenu sur les captages de Roquevaire est de 80 %.**

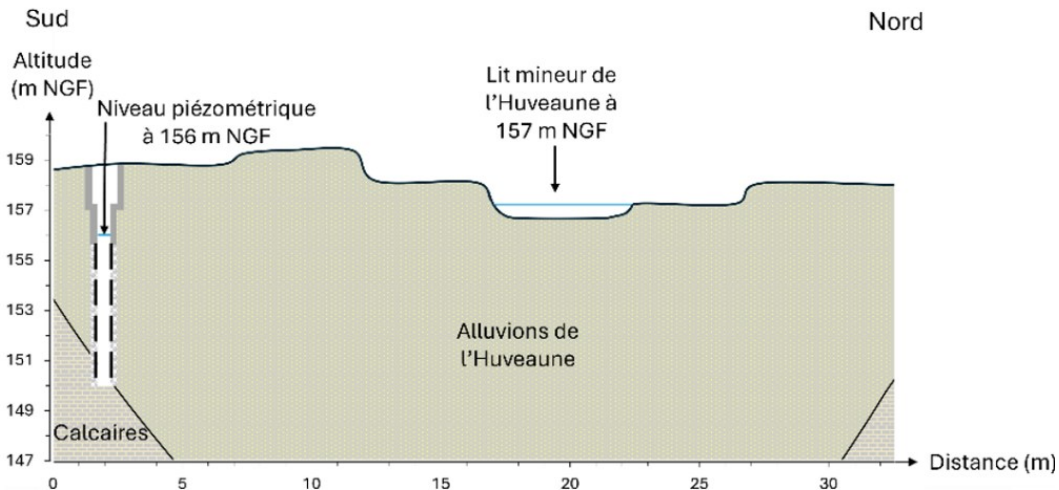


Figure 12- Schéma conceptuel du champ captant de Roquevaire lors de pompages d'essais en avril 2023

Nota sur les prélèvements d'Aubagne :

Les forages AEP d'Aubagne sont utilisés en secours du canal de Marseille lors des périodes de chômage. Leur exploitation est donc maximale sur une courte durée. Dans ce cas le pompage est continu (7 j / 7 j) pendant environ 1 mois. La période est généralement en automne, mais d'autres travaux d'entretien peuvent avoir lieu à l'hiver ou au printemps.

La question de leur temporalité dans la modélisation se pose donc en lien avec les données du chômage (historique non disponible par l'exploitant).

III.2.b Prélèvements en milieu hétérogène - calcaires

Sur le bassin versant, cela concerne les aquifères fissurés/karstiques des massifs calcaires entourant la vallée de l'Huveaune. Les prélèvements sont principalement situés au niveau de l'aquifère de la Sainte-Baume.

Dans ce cas, la valeur du ratio se base sur les principales études hydrogéologiques de la Sainte-Baume réalisée par l'université Aix-Marseille^[1] ainsi que sur les données existantes sur chaque prélèvement important. A titre d'exemple :

- Forage du Veze à Gémenos. Un lien avec les pompages d'essais et le suivi en continu de la source de Saint-Pons. Il n'y a pas de relation observée sur la chronique hydrologique et les études montrent un compartimentage de l'aquifère captée par rapport à la source de Saint-Pons. Toutefois il n'y a pas d'étude sur l'impact potentiel sur le Fauge en amont – Ratio de 20%

- Forage de la Brise à Saint-Zacharie. L'influence du pompage sur l'Huveaune a été recherchée sur la station DREAL sur la période d'octobre 2023 où le forage était en fonctionnement 15 jours en quasi continu (donnée SPL). Aucune évolution n'a été observée. Toutefois la proximité avec la source de la Brise et la faible profondeur de 40 m tend à estimer un ratio de 50 %.

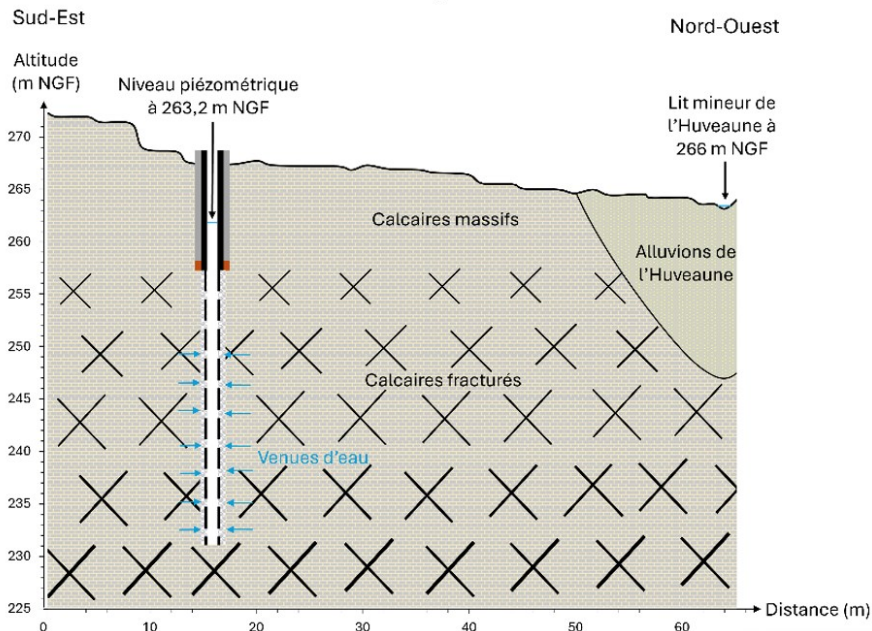


Figure 13- Prélèvements dans un aquifère hétérogène (exemple du forage de la Brise à St Zacharie)

^[1] Thèses de C. Coulier de 1985, Ph martin de 1991 et T. Garin 2022

Nom de l'ouvrage	Ratio	Volume capté	Commune	Code usage BNPE
FORAGE D'AUBAGNE LA VASSALE	80%	849896	AUBAGNE	AEP
PUITS DANS NAPPE DE L'HUVEAUNE - USINE CHIMIQUE ORGANIQUE	80%	745630	MARSEILLE	IND
FORAGE DU VEZE	20%	720439	GEMENOS	AEP
FORAGE AU QUARTIER LA BRISE DE SAINT-ZACHARIE	50%	488964	SAINT-ZACHARIE	AEP
SOURCE DE ST PONS ET RUISSEAU LE FAUGE	100%	481000	GEMENOS	IRRIGATION
FORAGE EN NAPPE DE PUYRICARD	0%	431145	CUGES-LES-PINS	AEP
PUITS COMMUNAL EN NAPPE	80%	385500	ROQUEVAIRE	AEP
FORAGE EN NAPPE LA VEDE LE PUJOL	50%	368117	AURIOL	AEP

Nom de l'ouvrage	Ratio	Volume capté	Commune	Code usage BNPE
PUITS DANS NAPPE DE L'HUVEAUNE - USINE CHIMIQUE ORGANIQUE	80%	366116	MARSEILLE	IND
PUITS COMMUNAL EN NAPPE	80%	309310	ROQUEVAIRE	AEP
FORAGE EN NAPPE LA VEDE LE PUJOL	50%	295322	AURIOL	AEP
PUITS COMMUNAL EN NAPPE	80%	293740	ROQUEVAIRE	AEP
SOURCE LES CLOS SAINT-PIERRE	100%	261788	AURIOL	AEP
PUITS DU VEZE	100%	170118	GEMENOS	AEP
PRISE D'EAU SUR L'HUVEAUNE - BARRAGE DU PONT DE L'ETOILE	100%	160000	ROQUEVAIRE	IRRIGATION
FORAGE PIGNOL ZONE N.A.E.	0%	131418	GEMENOS	AEP
FORAGES DE LA BLANCHERIE	20%	66998	GEMENOS	AEP
PUITS DANS NAPPE DE L'HUVEAUNE - BLANCHISSERIE INDUSTRIELLE	80%	58597	MARSEILLE	IND
FORAGES DE LA BLANCHERIE	20%	46967	GEMENOS	AEP
PUITS NAPPE - THERMES DE CAMOINS-LES-BAINS	10%	33967	MARSEILLE	IND
FORAGE EN NAPPE CARRIERE & CENTRALE A BETON	0%	32744	AUBAGNE	IND
FORAGE EN NAPPE DES "JARDINS DE LA VILLE"	0%	27737	CUGES-LES-PINS	AEP
FORAGE EN NAPPE-VALLON DE DAUSSERAND	0%	27392	CUGES-LES-PINS	AEP
FORAGES DE LA BLANCHERIE	20%	17551	GEMENOS	AEP
FORAGE 2 LES PALUDS CENTRE COMMERCIAL DE BARNEOUD	80%	12250	AUBAGNE	IND
FORAGE 1 LES PALUDS CENTRE COMMERCIAL DE BARNEOUD	80%	7714	AUBAGNE	IND
FORAGE EN NAPPE - FABRIQUE DE CHIPS DE POMMES DE TERRE	80%	5108	AUBAGNE	IND
FORAGE EN NAPPE - FABRIQUE DE CHIPS DE POMMES DE TERRE	80%	68	AUBAGNE	IND

Tableau 2 - Tableau de synthèse des ratios proposés par ordre de volume capté en m3 sur l'année 2021

III.3 Apports et leurs impacts

La SEM a fourni à l'EPAGE HuCA des séries temporelles de débits mesurés aux différents points de rejets du canal de Marseille. La carte ci-dessous représente les points de prélèvements et de rejets avec le maillage du modèle. Les points de rejets sont représentés par des carrés noirs.

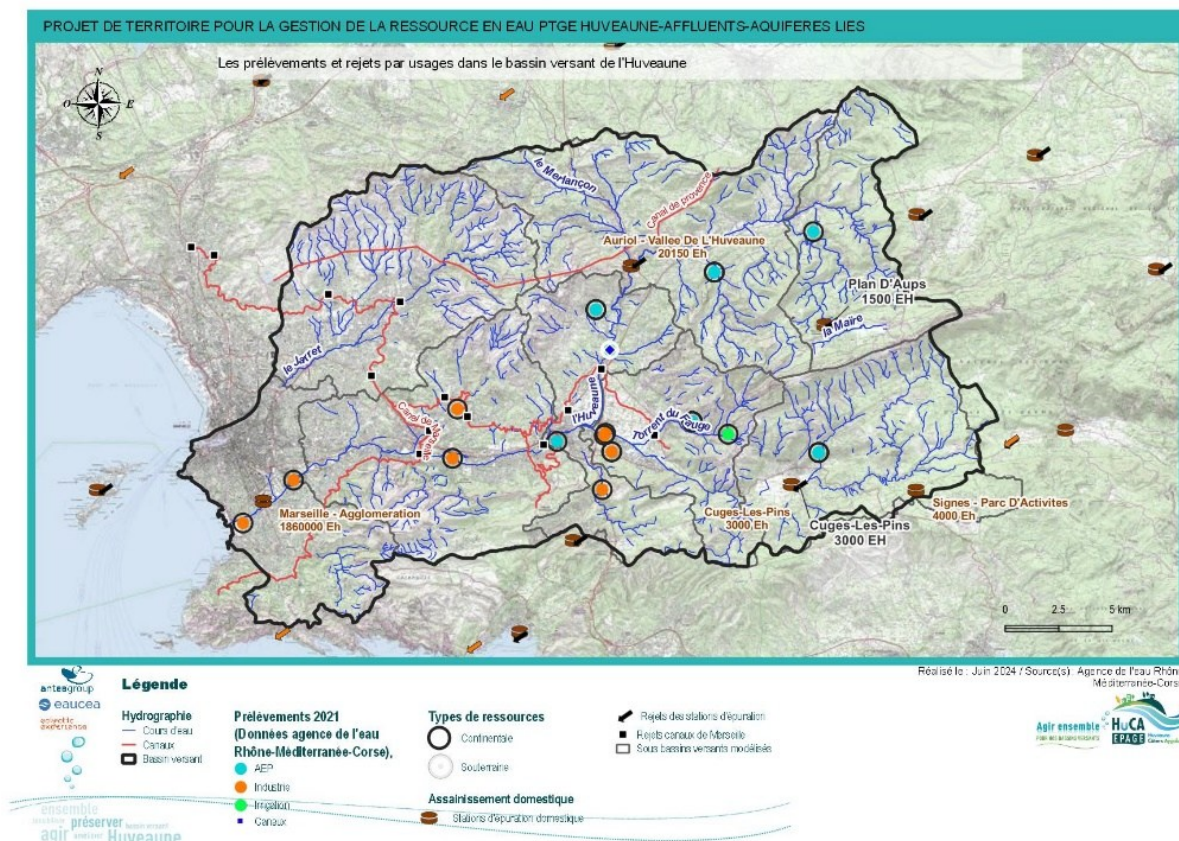


Figure 14- Les prélèvements et rejets par usages dans le bassin versant de l'Huveaune

Les données fournies au pas de temps 5 min ont été converties en chroniques de débits moyens journaliers pour chaque point de rejet. La période de données disponibles va de 2014 à 2023 inclus. Le tableau suivant indique le détail des informations associées à chaque rejet du canal et sa codification reprise dans les légendes des graphes (colonne identifiant). Malheureusement la période de disponibilité des données est très variable d'un point à l'autre, l'interprétation des résultats tiendra compte de ces particularités pour la mise en place du modèle hydrologique.

	X_RGF93	Y_RGF93	IDENTIFIANT	Période d'archivage	Gamme de mesure	Unité
Bastides	891081.15	6255935.25	BAST	2011-12-28 -> 2024-02-16	0-10000	L/s
Vallon des tuves	892157.67	6255554.32	Tuves	2017->2024		m3/s
Les Mourets	897505.07	6253721.77	MORC	2016-02-22 -> 2024-02-16	0-1000	L/s
Bon rencontre	900865.25	6253381.95	BONC2	2023-10-26 -> 2024-02-16	0-4000	L/s
Bon rencontre	900865.25	6253381.95	BONC1	2010-10-11 -> 2023-10-18	0-4000	L/s
Olives	899525.05	6249923.19	OLIC	2011-04-20 -> 2024-02-16	0-1000	L/s
Barasse	901783.67	6246264.49	BAAC	2011-04-20 -> 2024-02-16	0-900	L/s
Clue	902961.196	6248919.27	CLUC	2016-02-22 -> 2024-02-16	0-1000	L/s
Chapelle	904024.17	6248017.28	CHPC	2016-02-22 -> 2024-02-16	0-1000	L/s
Demande	907579.71	6246700.79	DEMC	2010-09-14 -> 2024-02-16	0-1200	L/s
Becques figues	908731.193	6248309.444	GRPV	2010-12-23 -> 2024-02-16	0-500	L/s
Gauthière	910294.549	6250236.718	GAUC	2015-09-01 -> 2024-02-16	0-600	L/s
Fauge (Déversoir)	912769.3	6247133.4	FAUC1	2010-12-10 -> 2024-02-16	0-300	L/s
Fauge (Vanne)	912769.3	6247133.4	FAUC3	2016-07-25 -> 2024-02-16	0-300	L/s

Tableau 3 - détail des informations associées à chaque rejet et sa codification reprise dans les légendes des graphes (colonne identifiant)

L'autre donnée de rejets disponible est celle de la station d'épuration d'Auriol. Ces rejets impactent directement les débits de l'Huveaune sur le secteur aval, visible à partir de la station hydrométrique de Roquevaire.

