



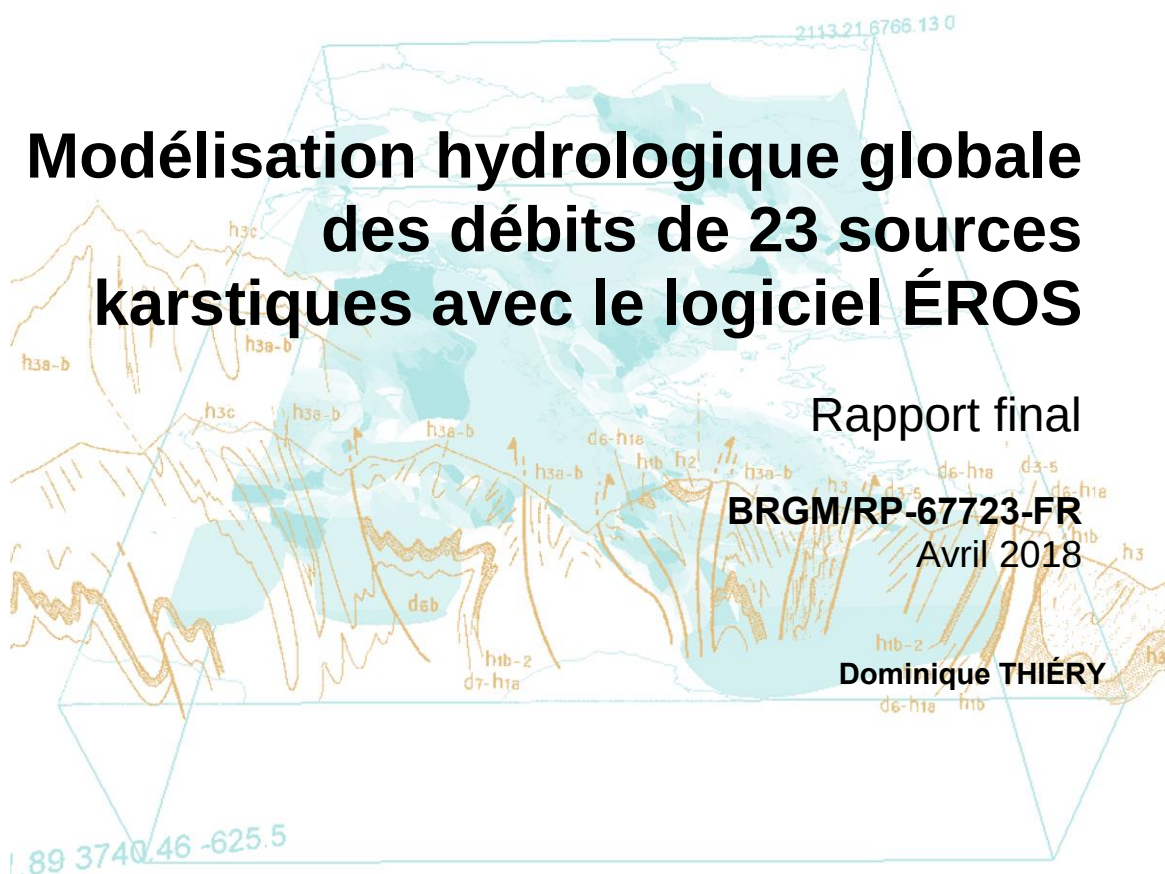
Modélisation hydrologique globale des débits de 23 sources karstiques avec le logiciel ÉROS

Rapport final

BRGM/RP-67723-FR

Avril 2018

Dominique THIÉRY



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Modélisation hydrologique globale des débits de 23 sources karstiques avec le logiciel ÉROS

Rapport final

BRGM/RP-67723-FR
Avril 2018

Dominique Thiéry

Vérificateur :

Nom : N. Amraoui

Date : 27/04/2018



Approbateur :

Nom : P. Audigane

Date : 10/05/2018



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Mots clés : Systèmes karstiques, Modélisation hydrologique globale, Code de calcul ÉROS, Code de calcul GARDÉNIA, Modèle à réservoirs, Bilan hydrologique, Pluie-Débit.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Thiéry D. (2018b) - Modélisation hydrologique globale des débits de 23 sources karstiques avec le logiciel ÉROS. Rapport BRGM/RP-67723-FR, 66 p., 23 fig., 6 ann.

Synthèse

Le projet de recherche Aquif-FR (Habets et al., 2015) a pour objet la modélisation discrétisée des principaux systèmes aquifères de la France métropolitaine.

Ce projet, initié par l'AFB (Agence Française pour la Biodiversité) en 2014, est coordonné par l'UMR Métis (UPMC). Il regroupe des chercheurs et ingénieurs de différentes disciplines : des hydrogéologues (BRGM, Mines-Paris Tech, UMR Métis, LHYGES et Géosciences Rennes), des numériciens (CERFACS) et des prévisionnistes spécialistes des échanges surface-atmosphère (Météo-France).

Dans le cadre de ce projet de recherche les débits journaliers de 23 systèmes karstiques français ont été modélisés avec le code de calcul ÉROS (Thiéry & Moutzopoulos, 1992 ; Thiéry, 2018) du BRGM.

Chaque système a été modélisé indépendamment par une modélisation globale pluie – débit selon le schéma GARDÉNIA (Thiéry, 2009, 2013, 2014, 2015a) utilisé par le code de calcul ÉROS.

Bien que le code de calcul ÉROS soit conçu pour modéliser avec une approche spatialisée semi-globale des bassins versants organisés en sous-bassins, il est également possible de modéliser des bassins versants indépendants. L'intérêt d'utiliser ÉROS est alors de permettre facilement la modélisation simultanée d'un grand nombre de bassins.

Dans chaque bassin (ou sous-bassin), à partir de la séquence des données météorologiques (précipitations, évapotranspiration potentielle, température) sur le bassin d'alimentation, un modèle hydroclimatique global GARDÉNIA permet de calculer le débit du cours d'eau (ou de la source) à l'exutoire du bassin.

L'accumulation et la fonte de la neige sont prises en compte dans les bassins concernés.

Le schéma GARDÉNIA qui simule chaque sous-bassin de ÉROS est un modèle hydroclimatique global à réservoirs. Il simule les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin versant (pluie, évapotranspiration, infiltration, écoulement) par des lois physiques simplifiées. Ces lois physiques simplifiées correspondent à un écoulement à travers une succession de réservoirs.

Les 23 bassins karstiques ont été modélisés avec succès avec les données climatiques SAFRAN-2017 (Pluie, Neige, ETP, Température) de Météo-France. Pour 80 % des bassins, le coefficient de Nash sur la racine carrée des débits journaliers est supérieur à 0.80.

Le schéma de calcul de GARDÉNIA v8.6, intégrant des effets de seuil de débordement, qui est utilisé par ÉROS, est donc tout à fait adapté à la simulation de bassins karstiques soumis à des climats variés.

Les débits d'étiages et également les débits de hautes eaux sont bien reproduits ce qui permet de garantir des prévisions fiables.

Un essai de modélisation en utilisant les Ruissellements et Drainages de la plateforme SURFEX version 2015 de Météo-France a donné des résultats significativement moins bons : seulement 26 % des bassins (au lieu de 80 %) ont un coefficient de Nash sur la racine carrée des débits journaliers supérieur à 0.80.

Sommaire

1. Introduction.....	9
2. Systèmes karstiques modélisés	11
2.1. Caractéristiques des systèmes karstiques	12
2.2. Analyse préliminaire des systèmes karstiques	15
2.2.1. Débits observés à l'exutoire des systèmes karstiques	16
2.2.2. Données climatiques relatives au bassin d'alimentation.....	19
3. Simulation des systèmes karstiques.....	23
3.1. Adaptation du code de calcul ÉROS pour la simulation des débits des bassins karstiques	23
3.1.1. Description de la nouvelle fonctionnalité de ÉROS v7.1.....	23
3.1.2. Évaluation de la nouvelle fonctionnalité de ÉROS v7.1.....	23
3.2. Analyse des résultats de simulation avec ÉROS utilisant les données SAFRAN de Précipitation, ETP et Température	25
3.2.1. Coefficients de Nash.....	25
3.2.2. Caractéristiques des débits.....	26
3.2.3. Visualisation des débits journaliers observés et simulés	27
3.3. Analyse des résultats de simulation avec ÉROS utilisant les données SURFEX de Ruissellement et de Drainage	30
3.3.1. Coefficients de Nash.....	30
3.3.2. Débit journalier maximum de l'année	31
4. Conclusions	33
5. Références bibliographiques	35

Liste des annexes

Annexe 1 Description succincte des systèmes karstiques.....	37
Annexe 2 Caractéristiques des données climatiques des systèmes karstiques.....	43
Annexe 3 Coefficients de Nash de la simulation ÉROS avec les Précipitations, ETP et Températures SAFRAN	47
Annexe 4 Débits journaliers des 23 systèmes karstiques observés et simulés avec ÉROS + données météo SAFRAN.....	51
Annexe 5 Moyennes interannuelles des débits journaliers observés et simulés avec ÉROS + météo SAFRAN pour les 365 jours de l'année	57

Annexe 6 Liste des mailles SAFRAN utilisées pour la simulation des bassins karstiques avec le code de calcul ÉROS	63
---	----

Liste des illustrations

Figure 1 – Situation des systèmes karstiques modélisés.....	12
Figure 2 – Distribution statistique de la précipitation moyenne annuelle relative aux 23 systèmes karstiques. À gauche : Pluie liquide moyenne, à droite : Précipitations neigeuses moyennes.....	20
Figure 3 – Évapotranspiration potentielle moyenne (à gauche) et température moyenne (à droite) Distribution statistique de la moyenne annuelle relative aux systèmes 23 karstiques.....	21
Figure 4 – Pourcentage moyen de précipitation neigeuse relatif aux systèmes karstiques	21
Figure 5 – Débit journalier de la source du Doubs à Mouthe observé et simulé. Simulation : en haut : avec ÉROS v6.0 ; en bas avec ÉROS v7.1 adapté aux karsts.	24
Figure 6 – Débit journalier des Fontaineux (système de Gervanne) observé et simulé. Simulation : en haut : avec ÉROS v6.0 ; en bas avec ÉROS v7.1 adapté aux karsts..	24
Figure 7 – Simulation ÉROS des 23 bassins karstiques avec la Météo SAFRAN. Coefficients de Nash sur la racine carrée du débit et sur le logarithme du débit.	25
Figure 8 – Simulation ÉROS des 23 bassins karstiques avec la Météo SAFRAN. Coefficients de Nash sur le débit naturel	26
Figure 9 – Simulation ÉROS des 23 bassins karstiques avec la Météo SAFRAN. Comparaison des valeurs observées et simulées. À gauche moyenne du débit mensuel minimal de l'année, à droite moyenne du débit mensuel maximal de l'année.	26
Figure 10 – Simulation ÉROS des 23 bassins karstiques avec la Météo SAFRAN. Comparaison des valeurs observées et simulées. À gauche moyenne du débit journalier maximal de l'année, à droite écart-type du débit journalier.	27
Figure 11 – Racine carrée des débits journaliers observés et simulés avec ÉROS + Météo SAFRAN de 2002 à 2010. Exemple de 6 bassins (Baget, Fontaineux, Source de la Loue, Sorgues à Cornu, Fontaine de Nîmes, Fontaine de Vaucluse).	28
Figure 12 – Valeurs moyennes interannuelles du débit et de son écart-type des 365 jours de l'année. Observations et simulation avec ÉROS + Météo SAFRAN. Exemple des bassins : Baget, Fontaineux, Source de la Loue, Sorgues à Cornu.	29
Figure 13 – Valeurs moyennes interannuelles du débit et de son écart-type des 365 jours de l'année. Observations et simulation avec ÉROS + Météo SAFRAN. Exemple des bassins : Fontaine de Nîmes et Fontaine de Vaucluse.	30
Figure 14 – Coefficients de Nash sur les simulation ÉROS des 23 bassins karstiques. Comparaison des résultats obtenus avec les données SURFEX-2015 et les données SAFRAN-2017.....	31
Figure 15 – Simulation ÉROS de la moyenne du débit journalier maximal de l'année des 23 bassins karstiques. À gauche données météo SAFRAN-2017, à droite données SURFEX-2015.....	31
Figure 16 – Racine carrée des débits journaliers observés et simulés avec ÉROS + Météo SAFRAN de 2002 à 2010. Bassins n°1 à n°5 : Aliou, Baget, Fontestorbes, Fontaineux, Gillardes.	53
Figure 17 – Racine carrée des débits journaliers observés et simulés avec ÉROS + Météo SAFRAN de 2002 à 2010. Bassins n°6 à n°11 : Groin, Lison, Archiane, Bèze, Doubs, Fontaine de Vaucluse.	54

Figure 18 – Racine carrée des débits journaliers observés et simulés avec ÉROS + Météo SAFRAN de 2002 à 2010. Bassins n°12 à n°17 : Foux-la-Vis, Loue, Sorgues, Touvre, Boundoulaou, Cent-Fonts.	55
Figure 19 – Racine carrée des débits journaliers observés et simulés avec ÉROS + Météo SAFRAN de 2002 à 2010. Bassins n°18 à n°23 : Cernon, Durzon, Espérelle, Homède, Mouline, Fontaine de Nîmes.	56
Figure 20 – Moyennes interannuelles des débits journaliers observés et simulés avec ÉROS + données météo SAFRAN. Bassins n°1 à n°6 : Aliou, Baget, Fontestorbes, Fontaigneux, Gillardes, Groin-Artemare.	59
Figure 21 – Moyennes interannuelles des débits journaliers observés et simulés avec ÉROS + données météo SAFRAN. Bassins n°7 à n°14 : Lison, Archiane, Bèze, Doubs, Fontaine de Vaucluse, Foux-la-Vis, Loue, Sorgues.	60
Figure 22 – Moyennes interannuelles des débits journaliers observés et simulés avec ÉROS + données météo SAFRAN. Bassins n°15 à n°22 : Touvre, Boundoulaou, Cent-Fonts, Cernon, Durzon, Espérelle, Homède, Mouline.	61
Figure 23 – Moyennes interannuelles des débits journaliers observés et simulés avec ÉROS + données météo SAFRAN. Bassin n°23 : Fontaine de Nîmes.	62

Liste des Tableaux

Tableau 1 – Caractéristiques des systèmes karstiques : Longitude, Latitude, Département etc.	13
Tableau 2 – Caractéristiques des systèmes karstiques : Coordonnées Lambert 2 étendu, superficie.	14
Tableau 3 – Caractéristiques des systèmes karstiques : Période d'observation des débits	15
Tableau 4 – Caractéristiques statistiques des débits des systèmes karstiques	18
Tableau 5 – Caractéristiques des données climatiques des systèmes karstiques	45
Tableau 6 – Coefficients de Nash de la simulation ÉROS avec les données climatiques SAFRAN	49

1. Introduction

Le projet de recherche Aquif-FR (Habets et al., 2015) a pour objet la modélisation discrétisée des principaux systèmes aquifères de la France métropolitaine.

Ce projet, initié par l'AFB (Agence Française pour la Biodiversité) en 2014, est coordonné par l'UMR Métis (UPMC). Il regroupe des chercheurs et ingénieurs de différentes disciplines : des hydrogéologues (BRGM, Mines-Paris Tech, UMR Métis, LHYGES et Géosciences Rennes), des numériciens (CERFACS) et des prévisionnistes spécialistes des échanges surface-atmosphère (Météo-France).

Dans le cadre du projet de recherche les débits journaliers de 23 systèmes karstiques français ont été modélisés avec le code de calcul ÉROS (Thiéry and Moutzopoulos, 1992 ; Thiéry, 2018) du BRGM.

Chaque système a été modélisé indépendamment par une modélisation globale pluie – débit selon le schéma GARDÉNIA (Thiéry, 2009, 2013, 2014, 2015a) utilisé par le code de calcul ÉROS.

Bien que le code de calcul ÉROS soit conçu pour modéliser avec une approche spatialisée semi-globale des bassins versants organisés en sous-bassins, il est également possible de modéliser des bassins versants indépendants. L'intérêt d'utiliser ÉROS est alors de permettre facilement la modélisation simultanée d'un grand nombre de bassins.

Dans chaque bassin (ou sous-bassin), à partir de la séquence des données météorologiques (précipitations, évapotranspiration potentielle, température) sur le bassin d'alimentation, un modèle hydroclimatique global GARDÉNIA permet de calculer le débit du cours d'eau (ou de la source) à l'exutoire du bassin.

L'accumulation et la fonte de la neige sont prises en compte dans les bassins concernés.

Le schéma GARDÉNIA qui simule chaque sous-bassin de ÉROS est un modèle hydroclimatique global à réservoirs. Il simule les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin versant (pluie, évapotranspiration, infiltration, écoulement) par des lois physiques simplifiées. Ces lois physiques simplifiées correspondent à un écoulement à travers une succession de réservoirs.

Des informations détaillées sur le codes de calcul GARDÉNIA et ÉROS du BRGM sont disponibles respectivement sur le site : <http://gardenia.brgm.fr/> et sur le site : <http://eros.brgm.fr/> (en construction ouverture prévue mi 2018)

2. Systèmes karstiques modélisés

Les débits journaliers de 23 systèmes karstiques ont été modélisés indépendamment. Ces systèmes karstiques sont les suivants :

- La source d'Aliou [La Gouarège à Cazavet] (O0525010)
- Le Baget à Las Hountas [Le Lachein à Balaguères] (O0485110)
- La source de Fontestorbes [L'Hers à Bélesta] (O1432930)
- La résurgence des Fontaigneux à Beaufort-sur-Gervanne (V4275910)
- La source des Gillardes La Souloise
- Le Groin à Artemare [Cerveyrieu] (V1425010)
- Le Lison à Nans-sous-Sainte-Anne (seul, sans la Sarrazine) (U2615820)
- L'Archiane à Treschenu (V4226020)
- La source de Bèze à Bèze [Ferme de Rome] (U1115020)
- La source du Doubs à Mouthe (U2002010)
- La Fontaine de Vaucluse. La Sorgue [Sorgomètre] (V6155010)
- La Foux de la Vis à Blandas (Y2035020)
- La source de la Loue à Mouthier-Haute-Pierre
- La Sorgues à Cornus [aval pisciculture] (O3564620)
- Résurgence de la Touvre à Gond-Pontouvre [Foulpougne] (R2335050)
- Boundoulaou [Ruisseau de Saint Martin à Creissels] (Larzac) (O3405210)
- Les Cent Fonts
- Le Cernon à Sainte-Eulalie-de-Cernon [terrain de Football] (Larzac) (O3414010)
- Le Durzon à Nant [Le ruisseau du Mas de Pomier] (Larzac) (O3335010)
- L'Espérelle à la Roque-Sainte-Marguerite (Larzac) (O3395010)
- Le ru de l'Homède à Creissels (Larzac) (O3405610)
- La Mouline [Ru de la pisciculture de la Mo à Lapanouse-de-Cernon] (Larzac) (O3416810)
- La Fontaine de Nîmes

Le code qui apparaît après le nom du système karstique est l'« Indice hydrométrique national » de la station de mesures hydrométriques. Pour certains systèmes karstiques, dont les mesures de débits ne sont pas centralisées dans la « Banque Hydro », il n'y a pas de code Hydro indiqué : Gillardes (EDF), Loue (EDF), Lison (DREAL), Cent-Fonts, Fontaine de Nîmes (BRGM).

Une courte [description en quelques lignes de chaque système karstique](#) est donnée en Annexe°1.

La Figure 1 montre la situation géographique des systèmes karstiques.

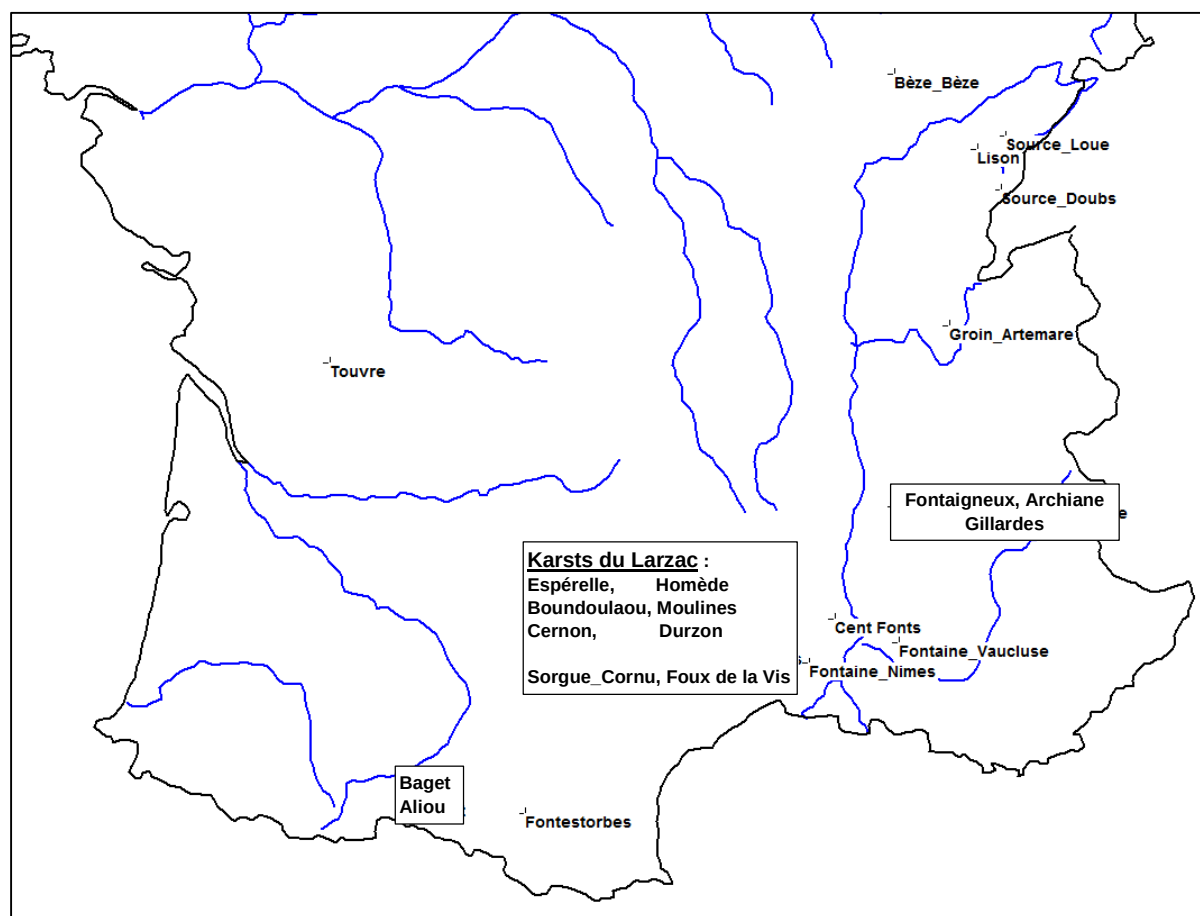


Figure 1 – Situation des systèmes karstiques modélisés

2.1. Caractéristiques des systèmes karstiques

Un certain nombre de caractéristiques des systèmes karstiques sont résumées dans les Tableau 1 à Tableau 4.

Le Tableau 1 donne la [longitude et la latitude de l'exutoire](#), l'altitude, le nom du département et le nombre d'années (équivalentes) d'observations de chaque système karstique.

Le Tableau 2 donne les [coordonnées Lambert 2](#) étendu de l'exutoire de chaque système karstique, ainsi que la [superficie approximative](#) de son bassin versant.

La moyenne géométrique de la superficie des bassins versants est égale à 99 km². 80 % des systèmes ont une superficie de bassin versant approximative comprise entre 20 km² et 300 km².

Le Tableau 3 donne [l'année de début d'observation et l'année de fin d'observation](#) de chaque système karstique.

Plus bas, le Tableau 4 donne des [caractéristiques statistiques des débits](#) de chaque système karstique.

Tableau 1 – Caractéristiques des systèmes karstiques : Longitude, Latitude, Département etc.