Une particularité du bassin de l'Huveaune dans la gestion des réseaux d'assainissement fait que tous les réseaux traités par la station d'épuration de Marseille rejettent leurs eaux à la mer, donc hors du bassin versant.

IV. L'IMPACT DES USAGES SUR LES DEBITS MESURES : RESULTATS HYDROLOGIQUES

Les graphes ci-après représentent la chronique de débit mesuré, les impacts des usages modélisés et les débits naturels reconstitués pour les quatre stations de l'Huveaune en allant de l'amont vers l'aval, l'année 2021 illustre bien l'impact des usages lors de cet étiage sévère et hors de cette période.

L'organisation générale des graphes est la suivante :

- Les courbes des débits moyens journaliers sont en bleu pour la donnée hydrométrique, entrée du modèle, et en orange pour les débits naturels reconstitués, résultat de la simulation.
- Les histogrammes positifs représentent les apports, toutes les légendes précisent quels sont ces apports, il y a celui de la station d'épuration d'Auriol et les rejets indiqués par codes des sites pour le canal de Marseille.
- Les histogrammes négatifs représentent les impacts des prélèvements cumulés en amont de la station (et propagés) calculés selon la méthode présentée dans le chapitre précédent.

La période représentée sur les graphes est l'étiage de juin à octobre, où l'influence des usages est maximale.

IV.1 L'Huveaune à Saint-Zacharie

La seule influence des débits sur l'Huveaune en amont de Saint -Zacharie est un prélèvement AEP.

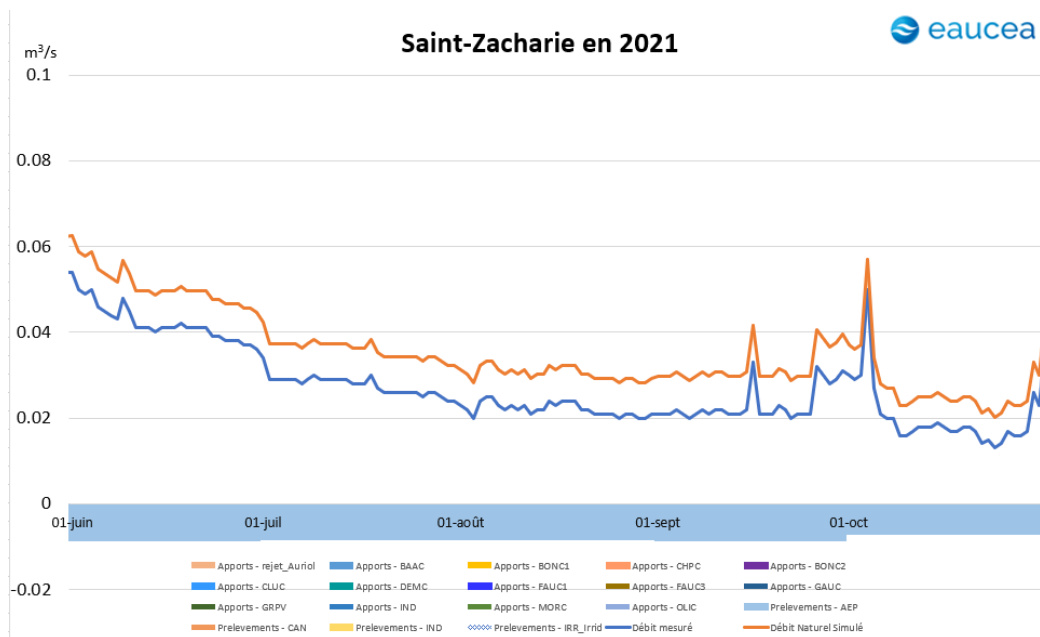


Figure 15- Chronique de débit mesuré, les impacts des usages modélisés et les débits naturels reconstitués pour la station de St Zacharie en 2021 sur la période d'étiage

IV.2 L'Huveaune à Roquevaire

L'influence des rejets de la station d'épuration d'Auriol est visible, et se cumule avec les influences amont.

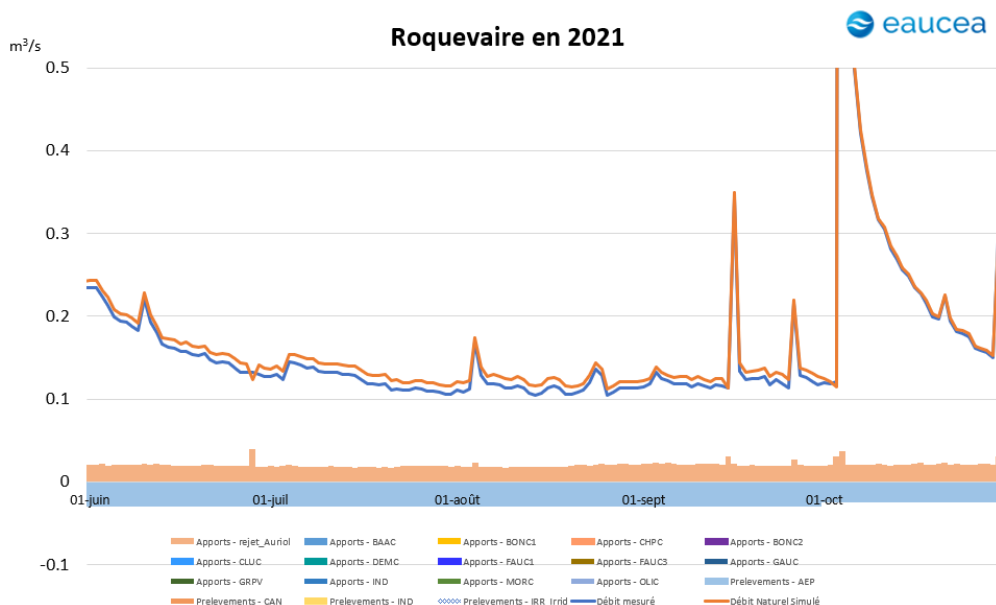


Figure 16- Chronique de débits mesurés, les impacts des usages modélisés et les débits naturels reconstitués pour la station de Roquevaire en 2021 sur la période d'été

IV.3 L'Huveaune à Aubagne

L'influence des rejets depuis le canal de Marseille est très hétérogène. Chaque rejet est codifié et préfixé par le mot "apport" dans la légende

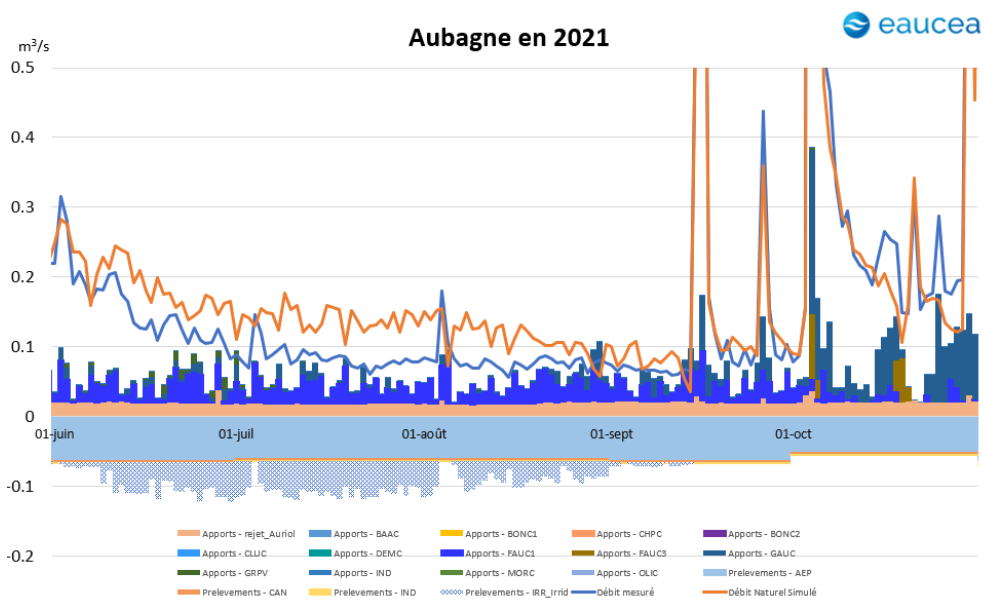


Figure 17- Chronique de débit mesuré, les impacts des usages modélisés et les débits naturels reconstitués pour la station de Aubagne en 2021 sur la période d'été

IV.4 L'Huveaune à Marseille

La station hydrométrique de la DREAL sur l'Huveaune à Marseille est récente et la première année complète de mesure disponible est 2022.

La figure suivante présente le cumul des influences en 2021, une modélisation pluie-débit sera réalisée pour estimer les débits moyens journaliers de l'Huveaune à Marseille à partir de celle des bassins voisins, comme pour les bassins du Jarret et du Fauge.

La figure suivante représente l'ensemble des influences en étiage sur le point de l'Huveaune à Marseille. L'ensemble des prélèvements impacte le débit de l'Huveaune pour environ 180 l/s en étiage et les apports depuis le canal de Marseille sont très hétérogènes, allant de moins de 100 l/s jusqu'à 500 l/s en étiage.

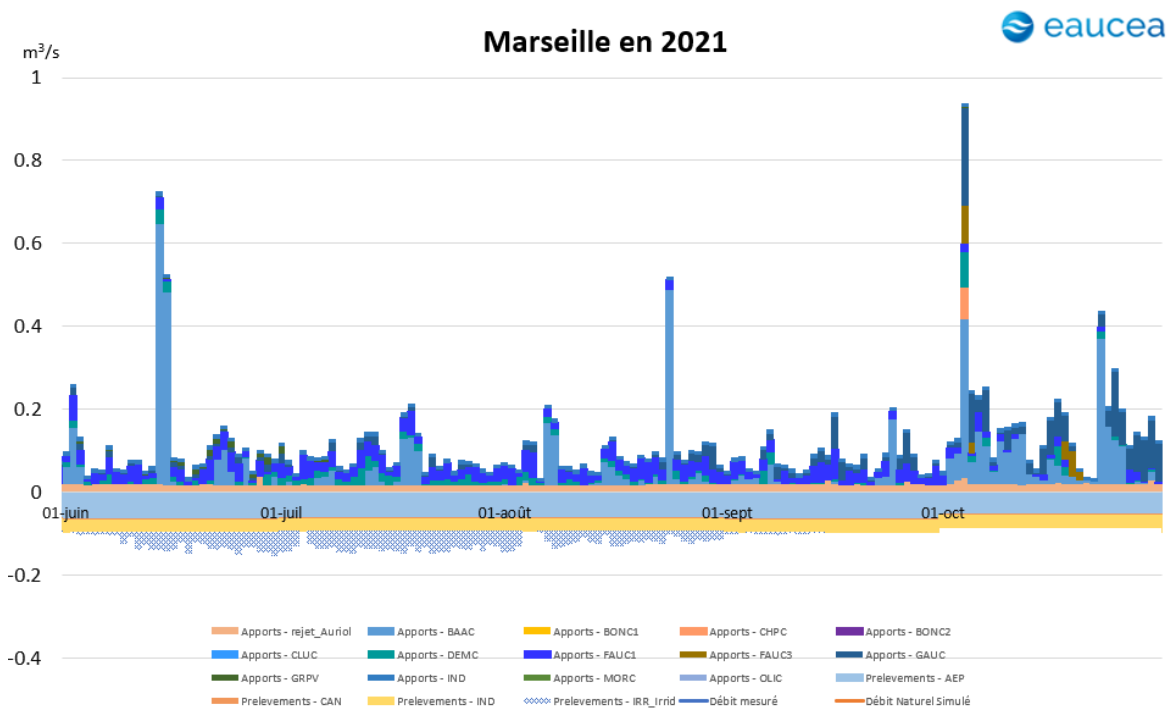


Figure 18- Chronique des impacts des usages modélisés et les débits naturels reconstitués pour la station de Marseille en 2021 sur l'année

V. MODELISATION HYDROCLIMATIQUE DES DEBITS NATURELS

V.1 Calage des modèles hydrologiques et performance associée

La chronique de débits de référence a été calculée sur la période 2012-2022. Cette période est trop courte pour réaliser une décomposition en période de test et de validation pour l'évaluation de la performance des modèles.

Le critère de performance choisi se nomme Nash-Sutcliffe (NS - Nash and Sutcliffe, 1970) pour la calibration des modèles. On l'utilise ici avec la racine carrée des débits (NSRC) qui permet de minimiser les biais lors de l'estimation des débits d'étiage, ce qui est une caractéristique importante de l'hydrologie de l'Huveaune. Le critère NS s'exprime par l'expression suivante :

$$NS = 1 - \frac{\sum(Q_{ref} - Q_{sim})^2}{\sum(Q_{ref} - \mu_{ref})^2}$$

Avec :

- Q_{ref} , la chronique de référence.
- Q_{sim} la chronique de débit simulé par le modèle.
- μ_{ref} la moyenne de Q_{ref}

Plus la valeur de NS est proche de 1, plus le modèle est performant.

Le tableau suivant présente les paramètres X1 à X4 du modèle GR4J calculés de manière à maximiser le critère NSRC (les valeurs du critère de Nash-Sutcliffe pour les racines carrées des débits, qui sont présentées et notées NSRC) :

Bassin	Aire du BV modélisé	X1	X2	X3	X4	NS	NSRC
St-Zacharie	56	891	-0,14	73	1,02	0,75	0,83
Roquevaire	93	471	1,44	51	1,02	0,83	0,86
Aubagne (réduit)	273	903	0,08	50	1	0,82	0,87

L'analyse des résultats permet une compréhension de la modélisation et de ses limites en lien avec le régime hydrologique spécifique de l'Huveaune.

Note à propos des hypothèses de modélisation

Le bassin versant de Roquevaire a vu son aire diminuée artificiellement pour mieux simuler le comportement de référence.

La station de Marseille n'a pas de GR dont les paramètres sont optimisés automatiquement, car il y a trop peu de données.