Nom du système karstique	Longitude (degrés)	Latitude (degrés)	Altitude Approx (m)	Département.	Nombre d'observ.	Nombre d'années
L'Aliou	1.05	42.99	441	Ariège	16549	45.3
Le Baget	1.03	42.95	481	Ariège	16328	44.7
Fontestorbes	1.93	42.89	100	Ariège	17846	48.9
Fontaigneux	5.16	44.8	307	Drôme	16406	44.9
Les Gillardes La Souloise	5.84	44.77		Isère	16436	45.0
Le Groin à Artemare	5.69	45.89	243	Ain	19349	53.0
Le Lison	5.99	46.97	400	Doubs	13253	36.3
L'Archiane à Treschenu	5.5	44.75	730	Drôme	1709	4.7
Bèze à Bèze	5.27	47.5	201	Côte-d'Or	12015	32.9
La source du Doubs	6.2	46.7	945	Doubs	12416	34.0
La Fontaine de Vaucluse	5.12	43.92	105	Vaucluse	8766	24
La Foux de la Vis Blandas	3.49	43.9	335	Gard	3057	8.4
La source de la Loue à Mouthier	6.28	47.04	564	Doubs	6853	18.8
La Sorgues à Cornus	3.2	43.88	560	Aveyron	4292	11.8
La Touvre	0.25	45.66	31	Charente	11317	31.0
Boundoulaou	3.042	44.07	390	Aveyron	5700	15.6
Les Cent Fonts	4.59	44.08	77	Hérault	4721	12.9
Le Cernon	3.15	43.97	585	Aveyron	5700	15.6
Le Durzon	3.26	43.95	515	Aveyron	5493	15.0
L'Espérelle	3.23	44.12	390	Aveyron	5643	15.4
Ru de l'Homède	3.06	44.08	395	Aveyron	7189	19.7
La Mouline	2.12	43.99	510	Aveyron	5545	15.2
La Fontaine de Nimes	4.35	43.84	30	Gard	5013	13.7
[Moyenne]			379		9635	26.4

Tableau 2 – Caractéristiques des systèmes karstiques : Coordonnées Lambert 2 étendu, superficie.

Nom du système karstique	Numéro d'ordre	X Lambert 2 (km)	Y Lambert 2 (km)	Superficie Approx. (km ²)
L'Aliou	1	494.8	1777.2	20
Le Baget	2	493.2	1773.4	30
Fontestorbes	3	566.5	1765.5	120
Fontaigneux	4	821.8	1978.1	60
Les Gillardes La Souloise	5	881.3	1979.6	300
Le Groin à Artemare	6	860.0	2102.7	120
Le Lison	7	879.6	2224.9	180
L'Archiane à Treschenu	8	851.2	1976.4	50
Bèze à Bèze	9	821.7	2277.2	300
La source du Doubs	10	896.0	2196.7	60
La Fontaine de Vaucluse	11	824.8	1883.6	1600
La Foux de la Vis Blandas	12	692.8	1878.0	200
La source de la Loue à Mouthier	13	899.2	2233.9	300
La Sorgues à Cornus	14	668.7	1875.4	80
La Touvre	15	431.1	2077.1	800
Boundoulaou	16	657.3	1896.9	20
Les Cent Fonts	17	780.7	1900.2	100
Le Cernon	18	664.7	1886.6	15
Le Durzon	19	676.2	1888.8	120
L'Espérelle	20	669.9	1902.6	130
Ru de l'Homède	21	658.0	1897.7	20
La Mouline	22	660.2	1888.3	50
La Fontaine de Nimes	23	763.0	1869.4	60
[Moyenne géométrique]				99

Tableau 3 – Caractéristiques des systèmes karstiques : Période d'observation des débits

Nom du système	Début d'observations	Fin d'observations
L'Aliou	1969	2016
Le Baget	1968	2016
Fontestorbes	1965	2016
Fontaigneux	1969	2017
Les Gillardes La Souloise	1967	2013
Le Groin Artemare	1961	2017
Le Lison	1975	2014
L'Archiane à Treschenu	2009	2017
Le Bèze à Bèze	1981	2016
La source du Doubs	1979	2013
La Fontaine de Vaucluse	1966	2017
La Foux de la Vis Blandas	2002	2016
La source de la Loue à Mouthier	1994	2013
La Sorgues à Cornus	2000	2016
La Touvre	1980	2016
Boundoulaou	1998	2017
Les Cent Fonts	1998	2014
Le Cernon	1998	2017
Le Durzon	1998	2017
L'Espérelle	1997	2016
Ru de l'Homède	1994	2017
La Mouline	1997	2016
La Fontaine de Nimes	1999	2014
[Médiane]	1994	2016

2.2. Analyse préliminaire des systèmes karstiques

Ce paragraphe présente un certain nombre de caractéristiques des systèmes karstiques modélisés.

2.2.1. Débits observés à l'exutoire des systèmes karstiques

Les séries d'observations des débits proviennent pour la plupart de la « Banque Hydro » et sont disponibles gratuitement sur le site : <http://www.hydro.eaufrance.fr/indexd.php>.

Sur les 23 systèmes karstiques modélisés, les débits de 19 systèmes karstiques proviennent de la « Banque Hydro ». Les débits des 4 autres systèmes nous ont été transmis par l'équipe du BRGM D3E/NRE de Montpellier que nous remercions.

Les caractéristiques de la période d'observation des débits sont les suivantes

- Médiane de l'année du début des observations : 1994
- Médiane de l'année de fin des observations : 2016
- Médiane du nombre d'années de la plage d'observation : 24

Les séries des débits observés ont été représentées graphiquement en échelle arithmétique et en échelle logarithmiques pour détecter des anomalies flagrantes.

Un certain nombre de valeurs erronées ont été supprimées : par exemple :

- Des valeurs de débits brutalement égales à zéro pendant une longue période (au lieu de valeurs absentes),
- Une valeur constante de débit, à une valeur élevée, pendant plusieurs mois,
- Une série linéaire joignant visiblement le début et la fin d'une longue période de manque de données.

Ces valeurs erronées n'ont pas été estimées par une méthode d'interpolation subjective. Comme le code de calcul ÉROS le permet, elles ont été mises égales à la valeur de débits absents.

La variabilité des débits dépend beaucoup des systèmes karstiques. Pour chaque système nous avons calculé :

- Le débit moyen : noté « Moy ».
- La moyenne du « débit moyen mensuel minimal de chaque année » : MenMn.
- La moyenne du « débit moyen mensuel maximal de chaque année » : MenMx.
- La moyenne du « débit journalier maximal de chaque année » : JouMx.

Nous avons alors caractérisé la variabilité de chaque bassin par les indicateurs suivants :

- Le ratio (exprimé en pourcentage) « %_Men_Min/Moy » du débit mensuel minimal de l'année au débit moyen : $\text{MenMn} / \text{Moy}$.
Ce ratio caractérise les bassins ayant de faibles débits mensuels.
- Le ratio « Men_Max/Moy » du débit mensuel maximal de l'année au débit moyen : $\text{MenMx} / \text{Moy}$.
Ce ratio caractérise les bassins ayant de forts débits.
- Le ratio « Jou_Max/Moy » du débit Journalier maximal de l'année au débit moyen : $\text{JouMx} / \text{Moy}$.
Ce ratio caractérise les bassins ayant de fortes pointes de débit journalier.

Les [indicateurs statistiques de débits de chaque bassin](#) sont rassemblés dans le Tableau 4.

Ces indicateurs ont permis de regrouper les bassins ayant des caractéristiques comparables :

Les systèmes karstiques « réguliers ».

Les systèmes les plus réguliers sont :

- La source de la Loue, la Touvre, le Durzon, la Mouline

Pour ces systèmes, le débit mensuel minimal de l'année dépasse 42 % du débit moyen et le débit mensuel maximal est inférieur à 2 fois le débit moyen (et même inférieur à 1.5 fois pour la Mouline).

Les systèmes ayant les plus faibles ratios de débit journalier maximal de l'année sont :

- Les Fontaigneux, Le Bèze, la Fontaine de Vaucluse et la Touvre.

Leur débit journalier maximal est inférieur à 3.3 fois le débit moyen, ce qui est très faible.

Les systèmes karstiques « irréguliers ».

Les systèmes ayant les plus faibles débits mensuels minimaux de l'année sont :

- L'Aliou, Le Groin à Artémare et la Fontaine de Nîmes.

Leur débit mensuel minimal de l'année ne dépasse pas 10 % du débit moyen. Ils ont donc très peu de réserves.

Les systèmes ayant les plus forts débits journaliers maximaux de l'année sont :

- L'Aliou, Le Baget et la Fontaine de Nîmes.

Leur débit journalier maximal de l'année dépasse 12 fois le débit moyen. Ils présentent de très fortes pointes de crue journalière.

Tableau 4 – Caractéristiques statistiques des débits des systèmes karstiques

Nom du système	Débit Mensuel Minimal / Débit moyen (%)	Débit Mensuel Maximal / Débit moyen (-)	Débit Journalier Maximal / Débit moyen (-)	Débit Mensuel Maxi / Mensuel Mini (-)
L'Aliou	10	2.7	17.5	26.4
Le Baget	19	2.7	12.1	14.1
Fontestorbes	40	2.0	4.7	5.1
Fontaigneux	35	1.6	1.9	4.5
Les Gillardes La Souloise	26	2.6	6.6	10.2
Le Groin à Artemare	4.2	3.0	11.5	70.3
Le Lison	19	2.3	6.4	12.3
L'Archiane à Treschenu	22	2.7	8.7	12.2
Le Bèze à Bèze	39	2.2	3.4	5.7
La source du Doubs	27	2.2	5.6	8.0
La Fontaine de Vaucluse	36	2.2	3.3	6.2
La Foux de la Vis Blandas	36	2.3	11.1	6.6
La source de la Loue à Mouthier	42	2.0	5.2	4.7
La Sorgues à Cornus	54	2.2	10.7	4.1
La Touvre	49	1.6	2.1	3.2
Boundoulaou	33	2.3	6.8	7.1
Les Cent Fonts	29	2.8	9.9	9.8
Le Cernon	44	2.1	8.1	4.7
Le Durzon	61	1.8	4.7	3.0
L'Espérelle	20	2.7	10.8	13.2
Ru de l'Homède	24	2.6	7.7	10.9
La Mouline	59	1.5	4.3	2.6
La Fontaine de Nimes	8.5	3.5	16.3	40.7
[Moyenne]	32	2.33	7.8	12.4

2.2.2. Données climatiques relatives au bassin d'alimentation

Les données utilisées pour la modélisation sont les données SAFRAN de Météo France, au pas de temps journalier, qui nous ont été fournies par Météo France. Ce sont les données de :

- Pluie liquide,
- Neige (équivalent en eau des précipitations neigeuses),
- Évapotranspiration potentielle,
- Température de l'air moyenne.

Ces données sont disponibles sur un ensemble de 9892 mailles de 8 km de côté (superficie de 64 km²) couvrant toute la France métropolitaine.

Les données utilisées sont celles la version SAFRAN **version Novembre 2017**. Cette précision est importante puisqu'une comparaison avec les données de SAFRAN qui nous avait été transmise fin 2015 montre des différences importantes :

En particulier l'évapotranspiration potentielle fournie avec la version 2017 est significativement plus forte que celle de la version 2015. L'ETP moyennée sur chaque bassin versant montre les différences suivantes :

- Médiane de la différence v2017 - v2015 = +73 mm/an
- Médiane de l'accroissement en pourcentage v2017 - v2015 = +9 % (20 % des bassins présentent un écart supérieur à +12 %)

Des essais de modélisation en utilisant les données de « Ruissellement » et de « Drainage », calculées sur les mêmes mailles avec la plateforme SURFEX de Météo France, ont donné des résultats significativement moins bons sur la majorité des bassins, comme on le montrera plus bas.

Le bassin d'alimentation de chaque système karstique a été déterminé à partir de différentes sources d'information, en particulier à partir du site de l'« Équipe Hydrologie des Bassins Versants » de l'IRSTEA (Accès Avril 2018) :

<https://webgr.irstea.fr/activites/base-de-donnees/>

et

<https://webgr.irstea.fr/activites/base-de-donnes-22/>

Le premier lien concerne 2803 bassins versants dont le code Hydrométrique National commence par les lettres **A** à **P**.

Le deuxième lien concerne 1463 bassins versants dont le code Hydrométrique National commence par les lettres **P** à **Z**.

Ces sites donnent les coordonnées de la station hydrométrique, son altitude et un tracé (approximatif) du bassin versant de surface. Les superficies des bassins versants doivent cependant être analysées avec soin, car elles concernent uniquement le bassin versant de surface. Par exemple pour la Fontaine de Vaucluse, dont la superficie du bassin d'alimentation est estimée entre environ 1300 km² et 1500 km² (Bonnet et al., 1976), la superficie indiquée dans la base de données est de 3.4 km². Pour le Bèze (bassin d'alimentation d'environ 200 km² la superficie indiquée dans la base de données est de 33 km².

Pour les petits systèmes karstiques ayant un bassin versant de l'ordre de 20 km² à 70 km², on a simplement utilisé la Maille SAFRAN qui contient la majorité du bassin versant. Pour les plus grands bassins, les mailles SAFRAN concernées par le bassin versant ont été utilisées, avec une pondération égale à la superficie du bassin versant située dans la maille.

La [liste des mailles SAFRAN, avec leurs pondérations](#), attribuées à chaque bassin est donnée en [Annexe 6](#).

Les caractéristiques des données climatiques des 23 systèmes karstiques sont les suivantes :

- Pluie annuelle : Médiane = **1060** mm/an.
(De 748 mm/an pour la Fontaine de Nîmes, à 1570 mm/an pour la Foux de la Vis).
- Précipitation neigeuse annuelle : Médiane = **78** mm/an.
(De 8 mm/an pour la Fontaine de Nîmes, à **450** mm/an pour l'Archiane et la source du Doubs).
- Pourcentage de précipitations neigeuses : Médiane = **7** %.
(De 1 % pour la Fontaine de Nîmes, à **35** % pour Les Gillardes).
- Température moyenne : Médiane = **9.6** °C
(De 5.0 °C pour Les Gillardes, à **14.0** °C pour la Fontaine de Nîmes).
- Évapotranspiration potentielle annuelle : Médiane = 860 mm/an.
(De 670 mm/an pour le Groin d'Artémare, à **1158** mm/an pour la Fontaine de Nîmes).

Les Figure 2 à Figure 4 montrent les distributions statistiques des précipitations, évapotranspiration potentielle et température des 23 systèmes karstiques.

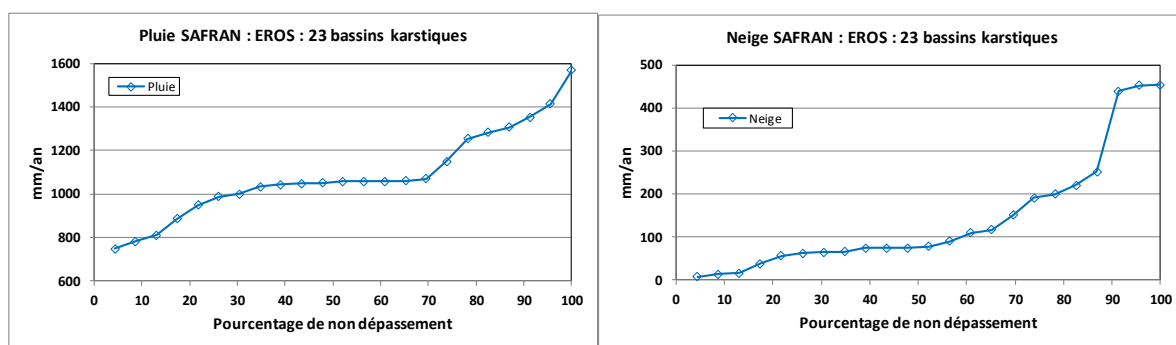


Figure 2 – Distribution statistique de la précipitation moyenne annuelle relative aux 23 systèmes karstiques. À gauche : Pluie liquide moyenne, à droite : Précipitations neigeuses moyennes.

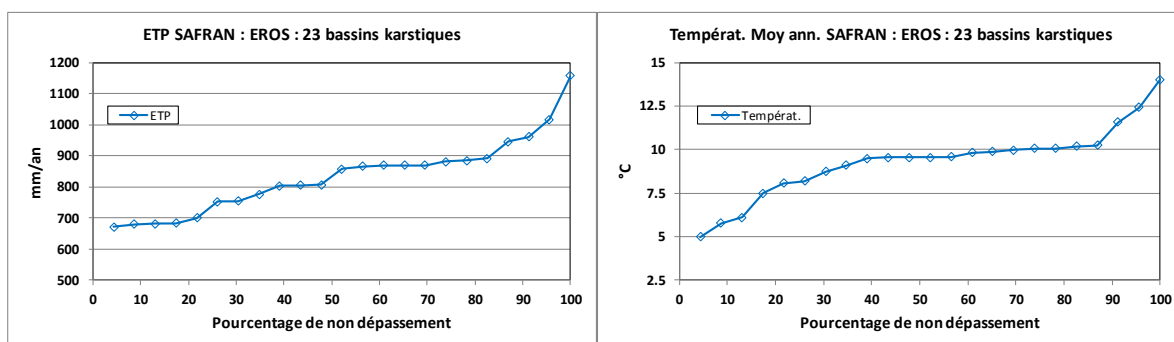


Figure 3 – Évapotranspiration potentielle moyenne (à gauche) et température moyenne (à droite)
Distribution statistique de la moyenne annuelle relative aux systèmes 23 karstiques

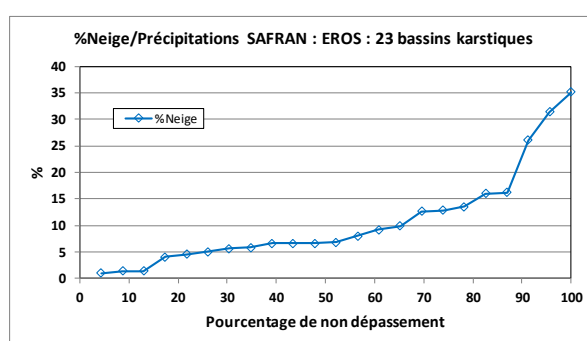


Figure 4 – Pourcentage moyen de précipitation neigeuse relatif aux systèmes karstiques

Le Tableau 5, placé en Annexe 2, présente les valeurs des [caractéristiques climatiques moyennes annuelles relatives à chaque bassin](#).

3. Simulation des systèmes karstiques

Bien qu'ils soient indépendants, dans un souci d'efficacité les 23 systèmes karstiques ont été modélisés simultanément. La période de simulation choisie couvre 54 ans du : 1^{er} Août 1960 au 31 Juillet 2014.

La période d'initialisation a été fixée à 1 année, donc l'année hydrologique 1960-1961.

3.1. Adaptation du code de calcul ÉROS pour la simulation des débits des bassins karstiques

3.1.1. Description de la nouvelle fonctionnalité de ÉROS v7.1

Les premiers essais d'utilisation du code de calcul ÉROS v6.0 ont montré des difficultés pour simuler les débits journaliers de certains systèmes karstiques. En réaction à de forts épisodes de pluie, la simulation présentait de très fortes pointes de débit qui n'apparaissaient pas dans les séries observées. Une nouvelle version a alors été élaborée : ÉROS v7.1 (Thiéry, 2018) avec de nouvelles fonctionnalités pour permettre une meilleure simulation des systèmes karstiques. Un seuil de ruissellement a été introduit. Il permet selon les cas de diriger l'excédent de débit vers l'extérieur du système (le karst ne pouvant pas absorber ces forts épisodes de pluie efficace), ou bien d'infiltrer rapidement cet excédent vers la composante souterraine (alimentation rapide par des lapiaz par exemple). Cette nouvelle fonctionnalité a également été introduite dans GARDÉNIA v8.6

3.1.2. Évaluation de la nouvelle fonctionnalité de ÉROS v7.1

La nouvelle fonctionnalité de ÉROS v7.1 a été évaluée en comparant les débits simulés des systèmes karstiques avec les débits simulés obtenus avec la version antérieure.

Il apparait que la nouvelle fonctionnalité de ÉROS v7.1 permet de simuler correctement les systèmes karstiques qui étaient mal simulés.

À titre d'exemple, la Figure 5 compare les simulations du débit journalier de la source du Doubs à Mouthe et la Figure 6 compare les simulations du débit journalier de la source du système des Fontaineux (Gervanne). On voit nettement que dans ces deux cas, les fortes pointes de débit simulées anormalement ont disparu avec ÉROS v7.1.

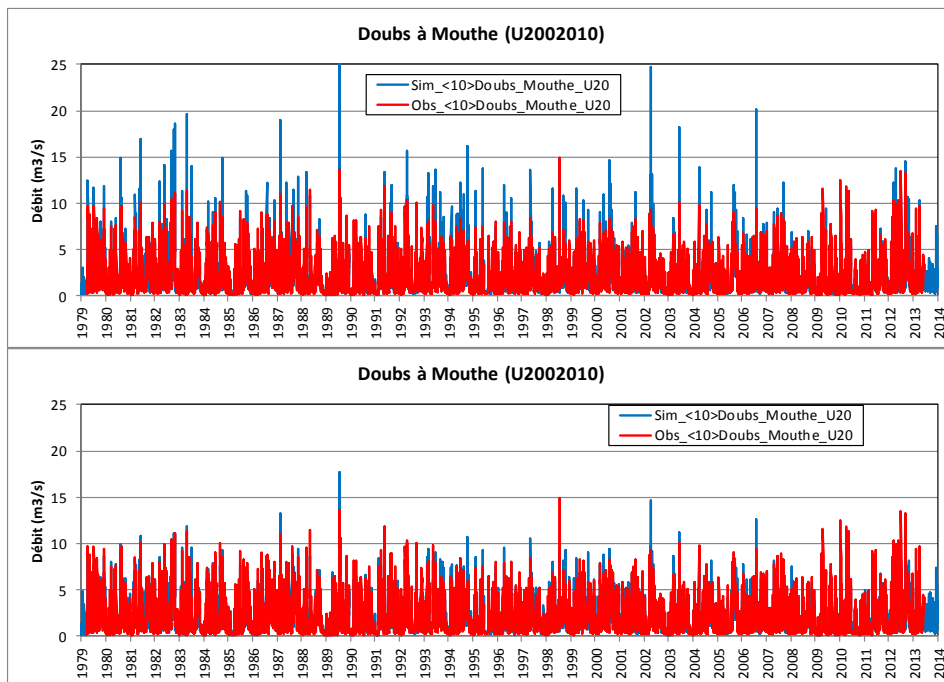


Figure 5 – Débit journalier de la source du Doubs à Mouthe observé et simulé.
Simulation : en haut : avec ÉROS v6.0 ; en bas avec ÉROS v7.1 adapté aux karsts.

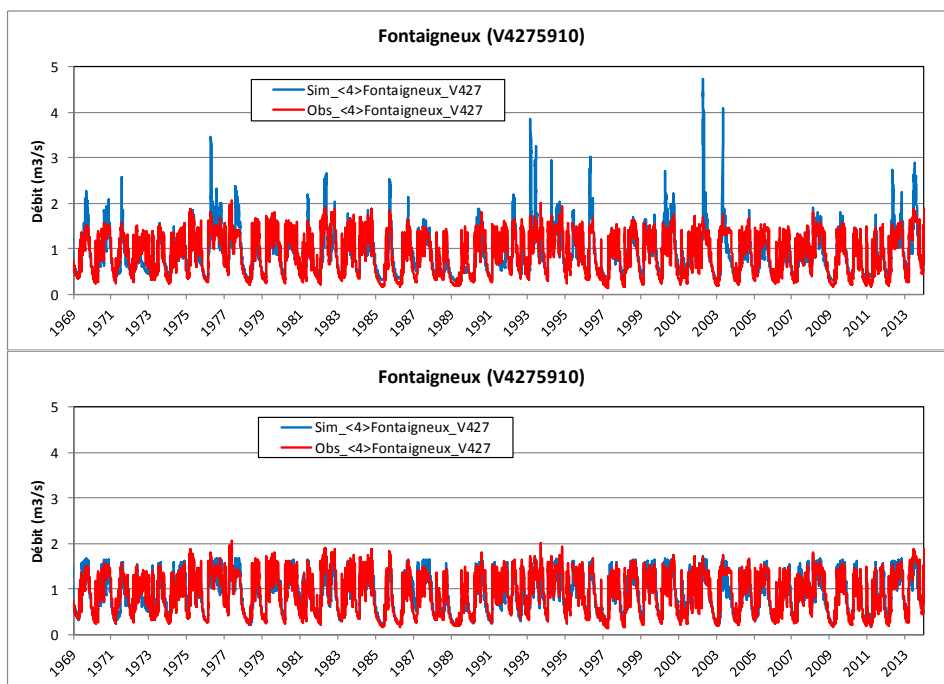


Figure 6 – Débit journalier des Fontaineux (système de Gervanne) observé et simulé.
Simulation : en haut : avec ÉROS v6.0 ; en bas avec ÉROS v7.1 adapté aux karsts..