V.2 Résultats de calage des modèles

Les graphes ci-après représentent la chronique de débit mesuré, les impacts des usages modélisés et les débits naturels reconstitués pour les quatre stations de l'Huveaune en allant de l'amont vers l'aval, l'année 2021 illustre bien l'impact des usages lors de cet étiage sévère et hors de cette période.

L'organisation générale des graphes annuels de débits est la suivante :

- Les courbes des **débits moyens journaliers** sont en **bleu** pour la donnée hydrométrique (sans les impacts humains référencés ci-dessus), entrée du modèle, et en **rouge les**

débits naturels reconstitués, résultat de la simulation. On présente aussi les débits mesurés (avec impacts, en noir pointillés).

- Les **histogrammes cyan inversés** représentent les pluies en entrée des modèles.
- Les ordres de grandeurs des débits peuvent varier d'une station à l'autre (attention aux échelles de mesure)

L'organisation générale des histogrammes interannuels de volumes est la suivante :

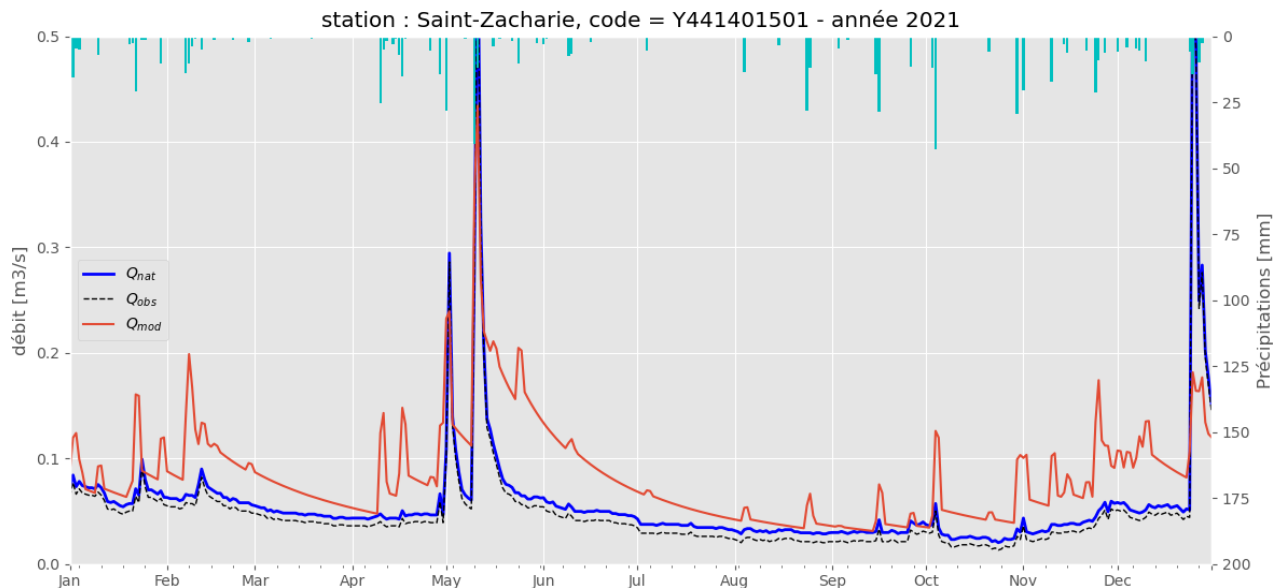
- Les volumes écoulés de référence sont en bleu, entrée du modèle, et en rouge les volumes annuels naturels reconstitués, résultat de la simulation. On présente aussi les volumes annuels tombés (hyétométrie) en violet selon le besoin.

L'organisation générale des graphes de débits classés est la suivante :

- La courbe des débits est en bleu pour la donnée hydrométrique (sans les impacts humains référencés ci-dessus), entrée du modèle, et en rouge les débits naturels reconstitués, résultat de la simulation. On présente aussi les débits mesurés (avec impacts, en noir pointillés).

V.2.a L'Huveaune à Saint-Zacharie

Le graphe ci-après représente les débits simulés, naturalisés de référence (calculé avec le modèle d'impact) et observés de Saint-Zacharie. L'année 2021 reste celle choisie comme illustration, complémentée avec l'année 2022.



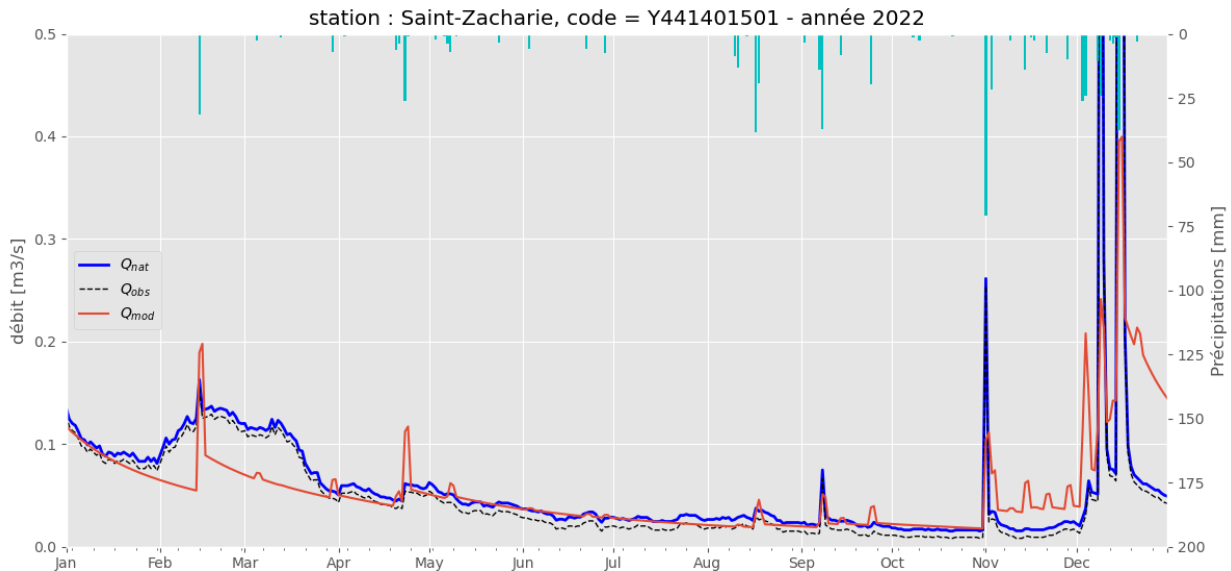


Figure 19 Débit simulé, naturalisé de référence et observé de l'Huveaune à Saint-Zacharie en 2021 et 2022

Ces graphes montrent que :

- Les débits simulés ne sont pas toujours **en adéquation avec les débits de référence**, notamment pendant et les mois après des événements à pluviométrie intense : le comportement du bassin est trop rapide en crue : une volumétrie de pluies est observée mais n'est en réalité pas absorbée par le bassin, contrairement à ce que peut montrer le modèle (par ex. en 2021);
- Les débits de référence n'ont **pas toujours un comportement de tarissement classique**, que ce soit à cause de karsts ou de résurgences à proximité des stations : la modélisation est moins bonne à cause de cela ;
- Les **débits hivernaux sont mieux simulés en début d'année** (fin de la période de hautes eaux) plutôt qu'en fin d'année (reprise des écoulements après l'étiage).

Les graphes suivants représentent les volumes annuels écoulés pour les débits simulés et de référence ainsi que les débits classés pour les données de référence et les résultats de simulation à Saint-Zacharie. Sur ces deux indicateurs, les bilans en volume d'eau annuel écoulé simulé sont proches de la référence, ainsi que leur distribution journalière ne sont pas trop éloignés de la référence.

Ce résultat est important car il permettra d'extrapoler ces indicateurs de la ressource en eau avec d'autres conditions climatiques (historiques depuis 1997 pour les données COMEPHORE ou futures données Explore2).

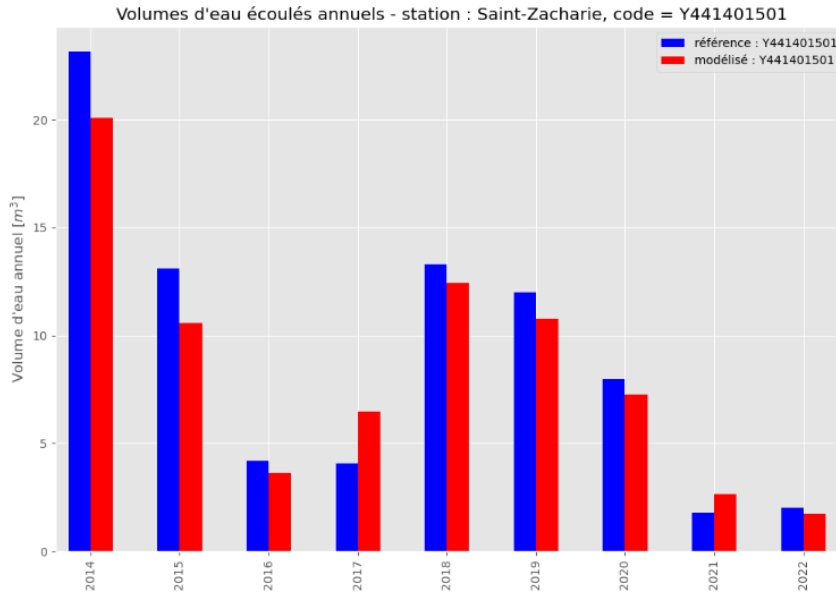


Figure 20 Volume d'eau annuel écoulé simulé et de référence de l'Huveaune à Saint-Zacharie

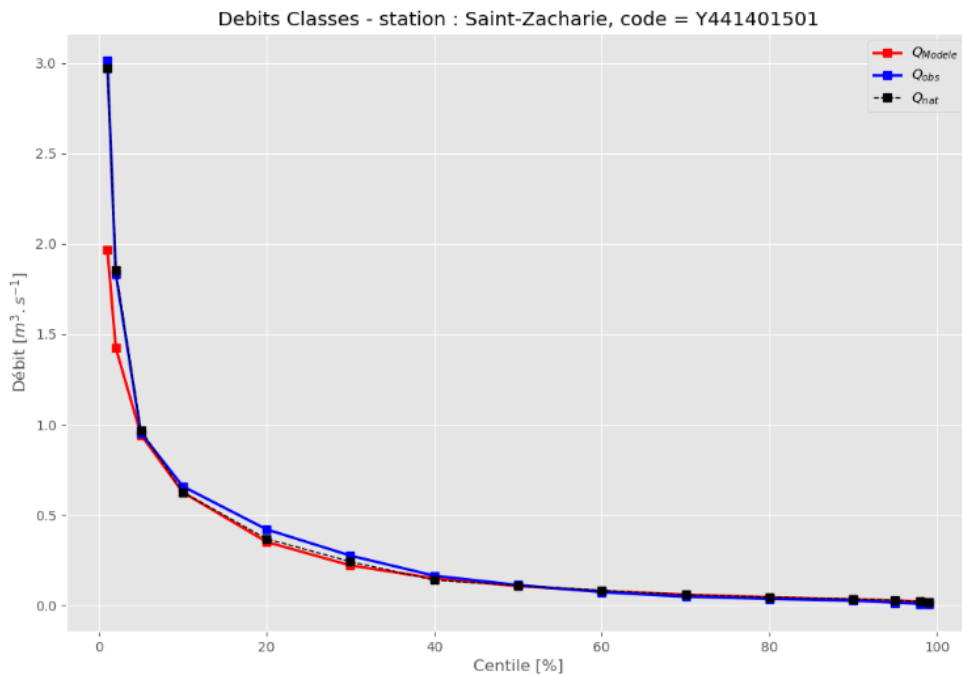


Figure 21 Courbe de débits classés modélisés et de référence pour la station de Saint-Zacharie

Cependant, au pas de temps journalier, les écarts entre les débits simulés et les valeurs de référence peuvent être importants car ils dépendent **des débits extrêmes** sur des événements

très fugaces. Ici, les modèles sous-estiment les pics de crues et compensent le manque en volume en simulant une décrue plus lente qu'observée.

Cette remarque incite à être prudent avec les résultats de modélisation au pas de temps journalier sur ce type de régime hydrologique méditerranéen et en contexte karstique.

Le graphe ci-dessous nous permet de voir la différence (notable) entre les débits mesurés horaires (en noir), les débits mesurés journaliers (en bleu) et les débits simulés journaliers (en orange).

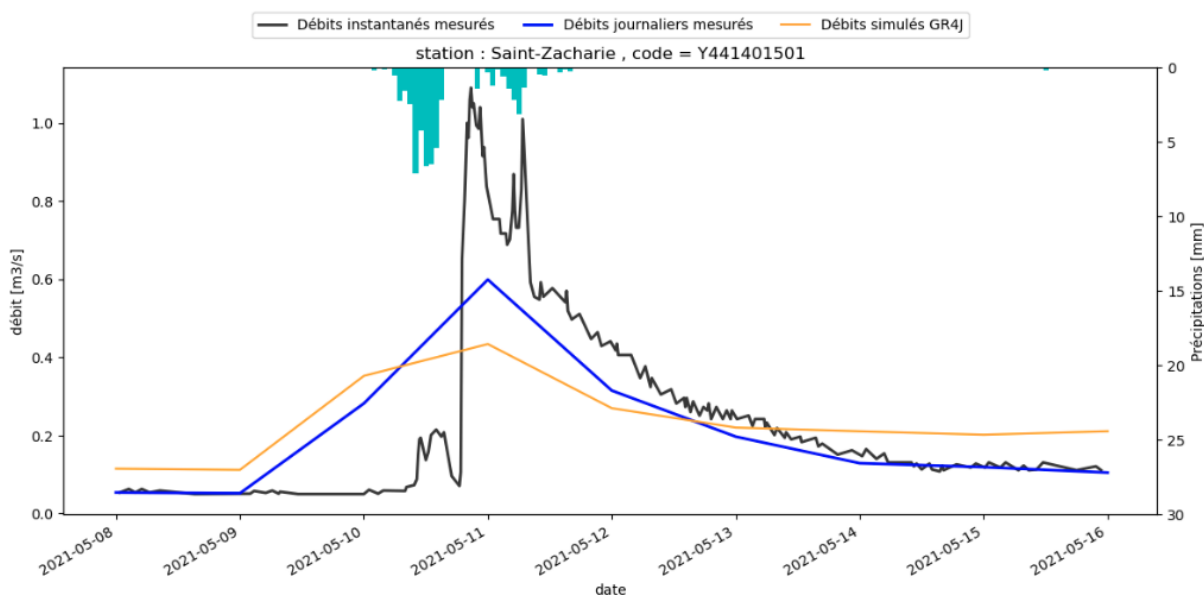


Figure 22 Comparatif des débits horaires et journaliers (observés et simulés) pour un évènement pluvieux en octobre 2021

Ce cas-ci est valable pour un petit évènement pluvieux et localisé. On peut noter que la donnée horaire de débit monte bien plus haut que la donnée journalière. Etant donné que les débits simulés sont mieux calés sur les étiages, les simulations en hauts débits sont plutôt sous-estimées : le modèle n'est pas capable de réagir aussi rapidement que la référence.