3.2. Analyse des résultats de simulation avec ÉROS utilisant les données SAFRAN de Précipitation, ETP et Température

3.2.1. Coefficients de Nash

La Figure 7 et la Figure 8 présentent la distribution statistique des coefficients de Nash (Nash & Sutcliffe, 1970) relatifs à la simulation des 23 bassins karstiques.

Sur la Figure 7 sont représentés les coefficients de Nash calculés sur la racine carrée des débits et calculés sur le logarithme des débits. La transformation « racine carrée » donne davantage d'importance aux débits moyens et la transformation « logarithme » donne davantage d'importance aux plus faibles débits. On voit que 80 % des bassins ont un coefficient de Nash supérieur à 0.80 ce qui caractérise une très bonne simulation de débits moyens et faibles.

La Figure 8 présente les coefficients de Nash calculés sur les débits non transformés, ce qui donne davantage d'importance aux forts débits. On voit que 80 % des bassins ont un coefficient de Nash supérieur à 0.76 ce qui caractérise une bonne simulation des forts débits.

Le Tableau 6, placé en Annexe 3, présente les [coefficients de Nash de chaque système karstique](#).

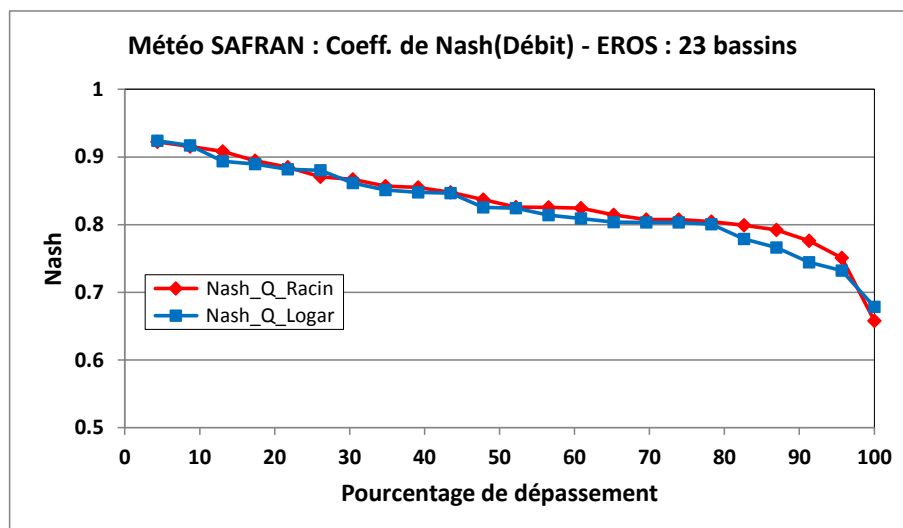


Figure 7 – Simulation ÉROS des 23 bassins karstiques avec la Météo SAFRAN. Coefficients de Nash sur la racine carrée du débit et sur le logarithme du débit.

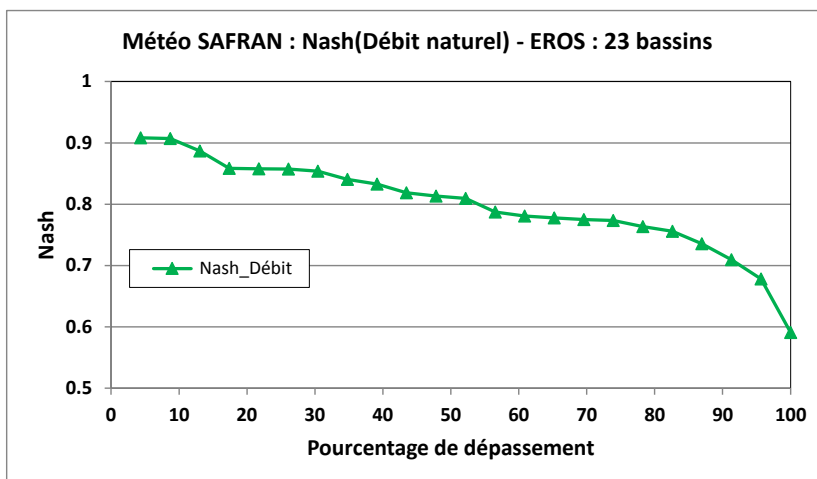


Figure 8 – Simulation ÉROS des 23 bassins karstiques avec la Météo SAFRAN.
Coefficients de Nash sur le débit naturel

3.2.2. Caractéristiques des débits

Pour avoir des caractéristiques indépendantes de la superficie du bassin versant, et donc comparables d'un bassin à un autre, nous avons exprimé ces caractéristiques en L/s/km².

La Figure 9 montre pour chacun des 23 bassins la simulation de la moyenne du « débit mensuel minimal de l'année » et la simulation de la moyenne du « débit mensuel maximal de l'année ». On voit que ces caractéristiques sont bien simulées. Les coefficients de Nash sur la simulation de ces débits caractéristiques sont égaux respectivement à 0.97 et 0.98.

La Figure 10 montre pour chacun des 23 bassins la simulation de la moyenne du « débit journalier maximal de l'année » (coefficient de Nash = 0.93) et la simulation de l'« écart-type du débit journalier » (coefficient de Nash = 0.95). Ceci montre que les forts débits sont bien simulés et la variabilité des débits est bien simulée.

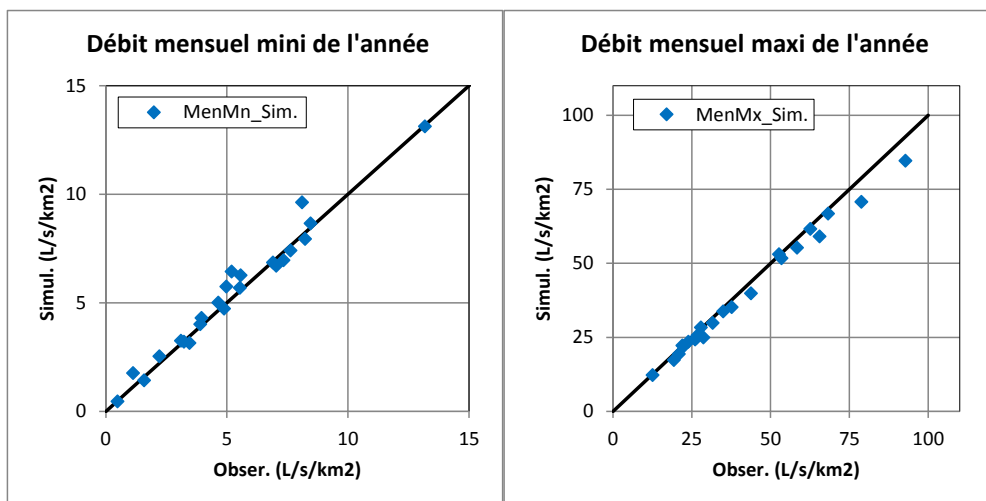


Figure 9 – Simulation ÉROS des 23 bassins karstiques avec la Météo SAFRAN.
Comparaison des valeurs observées et simulées.

À gauche moyenne du débit mensuel minimal de l'année, à droite moyenne du débit mensuel maximal de l'année.

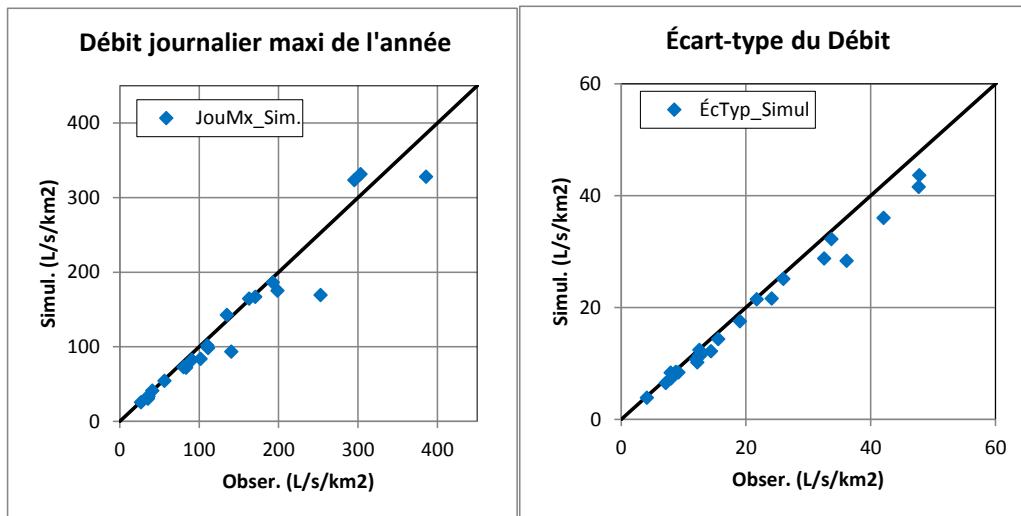


Figure 10 – Simulation ÉROS des 23 bassins karstiques avec la Météo SAFRAN.

Comparaison des valeurs observées et simulées.

À gauche moyenne du débit journalier maximal de l'année, à droite écart-type du débit journalier.

3.2.3. Visualisation des débits journaliers observés et simulés

La Figure 11 présente à titre d'exemple l'évolution de la racine carrée des débits journaliers de 6 systèmes karstiques de contextes variés observés et simulés avec ÉROS + Météo SAFRAN sur la période de 2002 à 2010. Les 6 bassins présentés sont : le Baget, Fontaigneux, la source de la Loue, La Sorgues à Cornu, La Fontaine de Nîmes et Fontaine de Vaucluse.

Les [débits journaliers observés et simulés des 23 systèmes karstiques](#) sont présentés sur les Figure 16 à Figure 19 placées en Annexe 4

Les Figure 12 et Figure 13 présentent, pour ces mêmes 6 bassins, les valeurs moyennes interannuelles observées et simulées des 365 jours de l'année, ainsi que leurs écarts-types.

Les [moyennes interannuelles des débits journaliers observés et simulés des 23 systèmes karstiques](#) sont présentées sur les Figure 20 à Figure 23 placées en Annexe 5

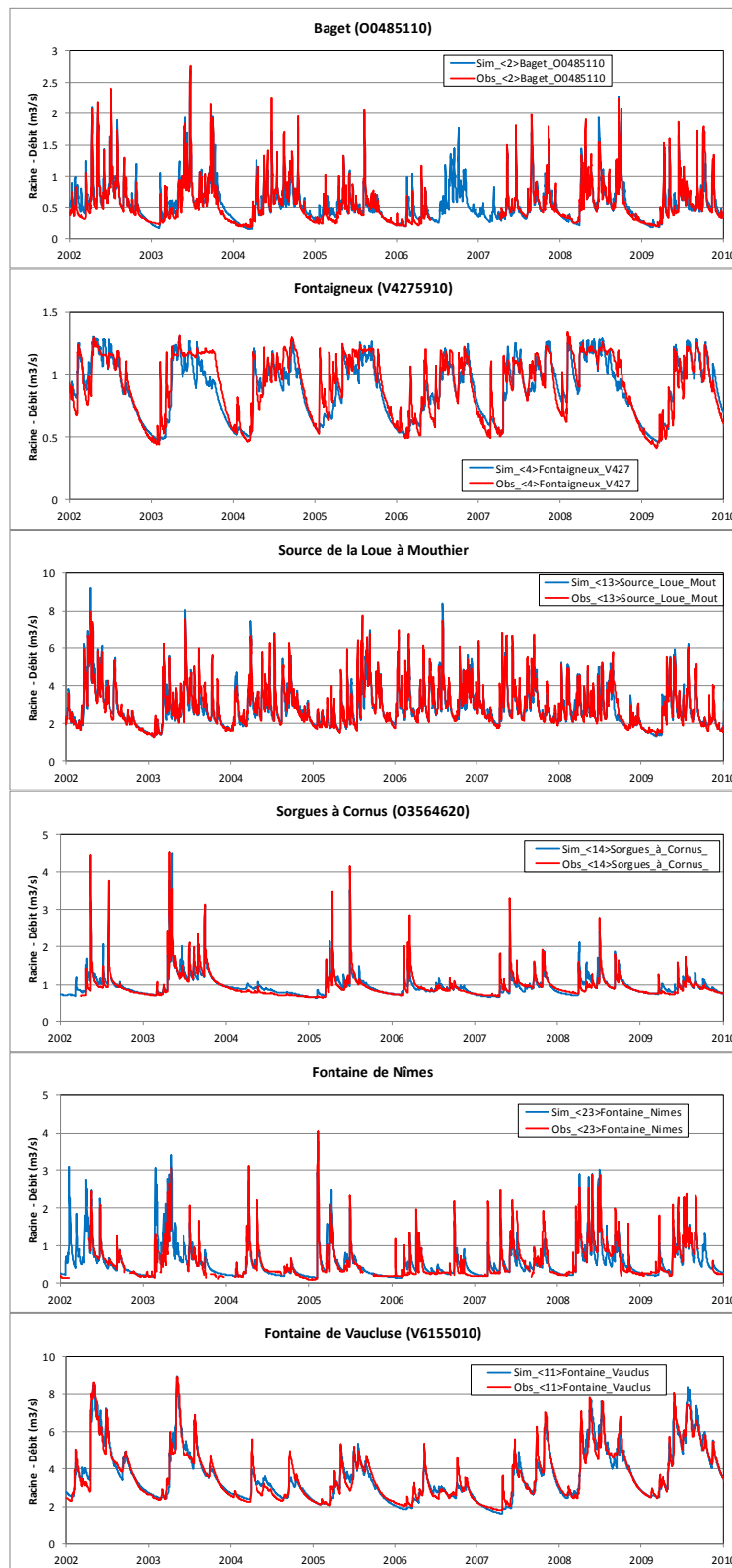


Figure 11 – Racine carrée des débits journaliers observés et simulés avec ÉROS + Météo SAFRAN de 2002 à 2010.