On note donc deux problèmes.

- Le bassin versant de l'Huveaune est à réponse instantanée, ce qui fait que les apports de pluie sont souvent mal interprétés en simulation : pour une crue où la quasi-totalité de l'eau tombe en quelques heures et ruisselle sans percoler dans les sous-sols alors que le modèle simulera une recharge des nappes, comme pour une pluie plus régulière.
- En fonction des niveaux de nappes, des quantités de pluies tombées et des niveaux d'eau de surface, différentes réactions (liées aux Karsts) peuvent être observées pour la référence (des temps de retour à l'étiage variables par exemple). Or le karst n'est pas simulable par l'outil GR4J.

V.2.b L'Huveaune à Roquevaire

IMPORTANT : Pour accentuer la réponse du modèle en phase de tarissement les débits simulés à Roquevaire prise en compte par le modèle a été réduite après itération numérique à 93 km², valeur inférieure à la surface réelle du bassin versant topographique (165 km²).

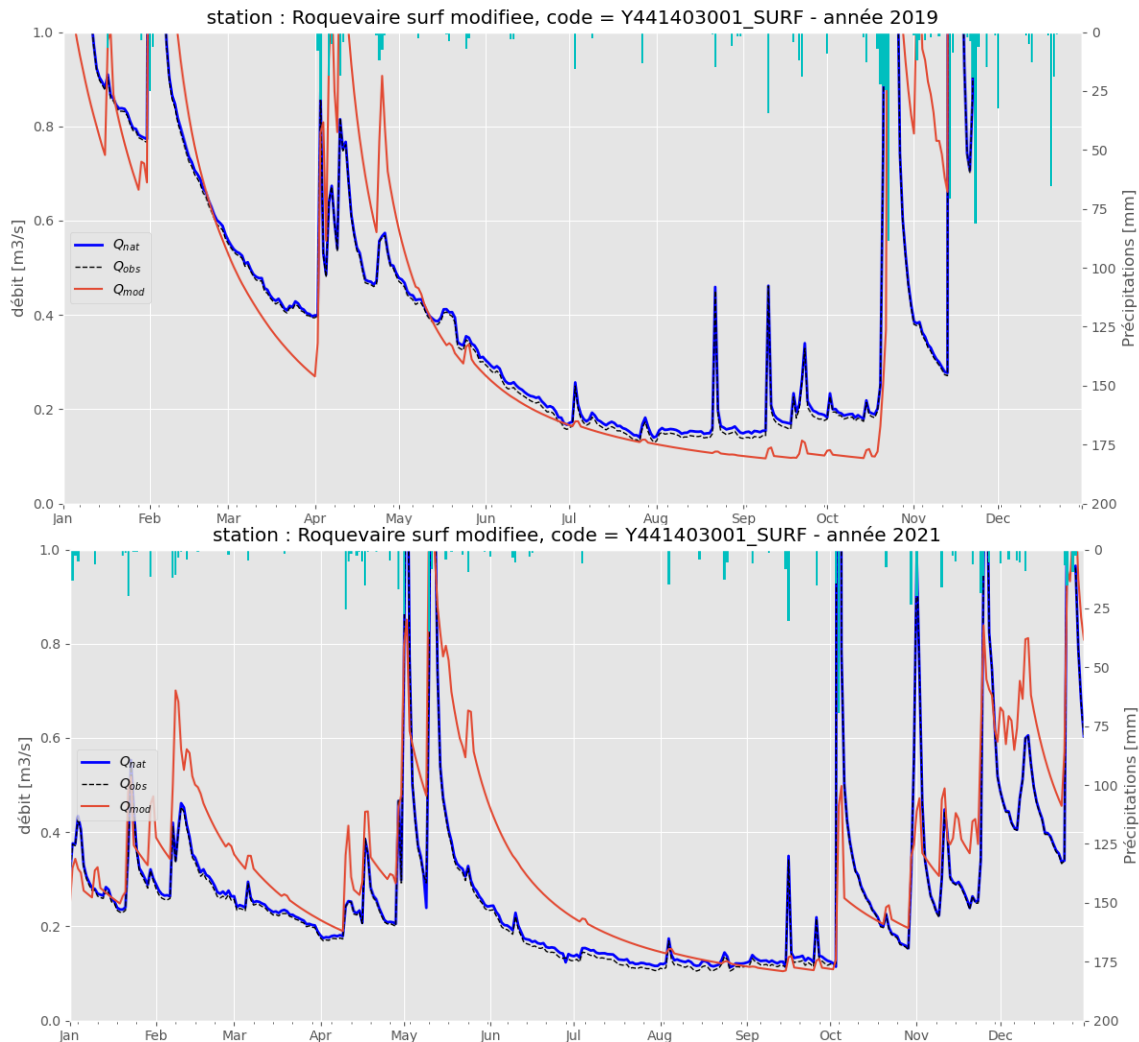


Figure 23 Débit simulé, naturalisé de référence (calculé avec le modèle d'impact) et observé de l'Huveaune à Roquevaire en 2019 et 2021

Ces graphes montrent que :

- Le modèle semble mieux coller à la référence pour ce bassin versant ;
- L'entrée en étiage reste compliquée suite à certains événements pluvieux, les débits de référence ont des comportements difficiles à modéliser.

Le graphe suivant représente les volumes annuels écoulés pour les débits simulés et de référence.

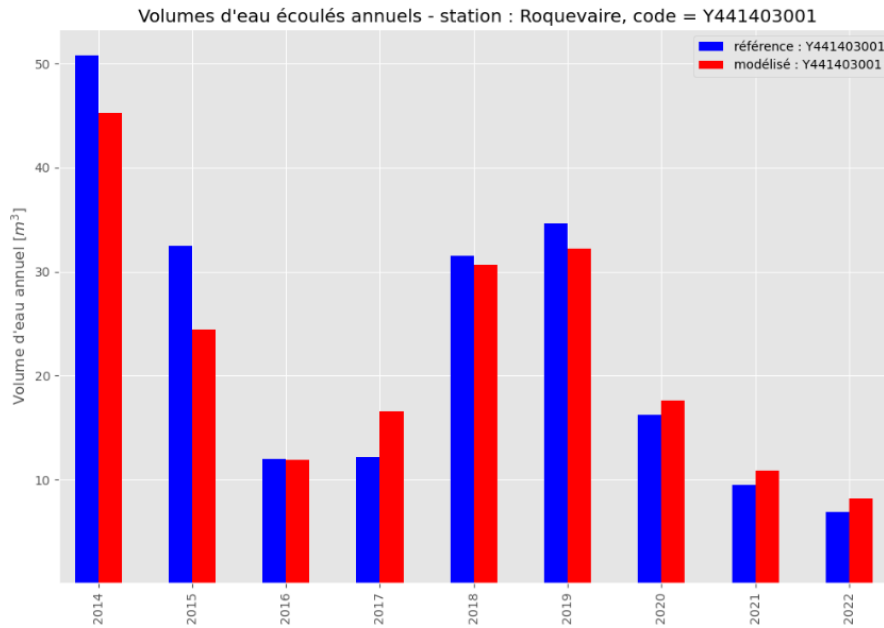


Figure 24 Volume d'eau annuel Mm3 écoulé simulé et de référence de l'Huveaune à Roquevaire

Les bilans en volume d'eau annuel écoulé simulé sont proches de la référence.

Ci-dessous sont présentées les courbes de débits classés pour les données de référence et les résultats de simulation à Roquevaire.

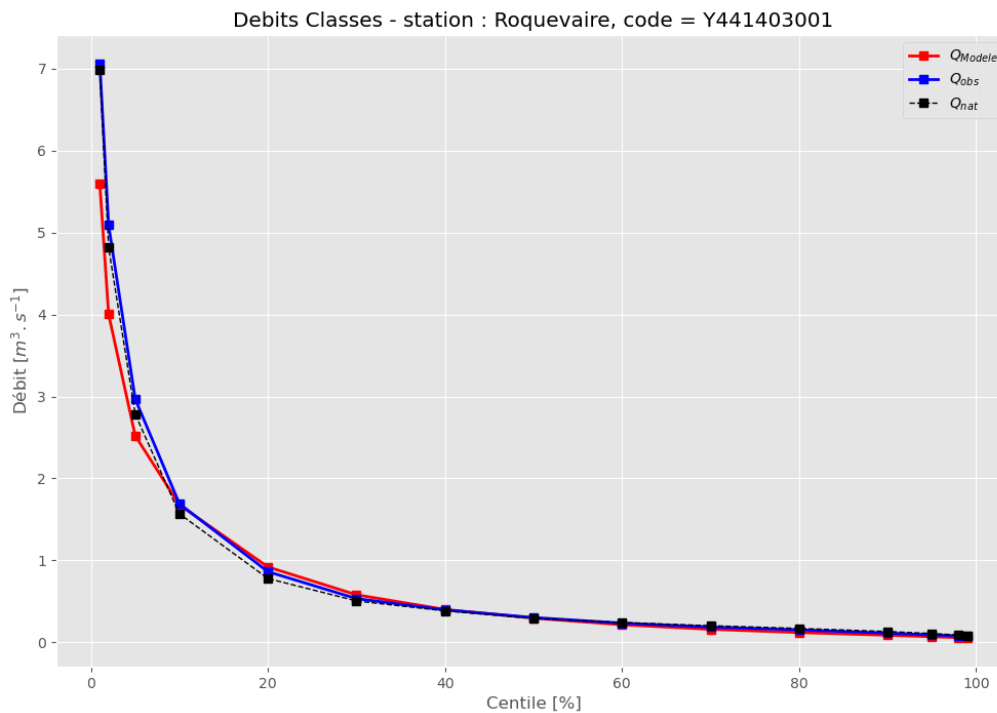


Figure 25 Courbe de débits classés modélisés et de référence pour la station de Roquevaire

Les différentes classes de débits sont très similaires entre la référence et le modèle.

Le bilan en volume et les débits classés étant bien représentés par le modèle, nous estimons que l'utilisation de ce modèle pour étendre la période d'étude aux données disponibles (jusque 1997 pour les données de météorologiques) est viable.

V.2.c L'Huveaune à Aubagne

IMPORTANT : étant donné que la zone de Cuges-les-bains est une zone où toute l'eau est perdue dans des karsts en direction de Calanques, elle n'est pas prise en compte pour la naturalisation des débits avec les modèles GR.

Le graphe ci-après représente les débits simulés, naturalisés de référence (calculé avec le modèle d'impact) et observés d'Aubagne.

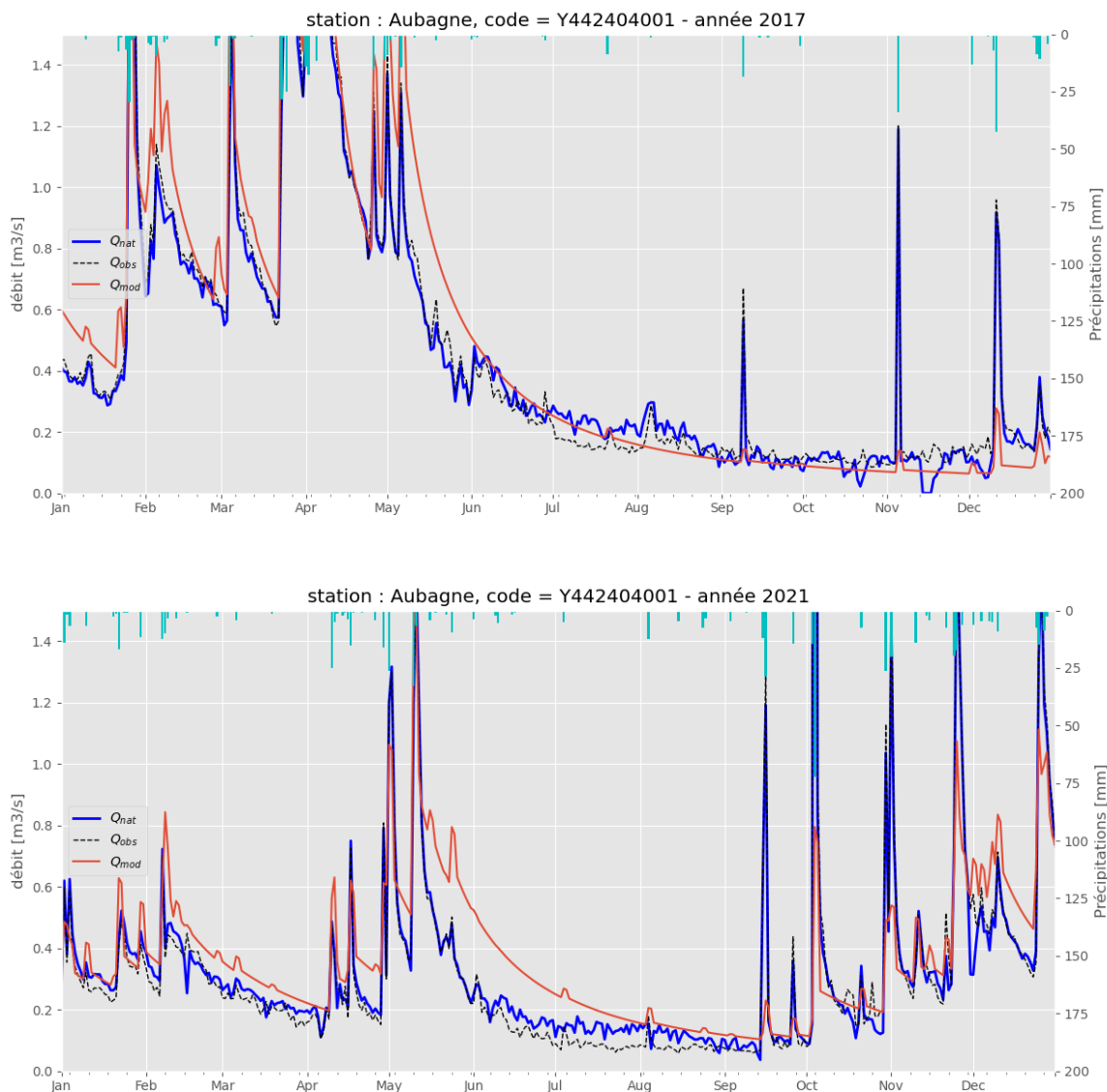


Figure 26 Débit simulé, naturalisé de référence et observé de l'Huveaune à Aubagne en 2017 et 2021

Ces graphes montrent que :

- L'entrée en étiage reste compliquée pour certains évènements ;
- Les impacts humains (agricoles) sont plus visibles en étiage pour le débit naturalisé, mais le modèle le représente mal.

Le graphe suivant représente les volumes annuels écoulés pour les débits simulés et de référence.

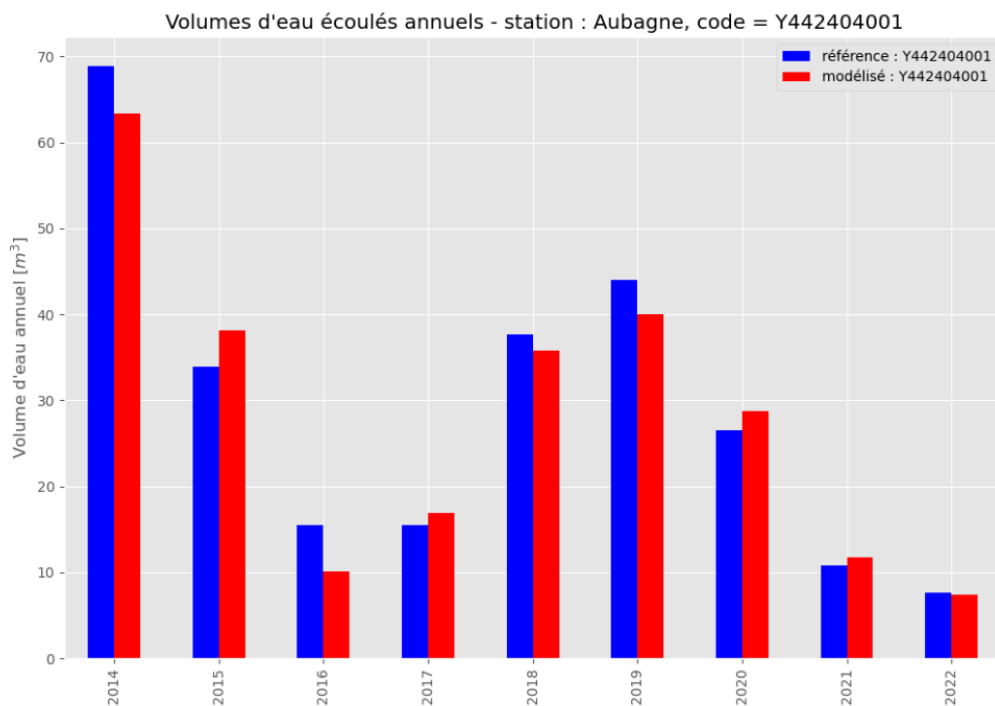


Figure 27 Volume d'eau annuel écoulé simulé et de référence de l'Huveaune à Aubagne (2014/2022)

Les bilans en volume d'eau annuel écoulé simulé sont proches de la référence. Ci-dessous sont présentées les courbes de débits classés pour les données de référence et les résultats de simulation à Roquevaire.

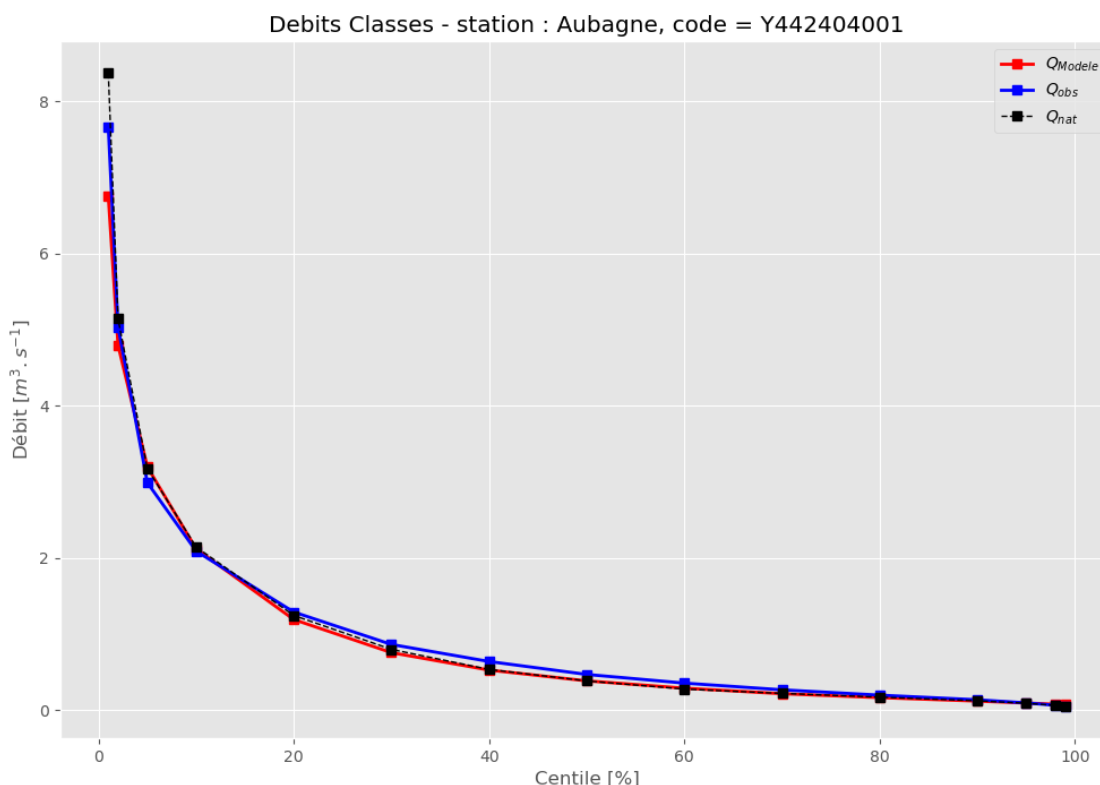


Figure 28 Courbe de débits classés modélisés et de référence pour la station d'Aubagne

Les différentes classes de débits sont très similaires entre la référence et le modèle.

Au vu des résultats de simulation (bilan en volume et classe de débits), le modèle semble être viable pour une extension de la période d'étude, malgré une incapacité à prévoir les entrées en étiage.

VI. RESULTATS DE LA MODELISATION DES DEBITS NATURALISES

VI.1 Bilan hydrique des stations jaugées

Nous disposons de données climatiques COMEPHORE (pluies) jusqu'en 1997. Avec ces données, le modèle hydrologique employé a permis le calcul des apports naturels simulés en fonction des précipitations et de l'ETP sur les bassins versants de l'Huveaune pour les stations de Saint-Zacharie, Roquevaire et Aubagne jusqu'en 1997.

Avec les résultats précédents, des fiches synthèse partielles pour les différentes stations ont pu être générées. Elles contiennent des informations similaires aux fiches synthèses disponibles sur Hydroportail, moyennant les informations et statistiques historiques.

En plus de cela, sont présentés les lames d'eau annuelles (écoulées modélisé et de référence, ainsi que tombées).

VI.1.a L'Huveaune à Saint-Zacharie

La donnée mesurée n'est impactée que par des prélèvements d'eau potables, assez constants sur l'année, pourtant elle montre dans le détail des comportements difficilement explicables pour une hydrologie naturelle. Cela pourrait être lié à des résurgences près du point de mesure, ou à des complexités de mesures lors des périodes d'assecs.

Ci-dessous un graphe comparatif des lames d'eau écoulées et pluies annuellement sur la station de Saint Zacharie.

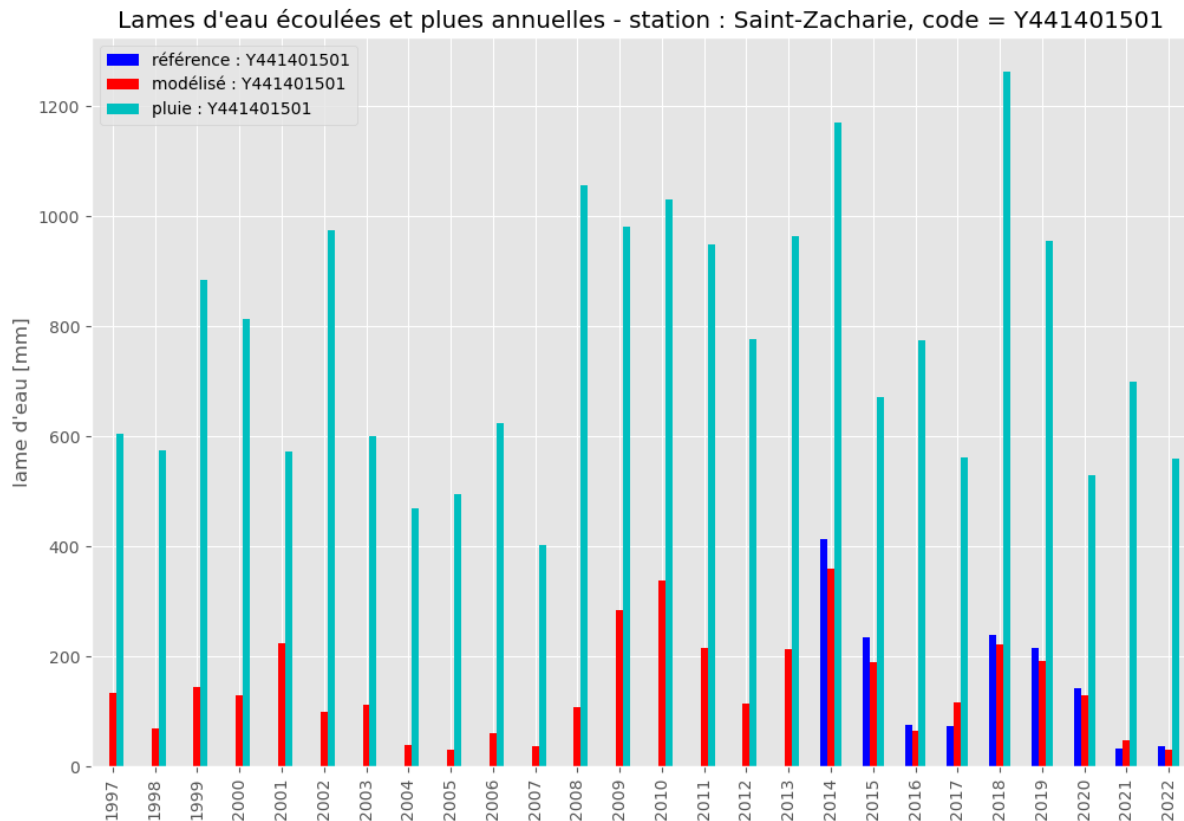


Figure 29 Lames d'eau annuelles (mm) écoulées simulées et de référence ainsi que pluies pour l'Huveaune à Saint-Zacharie en mm/an

VI.1.b L'Huveaune à Roquevaire

Cette station est sous des influences humaines similaires à celle de Saint-Zacharie (AEPs essentiellement). On observe un comportement similaire à celui observé pour la station de Saint Zacharie : atténuation des extrêmes, module inférieur à l'observé.

Ici, on peut toutefois noter une résurgence de Karst non prise en compte dans les données de référence, ce qui perturbe le calage du modèle et donne des comportements de référence difficilement modélisables.

Lames d'eau écoulées et pluies annuelles - station : Roquevaire surf modifiée, code = Y441403001

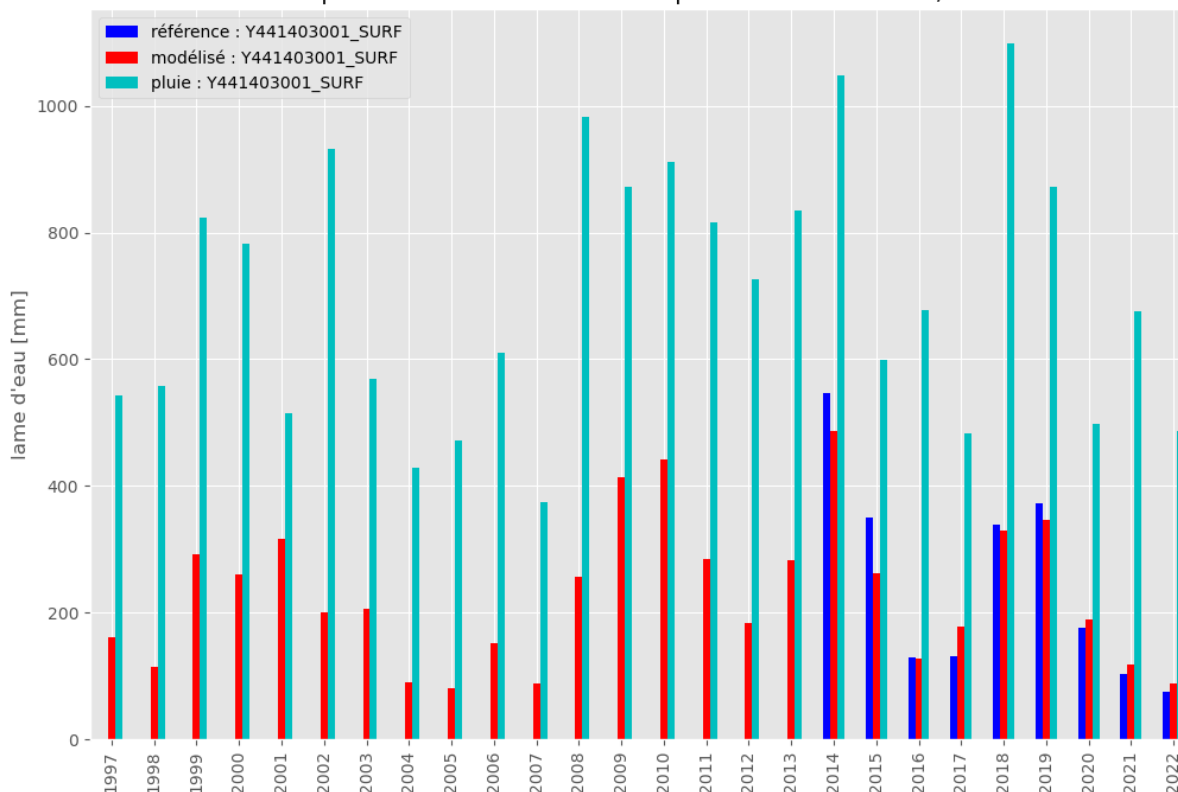


Figure 30 Lames d'eau annuelles écoulées simulées et de référence ainsi que pluies pour l'Huveaune à Roquevaire

VI.1.c L'Huveaune à Aubagne

IMPORTANT : étant donné que la zone de Cuges-les-Pins est une zone où toute l'eau est perdue dans des karsts en direction de Calanques, elle n'est pas prise en compte pour la naturalisation des débits avec les modèles GR.