Exemple de 6 bassins (Baget, Fontaigneux, Source de la Loue, Sorgues à Cornu, Fontaine de Nîmes, Fontaine de Vaucluse).

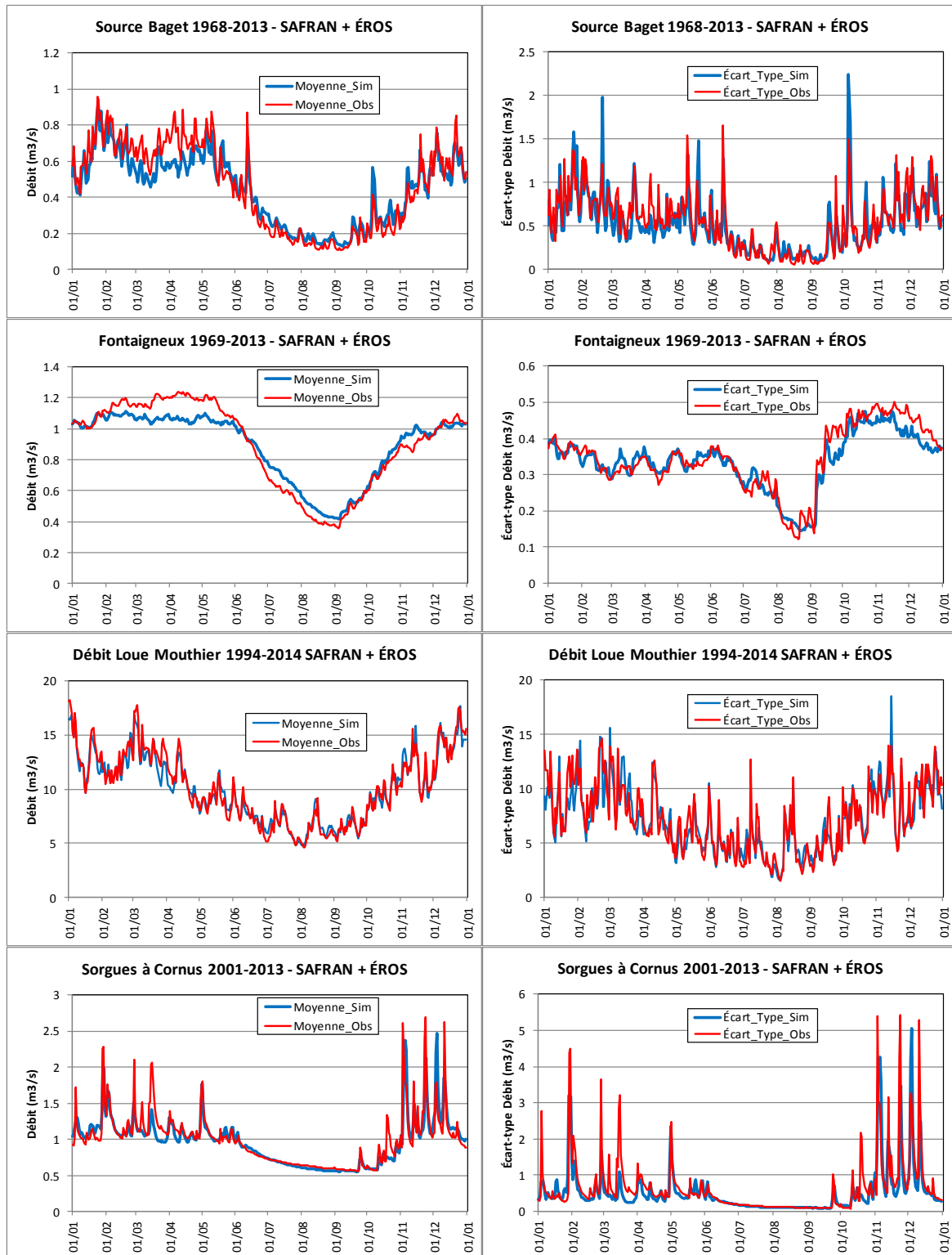


Figure 12 – Valeurs moyennes interannuelles du débit et de son écart-type des 365 jours de l'année.
Observations et simulation avec ÉROS + Météo SAFRAN.
Exemple des bassins : Baget, Fontaineux, Source de la Loue, Sorgues à Cornu.

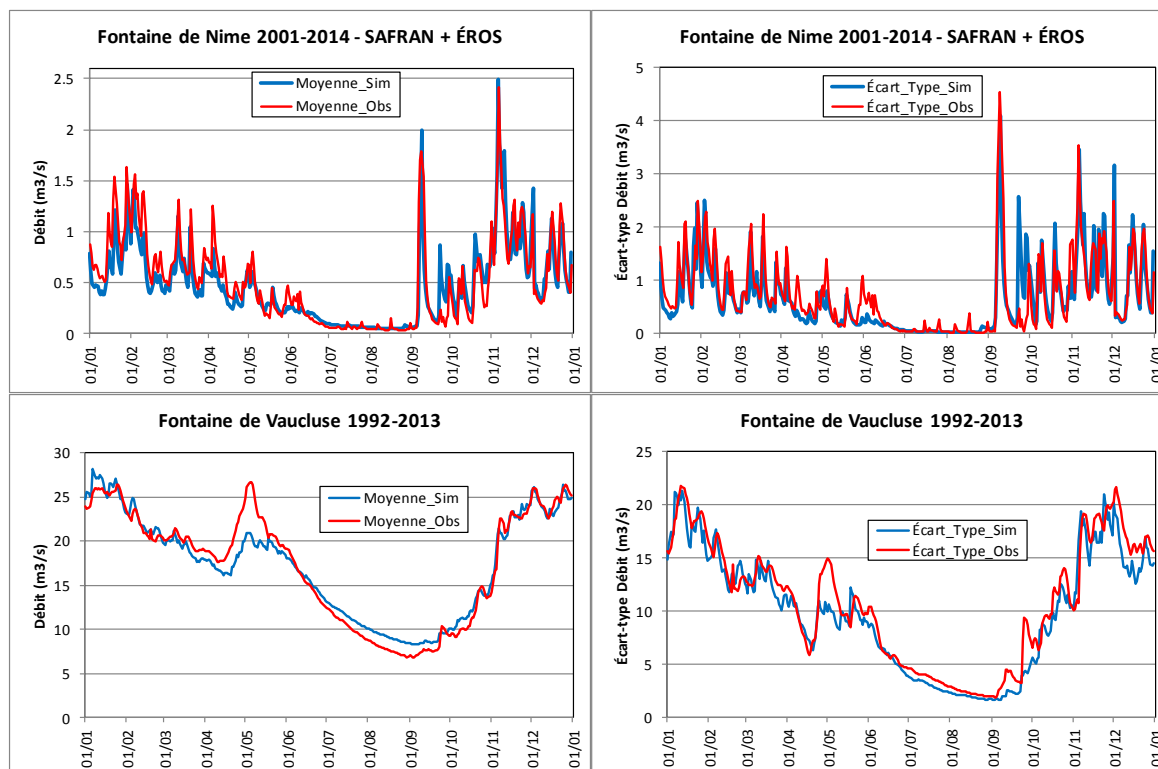


Figure 13 – Valeurs moyennes interannuelles du débit et de son écart-type des 365 jours de l'année. Observations et simulation avec ÉROS + Météo SAFRAN.
Exemple des bassins : Fontaine de Nîmes et Fontaine de Vaucluse.

3.3. Analyse des résultats de simulation avec ÉROS utilisant les données SURFEX de Ruissellement et de Drainage

À titre de comparaison on a également simulé les 23 bassins karstiques avec le code de calcul ÉROS utilisant les données de « Ruissellement » et de « Drainage » résultant de la plateforme SURFEX, version 2015, de Météo-France.

3.3.1. Coefficients de Nash

La Figure 14 montre qu'après calibration avec les données SURFEX : 80 % des coefficients de Nash sur la racine carrée des débits journaliers sont supérieurs à 0.63 au lieu de 0.80 avec les données SAFRAN. Avec les données SURFEX-2015, seuls 26 % des bassins ont un coefficient de Nash supérieur à 0.80, alors qu'il y en a 80 % avec les données SAFRAN associées avec le schéma de bilan GARDÉNIA inclus dans ÉROS.

Les résultats obtenus avec les données météorologiques SAFRAN, associées au schéma de bilan GARDÉNIA inclus dans ÉROS, sont donc significativement meilleurs que ceux obtenus avec les données SURFEX-2015.

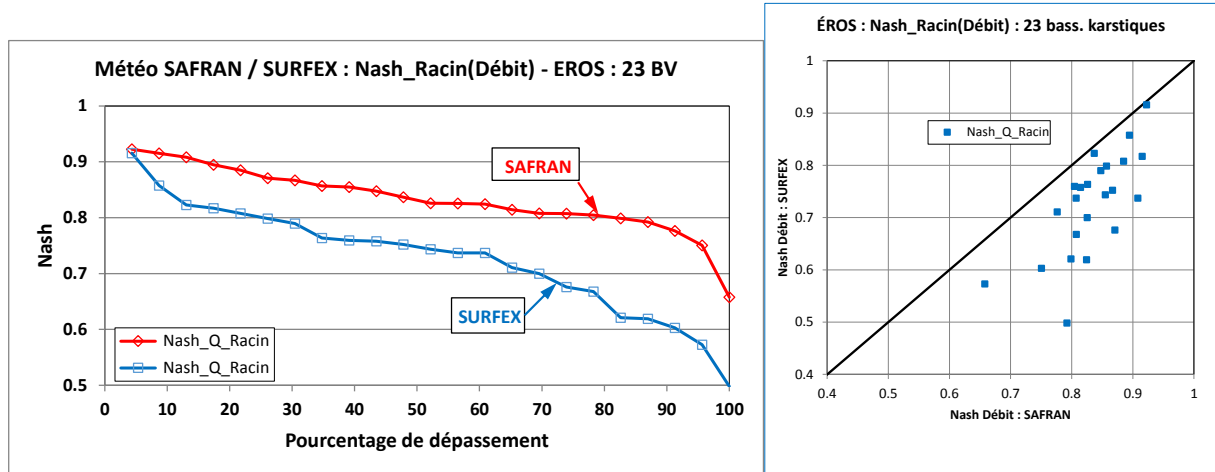


Figure 14 – Coefficients de Nash sur les simulation ÉROS des 23 bassins karstiques. Comparaison des résultats obtenus avec les données SURFEX-2015 et les données SAFRAN-2017.