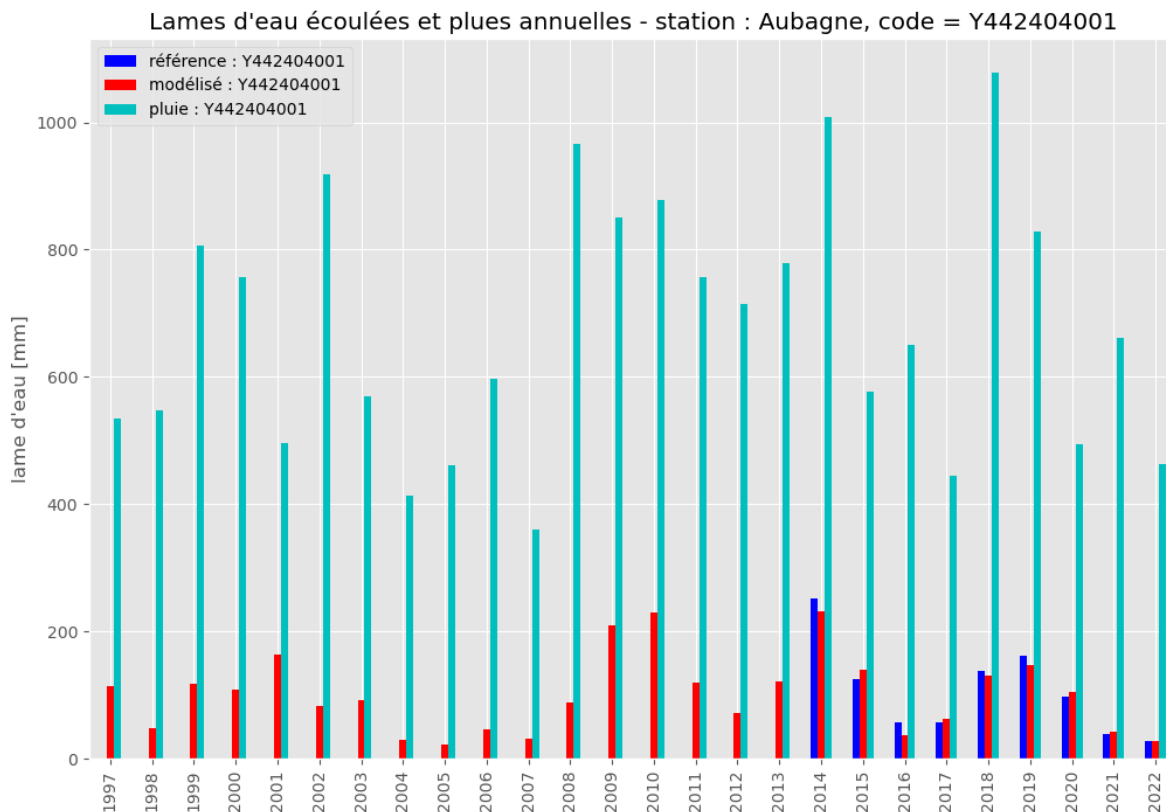


Figure 31 Lames d'eau annuelles (mm) écoulees simulées et de référence ainsi que pluies pour l'Huveaune à Aubagne

VI.2 Approche des pertes karstiques par le bilan hydrique

Pour toutes les stations, les précipitations annuelles sont nettement supérieures aux lames d'eau écoulees. Deux³ sources potentielles de pertes sont en cause : l'évaporation réelle (ETR) et la part d'eau perdue dans les Karsts.

La question des pertes karstiques est évidemment centrale dans ce bassin et il est tentant de l'évaluer au travers du bilan hydrique. En effet, si l'on connaît l'ETR, alors le reste du déficit d'écoulement s'explique par les pertes vers le sous-sol profond qui sont exportées du bassin versant via le karst. Remarquons, à ce stade que les eaux infiltrées dans le système alluvial (nappe d'accompagnement) ou restituée par les sources dans le bassin de l'Huveaune ne sont pas différenciée des écoulements de surface.

Pour la part perdue dans les karsts, il est possible de rapprocher le comportement de l'Huveaune à Aubagne (dont une part du bassin versant est karstique) avec des bassins versants naturels voisins (avec la même influence météo) non karstiques : l'Arc à Mereuil et l'Argens à Roquebrune. Les seconds nous renseignent sur l'intensité de l'évaporation en climat méditerranéen et l'on peut envisager que l'ordre de grandeur soit identique sur le bassin de l'Huveaune.

³ et dans une moindre mesure pour les données modélisées une part d'eau ruisselée issue des événements météo intenses, à temps caractéristique horaire.

Ainsi, en réalisant les bilans des parts de lames d'eau dispersées, i.e. : la différence entre la lame d'eau hyétométrique (tombée) et la lame d'eau ruisselée naturalisée (équivalente à l'ETR pour les autres bassins), on peut retrouver un ordre de grandeur de la part d'eau perdue dans les karsts de l'Huveaune. La figure ci-dessous présente les résultats obtenus.

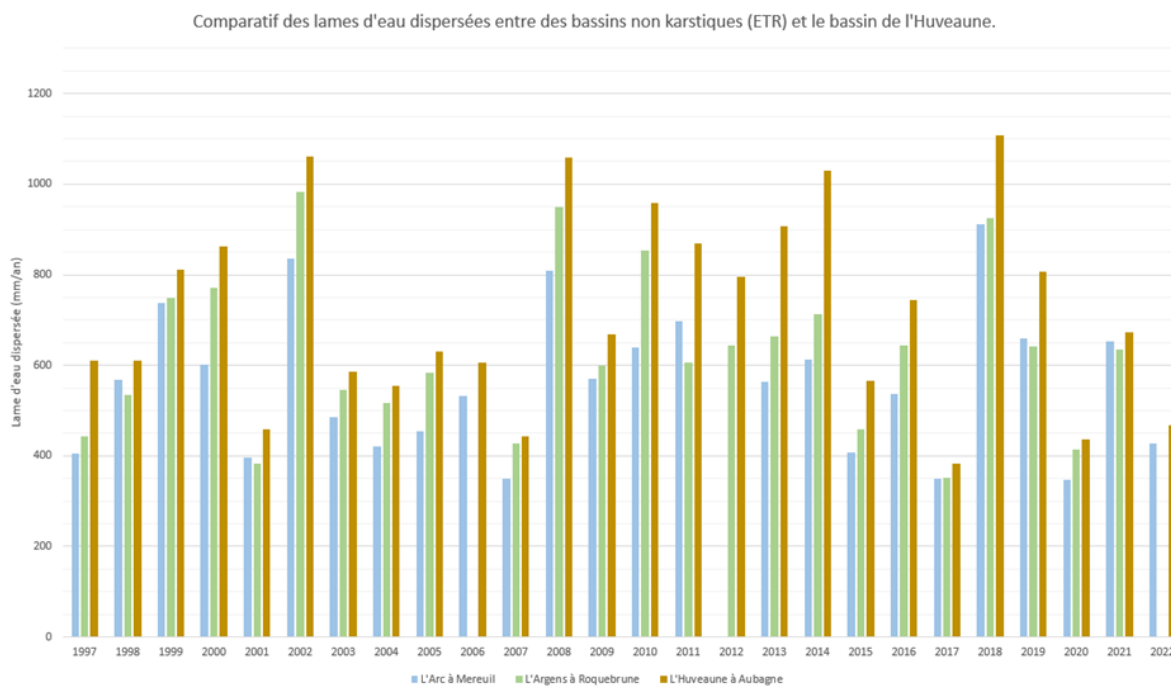


Figure 32 Lames d'eau non efficace pour la rivière pour les bassins versants de l'Huveaune (en partie karstique), de l'Arc et de l'Argens (non karstique).

Nom du cours d'eau	Moyenne	Quinquennal sec centile	Quinquennal humide
Arc	560	420	670
Argens	630	490	760
Huveaune réduit (HR)	720	560	910
HR- Arc	160	70	230
HR- Argens	90	40	170
HR – (Arc + Argens) / 2	130	60	190

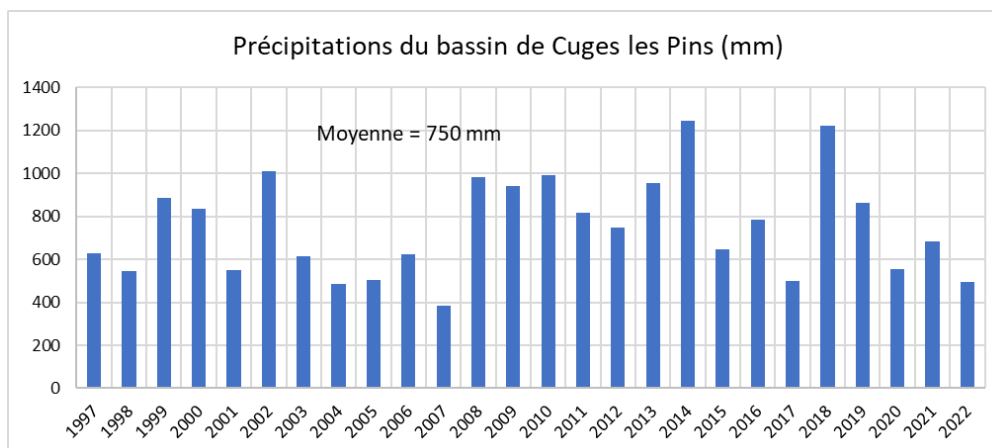
Remarque : les statistiques en bleu correspondent à la distribution des différences et non pas à la différence des distributions

Nous observons que les lames d'eau non efficaces ou « perdues » pour l'écoulement sont toujours plus importantes pour l'Huveaune que pour l'Arc ou l'Argens. De plus, l'ordre de grandeur des écarts est le même, que l'on compare l'Huveaune à l'Arc ou à l'Argens. Le terme $(Arc + Argens)/2$ permet donc d'approcher un comportement moyen entre les deux BV. L'évapotranspiration réelle s'élèverait entre 560 et 630 mm en moyenne annuelle, valeur classiquement rencontrée. La valeur moyenne de 595 mm peut être retenue pour l'ETR de référence.

Pour l'Huveaune réduit (sur la seule partie du bassin versant hors sous bassin de Cuges les Pins), en moyenne sur les 25 ans étudiés, 130 mm en plus (quinquennal sec à 60 mm, quinquennal humide à 190 mm) seraient donc perdus vers les karsts. Cela représente une perte en amont d'Aubagne évaluée à $130 \text{ mm} \times 273 \text{ km}^2 = 36 \text{ Mm}^3$ soit **1,1 m³/s !**

A cela, il faut rajouter les pertes karstiques sur le bassin de Cuges les Pins. La pluviométrie y est en moyenne sur la période 1997/2022 de 750 mm sur 102 km² (**sachant que cette surface est incertaine en raison du relief spécifique de ce secteur**). 595 mm étant évaporé et aucun écoulement de surface n'échappant, ce bassin apporterait donc 155 mm au karst, soit 15,8 Mm³/an.

Au total le bassin versant topographique de l'Huveaune perdrait environ 52 Mm³/an, soit 1,6 m³/s soit 2 fois le débit de l'Huveaune à Aubagne !

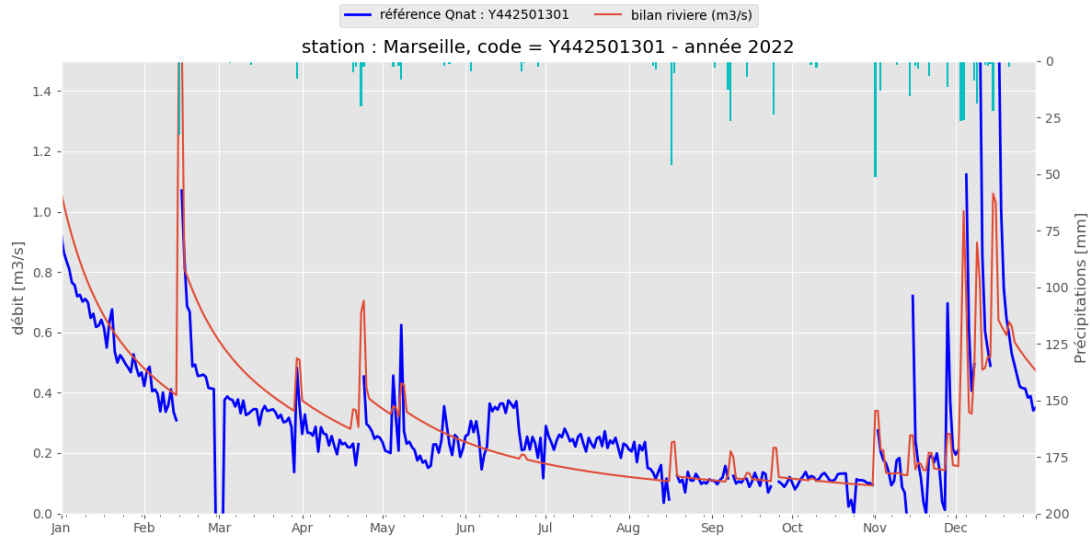


VI.3 Régionalisation de l'hydrologie simulée aux sous bassins non jaugés

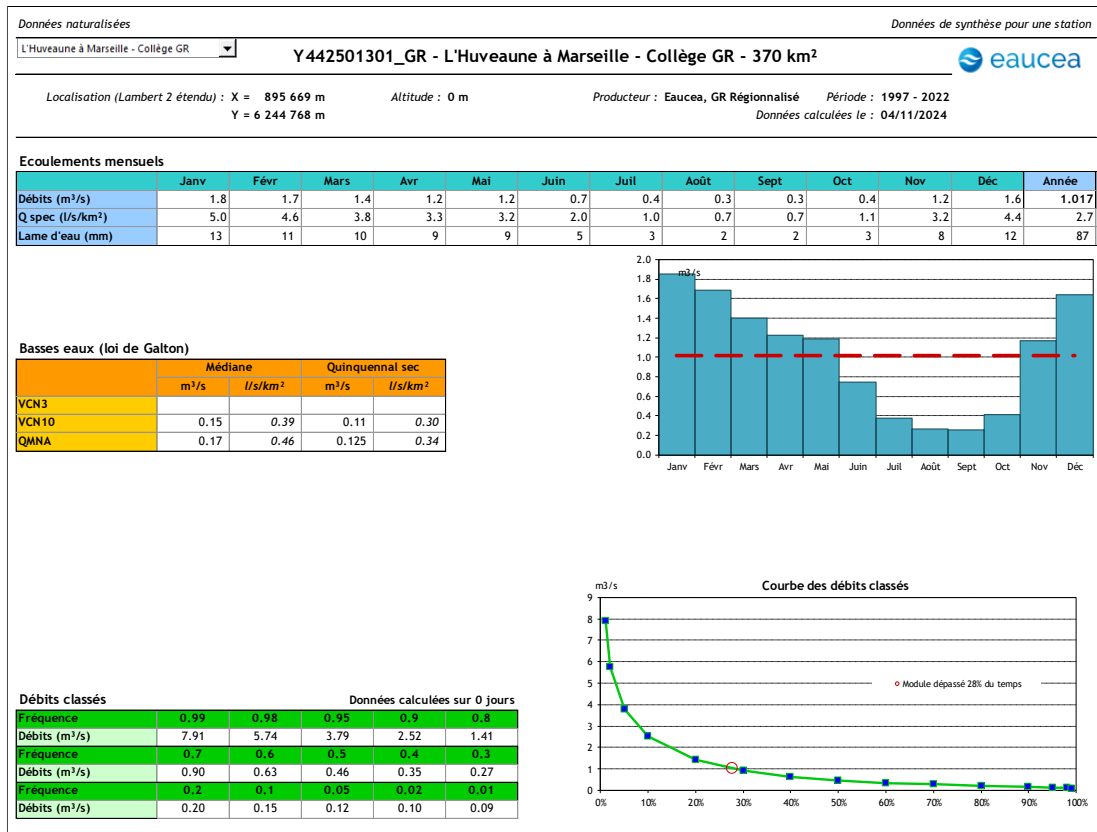
Une méthode courante pour connaître les débits des rivières du périmètre d'étude lorsqu'il n'existe pas de station de mesures permanentes est d'utiliser un rapport de surface de bassin versant pour estimer les débits d'un cours d'eau non jaugé par rapport aux débits d'un cours d'eau connu (Lebecherel et al. 2015). Une autre méthode consiste à utiliser les coefficients de calage de modèle de station que l'on estime équivalente en termes de fonctionnement hydrologique mais en exploitant les spécificités climatiques et de surface du bassin versant non jaugé modélisé. On utilise ici ce processus pour trois zones : Marseille (avec des données depuis 2022 uniquement), l'aval du Torrent du Fauge (à Aubagne) et l'aval du Jarret (à Marseille Saint Just) en s'appuyant sur les coefficients d'Aubagne.

VI.3.a L'Huveaune à Marseille

Le graphe ci-après représente les débits simulés de Marseille. Cette station ne dispose de données que depuis 2022. Pour Marseille, le choix a été de rejouer la production de l'ensemble du bassin versant réduit (moins Cuges). la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** nous montre que les débits 2022 sont assez bien simulés.



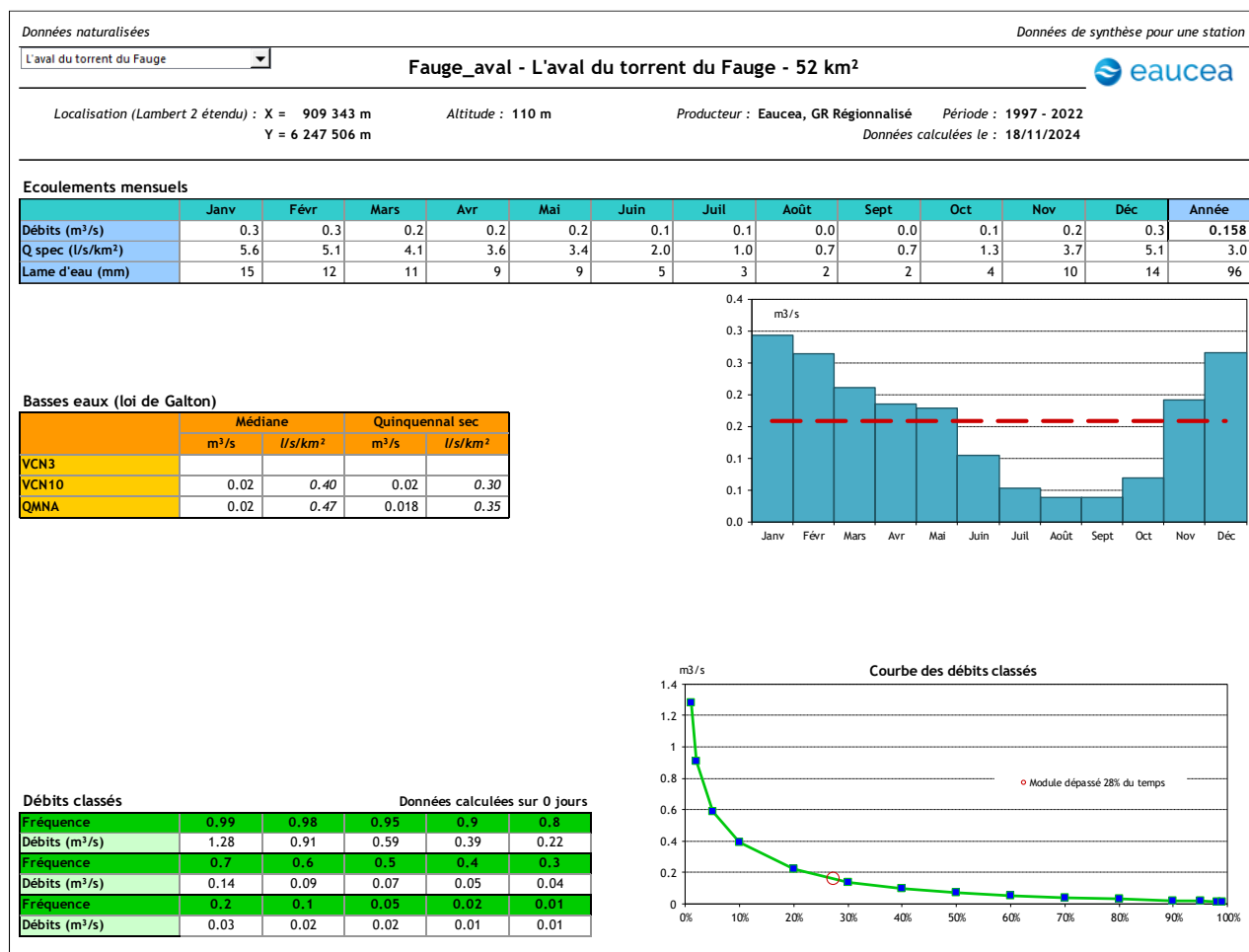
Nous avons ainsi la possibilité de reconstituer des statistiques sur ce bassin versant, montrées dans la fiche de synthèse suivante en considérant un bassin versant efficace de **370 km²** (réduit de Cuges).



La station de Marseille subit la plupart des impacts humains (surtout industriels et agricoles) et notamment le fait que la quasi-totalité des rejets du bassin (STEU de Marseille) se font dans la Mer Méditerranée.

VI.3.b L'aval du torrent du Fauge à Aubagne

Le graphe ci-après représente les débits simulés de l'aval du torrent du Fauge. Cette station est virtuelle, la calibration est faite par une régionalisation du bassin versant : le comportement de cette station est considéré comme similaire à celle d'Aubagne comme le bassin versant du Fauge est inclus dans celui de la station d'Aubagne. Les paramètres du modèle d'Aubagne sont repris pour ce modèle (moyennant une proportion des aires des bassins versants).

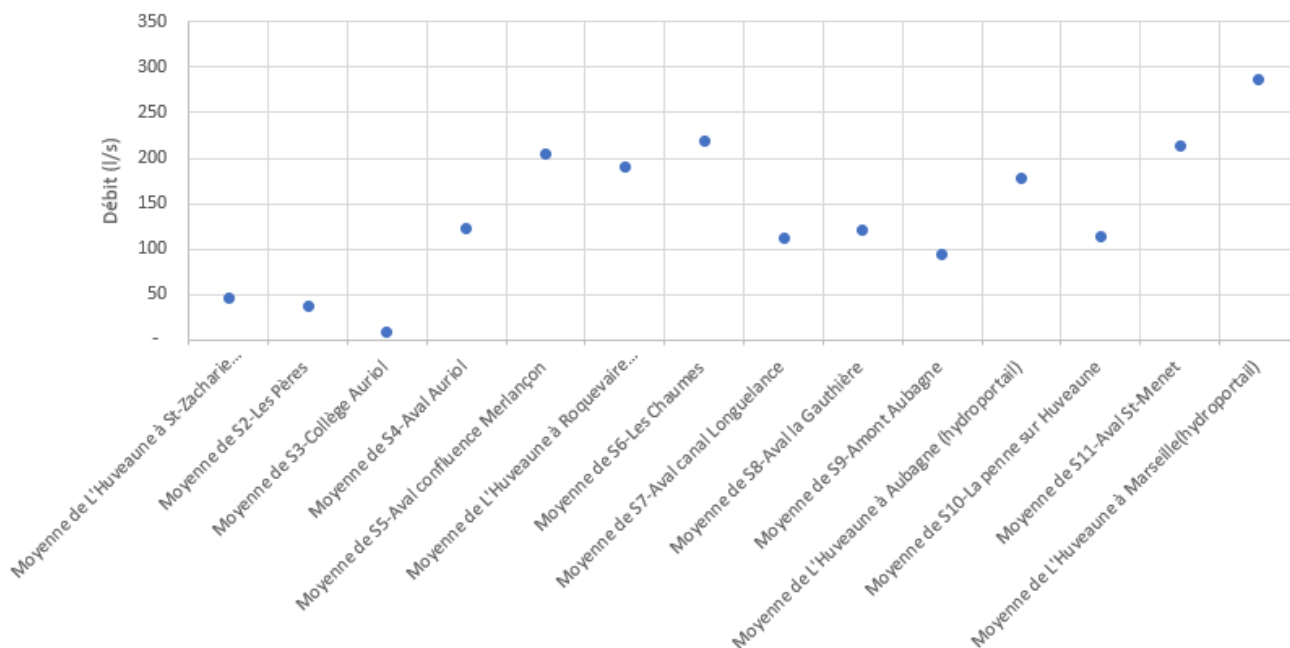


Rapprochement avec les séries hydrométriques ECOGEA

Les données mesurées par ECOGEA durant leur étude⁴ permettent de reconstituer l'abondance hydrologique le long de l'Huveaune (cf. ci-dessous).

⁴ Rapport ECOGEA E211242, P. BARAN, M. CHEFSON, V. CORNU, 2024

Profil en long des débits moyens sur la période 03/2022-09/2023



Le torrent du Fauge a son exutoire en aval de la station S9, et en amont de la station Hydroportail d'Aubagne. On peut voir un net accroissement entre l'amont et l'aval du Fauge (qui permet d'avoir un ordre de grandeur de son apport) : en moyenne 100 l/s selon ces données entre avril 2022 et décembre 2022. Notre modèle nous donnant en moyenne 120 l/s sur la même période, les ordres de grandeurs sont conservés.

De plus, une station (S14) avait été posée par Ecogea à la confluence du Fauge et de l'Huveaune (sur le Fauge), dont nous n'avons pas les données, mais dont des statistiques sont notées dans le rapport fourni par Ecogea. Ces statistiques montrent que le débit moyen est deux fois plus grand en mesuré (avec impacts, 220 l/s) que pour notre modèle mais les quantiles et la médiane sont du bon ordre de grandeur, ce qui nous permet de conforter notre régionalisation.

VI.3.c Le Jarret à Marseille Saint Just

Le graphe ci-après représente les débits simulés du Jarret à Marseille Saint Just. Cette station est virtuelle, et son bassin versant est sensiblement différent du bassin de l'Huveaune à Aubagne. Les résultats obtenus doivent donc être pris avec prudence.



VII. CONCLUSION

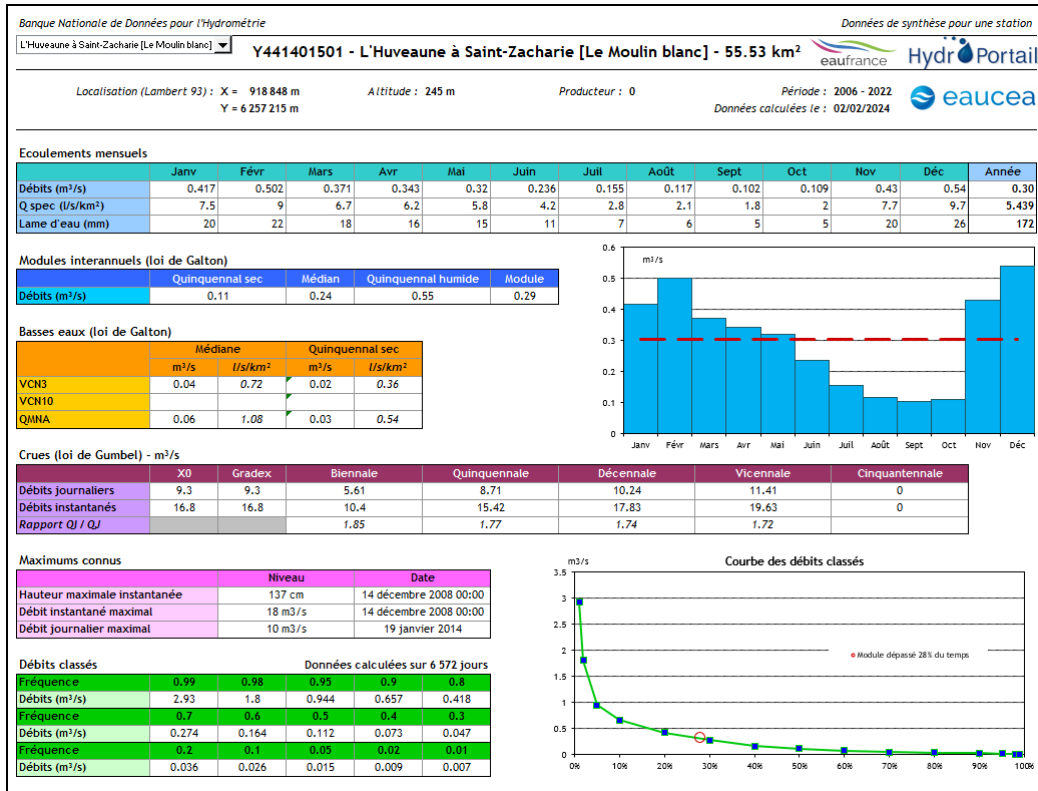
Cette note présente les méthodes de reconstitution de l'hydrologie de l'Huveaune à partir de deux modèles consécutifs :

- ✓ Un modèle d'impact combinant l'effet des prélèvements et des rejets répartis spatio-temporellement pour construire des débits moyens journaliers aux quatre stations de l'Huveaune sur la période de 8 ans allant de l'année 2014 à 2021. En étiage à Aubagne les usages ont un impact résultant de l'ordre de 100 l/s, le débit naturel étant plus élevé que le débit mesuré.
- ✓ Ces données servent de référence pour la construction de modèles pluie-débit afin d'étendre la période de l'hydrologie de l'Huveaune à 1997/2022, ainsi que réaliser des régionalisations pour établir l'hydrologie des bassins sans stations hydrométriques ou ayant trop peu de mesures (Jarret, Fauge et Marseille).