3.3.2. Débit journalier maximum de l'année

La Figure 15 (partie gauche) montre que la moyenne du « débit journalier maximal de l'année » simulé avec les données SURFEX-2015 est fortement sous-estimé.

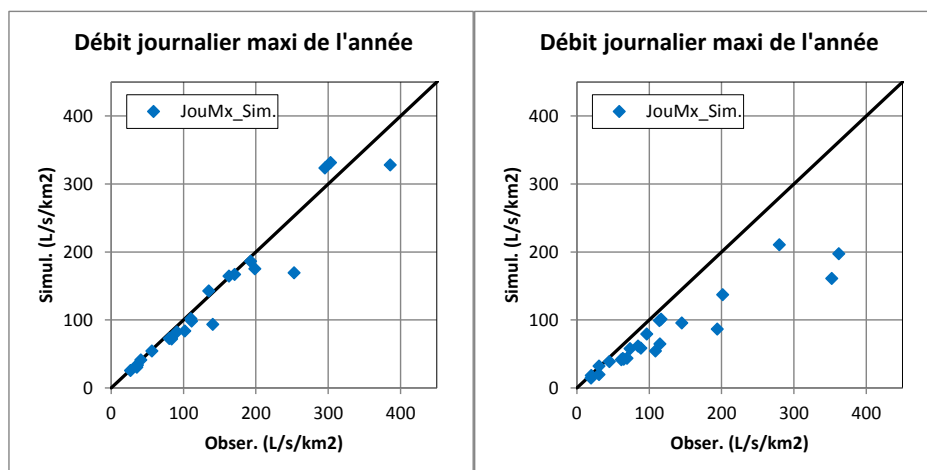


Figure 15 – Simulation ÉROS de la moyenne du débit journalier maximal de l'année des 23 bassins karstiques. À gauche données météo SAFRAN-2017, à droite données SURFEX-2015.

4. Conclusions

Les 23 bassins karstiques ont été modélisés avec succès avec les données climatiques SAFRAN-2017 (Pluie, Neige, ETP, Température). Pour 80 % des bassins, le coefficient de Nash calculé sur la racine carrée des débits journaliers est supérieur à 0.80.

Le schéma de calcul de GARDÉNIA v8.6, intégrant des effets de seuil de débordement, qui est utilisé par ÉROS, est donc tout à fait adapté à la simulation de bassins karstiques soumis à des climats variés.

Les débits d'étiages et également les débits de hautes eaux sont bien reproduits ce qui permet de garantir des prévisions fiables.

Un essai de modélisation avec les données de SURFEX-2015 (Ruissellement et Drainage) a donné des résultats significativement moins bons : Seulement 26 % des bassins (au lieu de 80 %) ont un coefficient de Nash sur la racine carrée des débits journaliers supérieur à 0.80.

5. Références bibliographiques

- Habets, F., Ackerer, P., Amraoui, N., Augeard, B., Besson, F., Caballero, Y., Dreuz J-RD., Moigne, PL., Longuevergne, L., Martin, E., Morel, T., Regimbeau, F., Rousseau M., Rousseau-Gueutin, P., Thiéry, D., Soubeyroux, J-M., Vergnes, J-P., Viennot, P. (2015) – *Aqui-FR, un système multi-modèle hydrogéologique à l'échelle nationale. Revue Géologues 2015 pp. 105–109*
[〈hal-01258469〉](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01258469)
- Bonnet, M., Margat, J., Thiéry, D. (1976) – Essai de représentation du comportement hydraulique d'un système karstique par modèle déterministe, application à la Fontaine de Vaucluse. *Ann. sci. Univ. Besançon, 3^{ème} série, fasc. 25*, p. 79-95.
- Moussu, F. (2011) - Prise en compte du fonctionnement hydrodynamique dans la modélisation pluie débit des systèmes karstiques. Thèse de l'université Pierre et Marie Curie - Paris VI (France) Spécialité Hydrologie.
- Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe (1970) - River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology, 10 (3)*, 282-290.
- Thiery, D. (2009) – Modèles à réservoirs en hydrogéologie. *in Traité d'hydraulique environnementale – Volume 4 - Modèles mathématiques en hydraulique maritime et modèles de transport*. Tanguy J.M. (Ed.) - Éditions Hermès - Lavoisier. Chapitre 7 pp. 239-249. ISBN 978-2-7462-2006-5.
- Thiery, D. (2013) - Didacticiel du code de calcul Gardénia v8.1. Vos premières modélisations. Rapport BRGM/RP-61720-FR, 130 p., 93 fig.
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-61720-FR.pdf> . (Accès Avril 2018).
- Thiery, D. (2014) - Logiciel GARDÉNIA, version 8.2. Guide d'utilisation. Rapport BRGM/RP-62797-FR, 136 p., 66 fig., 2 ann.
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-62797-FR.pdf> . (Accès Avril 2018).
- Thiery, D. (2015a) - Validation du code de calcul GARDÉNIA par modélisations physiques comparatives. Rapport BRGM/RP-64500-FR, 48 p., 28 fig.
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-64500-FR.pdf> . (Accès Avril 2018).
- Thiery, D. (2018) – Logiciel ÉROS version 7.1. Guide d'utilisation. Rapport BRGM/RP-67704-FR, 171 p., 82 fig.
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-67704-FR.pdf> (Accès Avril 2018)
- Thiery, D. et Moutzopoulos, C. (1992) – Un modèle hydrologique spatialisé pour la simulation de très grands bassins : le modèle EROS formé de grappes de modèles globaux élémentaires. VIIIèmes journées hydrologiques de l'ORSTOM « Régionalisation en hydrologie, application au développement ». *In Le Barbé et E. Servat (Ed.) ORSTOM Editions, pp. 285-295.*
<https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-01061971/document>

Annexe 1

Description succincte des systèmes karstiques

Description succincte des systèmes karstiques

On donne ici une courte description en quelques lignes de chaque système karstique. Pour une dizaine de bassins on s'est inspiré de la description donnée par Moussu (2011).

Le système d'Aliou

Le ruisseau de la Gouarège prend sa source à Cazavet, au piedmont Sud-Est du massif calcaire de l'Aliou, dans le département de l'Ariège (Pyrénées). La Grotte de l'Aliou est la résurgence d'un vaste réseau karstique, d'une superficie de l'ordre de 15 km².

Le système du Baget

Le système karstique du Baget est un petit système montagneux situé dans les Pyrénées. Son bassin d'alimentation, d'une superficie d'environ 10 à 20 km² est situé à une altitude moyenne de 900 m. La lithologie du système est constituée en grande partie par des calcaires jurassiques. La source pérenne, le Baget à Las Hountas, (« Le Lachein à Balaguères ») est située dans la vallée à une altitude de 498 m.

La source de Fontestorbes

La source de Fontestorbes (L'Hers à Bélesta) est une grosse exurgence de type vaclusien, située en Ariège dans la commune de Bélesta. La source est située dans la falaise calcaire limitant au Nord le plateau de Sault, d'où surgit une large rivière de 5 m de large. Après quelques dizaines de mètres de parcours, cette rivière se jette dans l'Hers-Vif. La superficie du bassin d'alimentation de la source est estimée à environ 100 km². Le débit présente des intermittences pendant l'étiage. Ces intermittences, d'une durée de l'ordre d'une heure, n'apparaissent pas dans les relevés de débits moyens journaliers.

Le système de Gervanne (Source des Fontaigneux)

Le système karstique de Gervanne est situé à l'extrémité sud-ouest du massif du Vercors. La lithologie du système est constituée par les formations calcaires et marno-calcaires du Barrémo-Bédoulien. La source des Fontaigneux constitue l'exutoire principal du système karstique. Elle se présente sous la forme d'une vasque peu profonde dont l'alimentation se fait apparemment au travers d'éboulis. Le bassin hydrologique a une superficie de l'ordre de 100 km².

Système des Gillardes (La Souloise)

Le système karstique est situé dans le massif du Dévoluy (département des Hautes-Alpes) où les formations du Sénonien reposent sur des formations de calcaires et marnes de l'Hauterivien. Les écoulements souterrains émergent au niveau des sources de la Petite et surtout de la Grande Gillarde qui concentrent l'essentiel des écoulements souterrains. Ces sources alimentent la rivière la Souloise, qui continue son cours vers le Nord. Les débits modélisés sont ceux de la Souloise à l'Infernet mesurés EDF, qui proviennent en très grande majorité des sources des Gillardes. Le bassin d'alimentation a une superficie estimée de l'ordre de 200 à 300 km².

Le Groin d'Artemare

Le site du Groin d'Artemare se situe sur le Bassin Versant du Séran, sur le territoire du Bugey-Valromey (Ain) dans le massif du Jura. Le Groin (l'Arvière) a profondément entaillé le relief calcaire à lapiaz. Il sort de terre sur la commune de Vieu, dans une source intermittente, avant de former un profond canyon au Pont du Diable.

Le système de la source du Lison

La source du Lison (située à 25 km de la source de la Loue), draine les calcaires du Jurassique moyen à Nans-sous-Saint-Anne (Jura). Elle draine un système karstique très développé dans le plateau du Levier situé à 700 à 800 m d'altitude qui absorbe les eaux de ruissellement de cours d'eau secondaires (en particulier le ruisseau de Château Renaud). La source de la Sarrazine (dont le débit n'a été mesuré que pendant quelques années) serait un trop-plein intermittent du système. Les débits journaliers modélisés sont ceux de la seule source du Lison à Nans-sous-Saint-Anne (station DREAL). Le bassin d'alimentation a une superficie estimée à environ 150 km².

Le système de l'Archiane

Le système karstique d'Archiane est développé dans les calcaires barrémo-bédouliens du massif du Vercors. Les formations calcaires barrémiennes qui entourent la vallée d'Archiane constituent une entité géologique homogène et bien isolée. L'exutoire principal du système est la source d'Archiane (au sud du village d'Archiane). C'est une des principales sources du Vercors. La superficie de son impluvium est de l'ordre de 50 km².

Le système de la Bèze

La source karstique de la Bèze apparaît dans la Grotte de la Crétanne à Bèze (Côte-d'Or). Elle est située à l'exutoire d'un ensemble de galeries développées dans des calcaires du Jurassique supérieur. D'une épaisseur totale de l'ordre de 40 m, ils sont disposés en bancs peu épais, et rattachés au Kimméridgien inférieur (faciès séquanien). Ils comportent des calcaires à grains fins avec intercalations argileuses. La majeure partie des eaux de Bèze provient du drainage souterrain du plateau constitué par les calcaires de l'Oxfordien supérieur et du Kimméridgien. La superficie du bassin d'alimentation est de l'ordre de 250 à 300 km².

Le système de la source du Doubs

La source du Doubs se trouve à Mouthe dans le département du Doubs dans le massif du Jura. C'est une exsurgence qui sort des calcaires portlandiens du Noirmont. Le bassin d'alimentation a une superficie d'environ 30 à 50 km².

Le système de la Fontaine de Vaucluse

La Fontaine de Vaucluse est la source karstique la plus importante en France avec un débit moyen de l'ordre de 20 m³/s. C'est le seul exutoire d'un ensemble carbonaté situé dans la Drôme au Nord, le Vaucluse à l'Ouest et les Alpes-de-Haute-Provence. Le système karstique s'est développé dans l'épaisse série calcaire du Crétacé inférieur dont l'épaisseur peut atteindre 1500 m. Son bassin d'alimentation d'une superficie de l'ordre de 1200 à 1500 km², a une altitude moyenne d'environ 870 m.

La source de la Foux de la Vis

La Foux de la Vis, ou résurgence de la Foux, est une résurgence karstique située sur la commune de Vissec dans le Gard. La Vis prend sa source dans le Parc national des Cévennes, coule jusqu'à Alzon avant de se perdre au niveau du moulin de Larcy, ce qui laisse un lit sec (le Vis sec autour de Vissec). Les eaux enfouies rejoignent alors un réseau souterrain pour resurgir à la Foux de la Vis. La résurgence s'ouvre dans les calcaires du Jurassique. La superficie du bassin versant de la résurgence de la Vis est de l'ordre de 200 km². Son d'altitude moyenne est de 335 m.