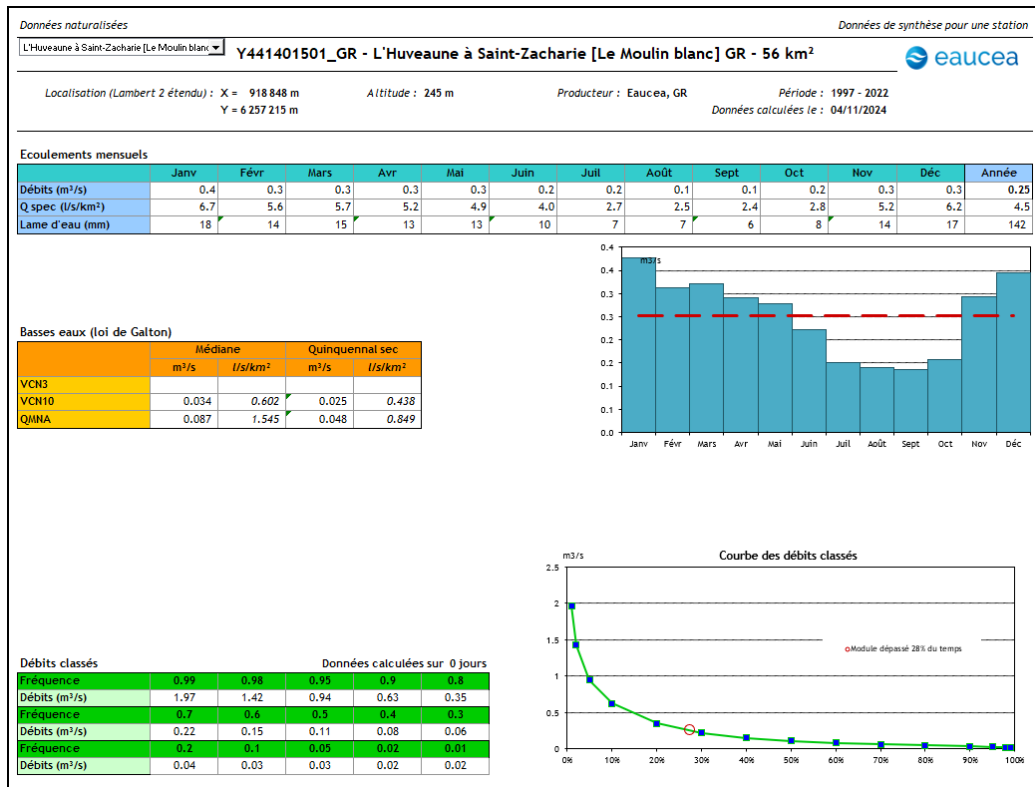
VIII. FICHES DE SYNTHÈSE DES DÉBITS MESURES ET DES DÉBITS NATURALISÉS MODELE GR

Ci-dessous les fiches synthèse, pour les données observées (Hydroportail) et simulées longue période (GR, fiche partielle).

Saint Zacharie : attention aux périodes différentes

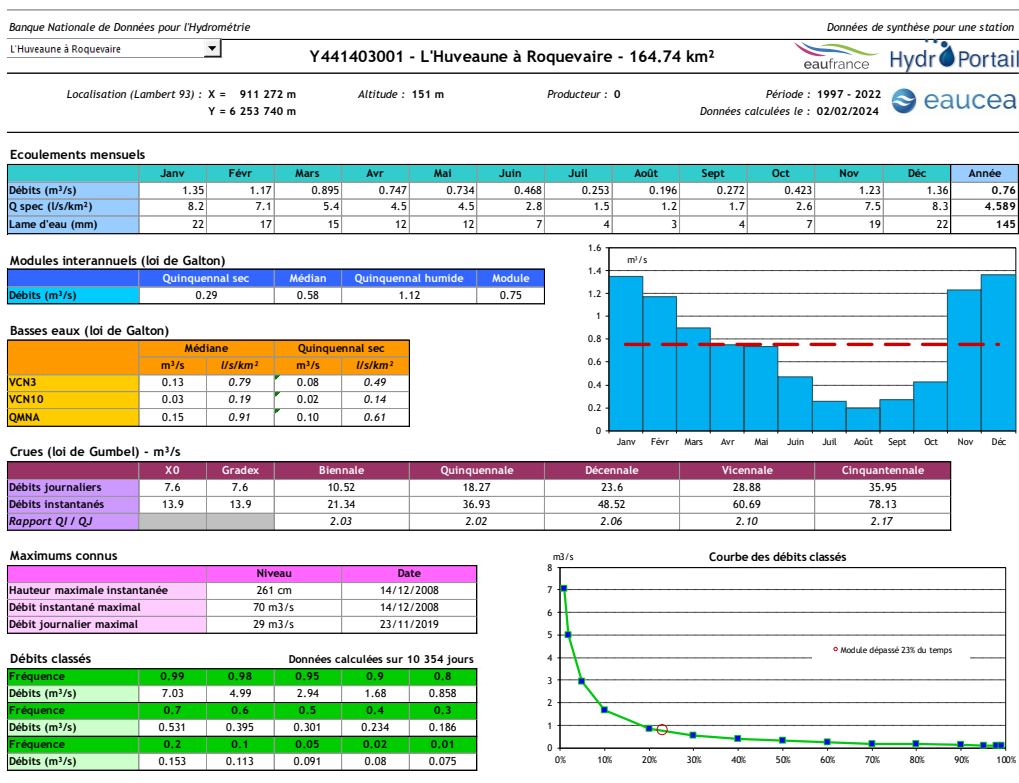


Mesurés : 2006-2022

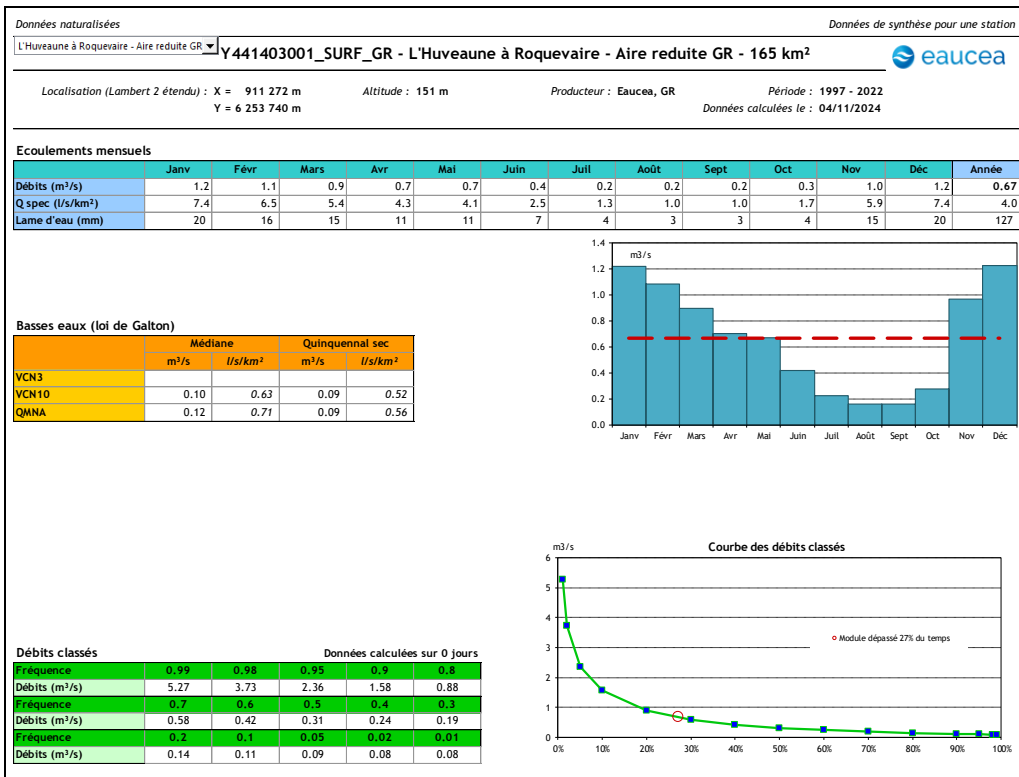


Simulés 1997-2022

Roquevaire

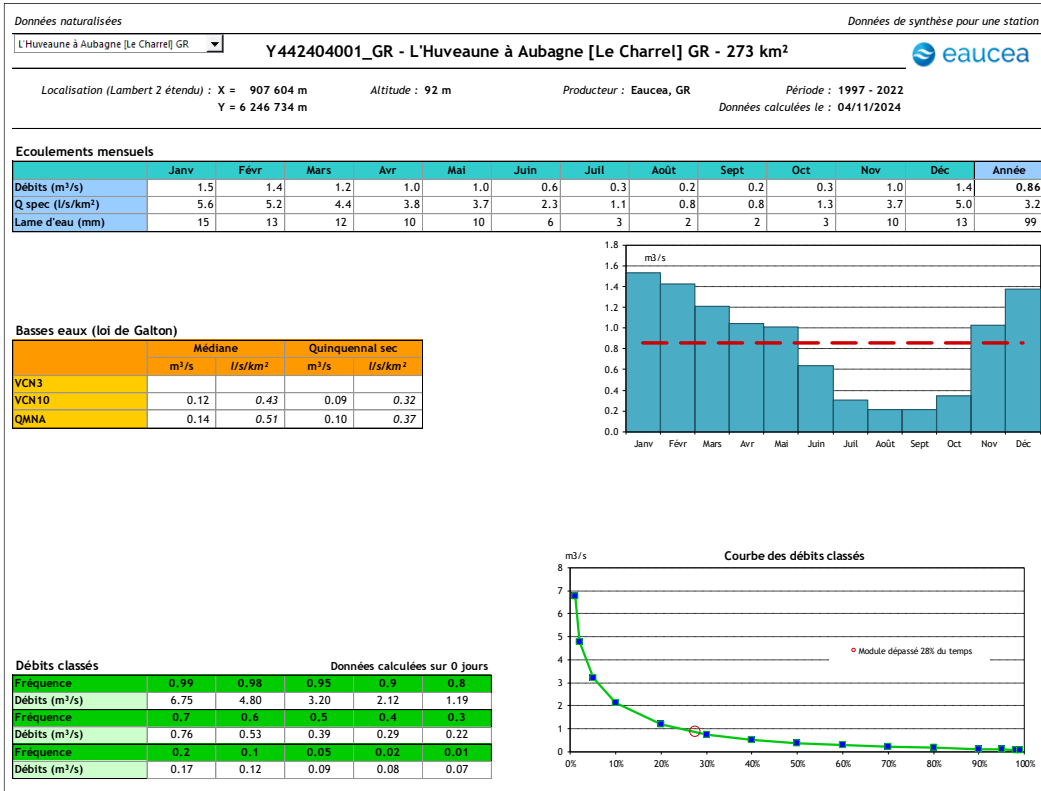
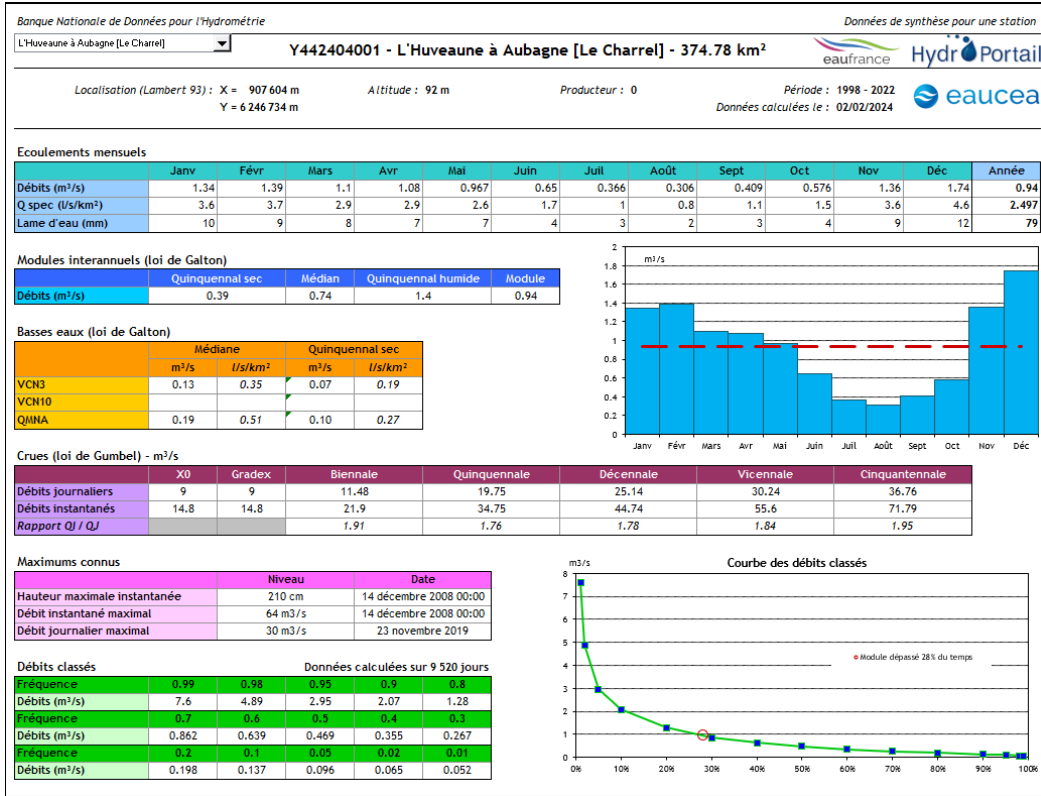


Mesurés 1997_2022



Simulés 1997-2022 Aire réduite (L'aire réduite signale une technique de modélisation pour raidir les tarissements.)

Aubagne



A noter qu'ici, la modélisation de la station d'Aubagne ne prend pas en compte la zone de Cuges-Pins pour la naturalisation, comme toute l'eau de cette zone est perdue dans les karsts en direction des Calanques de Marseille. En revanche, nous avons conservé la surface complète topographique pour cette fiche de synthèse afin de comparaison avec les données Hydroportail pour les écoulements spécifiques. En réalité la lame d'eau écoulee sur le bassin versant topographique efficace (273 km²) est plus élevée (99 mm au lieu de 72 mm si l'on avait rapporté le débit à la surface topographique complète – 375 km²).



**Préserver ensemble
nos nappes et nos rivières :
une responsabilité partagée !**



<https://www.epagehuca.fr/le-bassin-versant-de-lhuveaune/milieux-aquatiques/le-ptge-projet-de-territoire-pour-la->