Système de la source de la Loue

La source de la Loue, située dans le Jura draine un système karstique très développé qui absorbe les eaux de ruissellement de cours d'eau secondaires. Son bassin d'alimentation est le vaste plateau du Levier situé à 700 à 800 m d'altitude. En bordure est du plateau, une partie des débits du Doubs s'infiltre au profit de la Loue. Il y a plusieurs sources qui émergent des calcaires du

Kimméridgien à Ouhans : « Loue vasque », « Loue canal » et « Loue Pont ». Les débits modélisés sont ceux mesurés par EDF au niveau de l'usine de Mouthier (La Loue à Mouthier »). Le bassin d'alimentation a une superficie estimée à environ 200 à 300 km².

La Sorgues à Cornu

La source de la Sorgues, près de Cornus, est située au pied du Causse du Larzac dans l'Aveyron. Elle est au pied des calcaires du bathonien supérieur (jurassique moyen) formant le sommet du Causse du Larzac. Ces calcaires sont très « lapiazés », avec dolines et avens. Le bassin fait apparaître un front de crypto-altération, avec des pinacles de cryptolapiaz de calcaires du Bajocien sain, dans une gangue de roche fantômisée en place.

Le système karstique de la Touvre

La source karstique de la Touvre, la 2^{ème} plus grande de France, est l'exutoire d'un grand réseau karstique développé dans les calcaires récifaux du Jurassique supérieur (Oxfordien) : le karst de La Rochefoucauld (Charente). Le réseau karstique est alimenté par les pertes des rivières La Tardoire, le Bandiat et la Bonniere provenant du Massif Central. Les débits modélisés sont ceux de la Touvre à Gond-Pontouvre. La superficie du bassin d'alimentation est estimée à plus de 500 km².

Le système de Boundoulaou

Le bassin d'alimentation de la source du Boundoulaou s'étend sur environ 17 km² au Nord-Ouest du Causse du Larzac. Sa source se trouve au Nord du bassin, sur la commune de Creissels, sa position est liée à un contact avec les niveaux imperméables du Lias marneux à la base de la série carbonatée. La lithologie du système est constituée de calcaires du Dogger et 30 % de dolomies du Bathonien recouvrent le bassin d'alimentation.

Le système des Cent-Fonts

Le karst Cent-Fonts est un système karstique situé au nord de Montpellier (département de l'Hérault). La source Cent-Fonts est la sortie d'un réseau de conduits karstiques développé dans une épaisse série calcaire et dolomitique du Jurassique moyen et supérieur. La superficie du bassin d'alimentation est de l'ordre de 100 km².

Le système du Cernon

Le petit système karstique du Cernon est situé dans le Causse du Larzac (comme le système de l'Homède et le système de la Mouline). Son bassin d'alimentation a une superficie de l'ordre de 15 km².

Le système du Durzon

Le Durzon est le plus grand système karstique du Causse du Larzac. Son bassin d'alimentation présente une superficie d'environ 120 km². Sa source se trouve sur la commune de Nant, à l'Est du Causse. La source est liée à la position de la faille de l'Hospitalet qui met en contact les formations carbonifères au Sud avec les marnes du Lias. La lithologie du système est constituée de calcaires et dolomies du Dogger. L'extension des dolomies sur les Causses représente près de 70 % de la surface du bassin d'alimentation. Leur altération entraîne la présence de reliefs ruiformes qui implique un fonctionnement épikarstique.

Le système de l'Espérelle

La source de l'Espérelle a un bassin d'alimentation situé au Nord-Est du Causse du Larzac. La lithologie du système est constituée de calcaires et dolomies du Dogger. La fracturation de l'ensemble du réservoir est importante et permet des circulations verticales. La superficie du bassin est d'environ 100 km².

Le système de l'Homède

Le bassin d'alimentation de la source de l'Homède couvre une surface d'environ 21 km² à côté du système de Boundoulaou au Nord du Causse du Larzac. Sa source coule sur la commune de Creissels. Sa position, comme celle de Boundoulaou, est liée au contact avec les niveaux marneux du Lias. La lithologie du système est tabulaire. Elle est constituée de calcaires du Dogger et environ 30 % de dolomies recouvrent le bassin d'alimentation.

Le système de la Mouline

Le système de la Mouline, au Sud du Larzac, a un bassin d'environ 30 km² qui alimente la vallée du Cernon. Sa position comme celle du système du Durzon, est liée à la faille de l'Hospitalet. La lithologie du système est constituée de calcaires et dolomies du Dogger. Le système de la Mouline présente le bassin d'alimentation le moins anthropisé des sources du Larzac. Environ 50 % de la surface du bassin est couverte par des dolomies ruiniformes du bathonien.

Source de la Fontaine de Nîmes

La source de la Fontaine de Nîmes est située dans le sud-est de la France, dans la ville de Nîmes. C'est généralement le seul exutoire d'un système karstique bien développé, à réaction rapide aux précipitations. L'épaisseur de la zone non-saturée est inférieure à 10 m et celle de la zone saturée est de quelques dizaines de mètres. Le débit de la Fontaine a été recalculé à partir de la piézométrie à l'Aven Mazauric suivie par le BRGM, en utilisant la courbe de tarage établie avec les données du débitmètre installé en 2004. Le bassin versant, d'une superficie estimée entre 50 et 70 km², est principalement composé de calcaire Hauterivien du Crétacé.

Annexe 2

Caractéristiques des données climatiques des systèmes karstiques

Caractéristiques des données climatiques des systèmes karstiques

Le Tableau 5 présente les valeurs moyennes annuelles relatives aux 23 bassins.

Tableau 5 – Caractéristiques des données climatiques des systèmes karstiques

Nom du système	Pluie annuelle (mm/an)	ETP annuelle (mm/an)	Neige (mm/an)	Température (°C)
L'Aliou	1069	752	117	10.0
Le Baget	1254	754	110	10.1
Fontestorbes	999	858	191	9.1
Fontaigneux	1034	806	151	8.7
Les Gillardes La Souloise	810	807	440	5.0
Le Groin à Artemare	1413	672	221	8.2
Le Lison	1353	684	200	8.1
L'Archiane à Treschenu	988	777	454	5.8
Le Bèze à Bèze	781	700	38	10.3
La source du Doubs	1284	680	453	6.1
La Fontaine de Vaucluse	886	946	90	9.6
La Foux de la Vis Blandas	1569	962	66	10.2
La source de la Loue à Mouthier	1308	681	253	7.5
La Sorgues à Cornus	1043	892	56	10.1
La Touvre	948	803	13	11.6
Boundoulaou	1058	870	75	9.6
Les Cent Fonts	1151	1018	16	12.4
Le Cernon	1061	867	78	9.5
Le Durzon	1058	870	75	9.6
L'Espérelle	1051	881	65	9.8
Ru de l'Homède	1058	870	75	9.6
La Mouline	1048	884	62	9.9
La Fontaine de Nimes	749	1158	8	14.0
[Moyenne]	1086	834	144	9.3

Annexe 3

Coefficients de Nash de la simulation ÉROS avec les Précipitations, ETP et Températures SAFRAN

Coefficients de Nash de la simulation ÉROS avec les Précipitations, ETP et Températures SAFRAN

Le Tableau 6 présente les coefficients de Nash de la simulation ÉROS + SAFRAN.

Tableau 6 – Coefficients de Nash de la simulation ÉROS avec les données climatiques SAFRAN

Nom du système	N°	Nash Racine Carr.	Nash Logarith.	Nash Débit
L'Aliou	1	0.751	0.732	0.679
Le Baget	2	0.855	0.847	0.833
Fontestorbes	3	0.814	0.826	0.778
Fontaigneux	4	0.805	0.809	0.787
Les Gillardes La Souloise	5	0.799	0.779	0.774
Le Groin à Artemare	6	0.826	0.744	0.781
Le Lison	7	0.915	0.894	0.907
L'Archiane à Treschenu	8	0.792	0.804	0.735
Le Bèze à Bèze	9	0.825	0.816	0.810
La source du Doubs	10	0.808	0.805	0.775
La Fontaine de Vaucluse	11	0.922	0.925	0.907
La Foux de la Vis Blandas	12	0.657	0.675	0.589
La source de la Loue à Mouthier	13	0.908	0.917	0.887
La Sorgues à Cornus	14	0.807	0.801	0.756
La Touvre	15	0.867	0.862	0.858
Boundoulaou	16	0.783	0.808	0.717
Les Cent Fonts	17	0.895	0.890	0.858
Le Cernon	18	0.857	0.825	0.854
Le Durzon	19	0.851	0.850	0.826
L'Espérelle	20	0.826	0.852	0.764
Ru de l'Homède	21	0.885	0.882	0.859
La Mouline	22	0.871	0.880	0.841
La Fontaine de Nimes	23	0.837	0.766	0.813
[Moyenne]		0.833	0.825	0.799

Annexe 4

Débits journaliers des 23 systèmes karstiques observés et simulés avec ÉROS + données météo SAFRAN

Débits journaliers des 23 systèmes karstiques observés et simulés avec ÉROS + données météo SAFRAN

Évolution de la racine carrée des débits journaliers des systèmes karstiques observés et simulés avec ÉROS + Météo SAFRAN sur la période de 2002 à 2010.

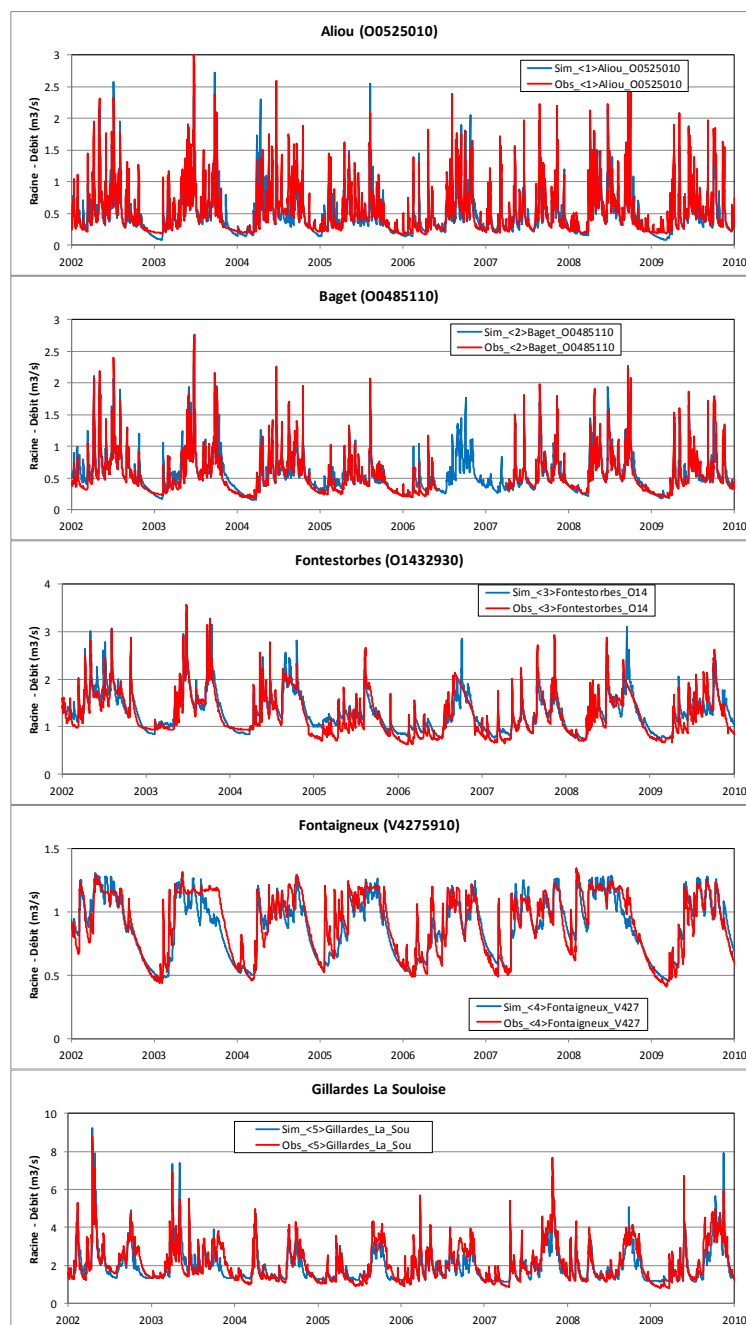


Figure 16 – Racine carrée des débits journaliers observés et simulés avec ÉROS + Météo SAFRAN de 2002 à 2010.

Bassins n°1 à n°5 : Aliou, Baget, Fontestorbes, Fontaigneux, Gillardes.

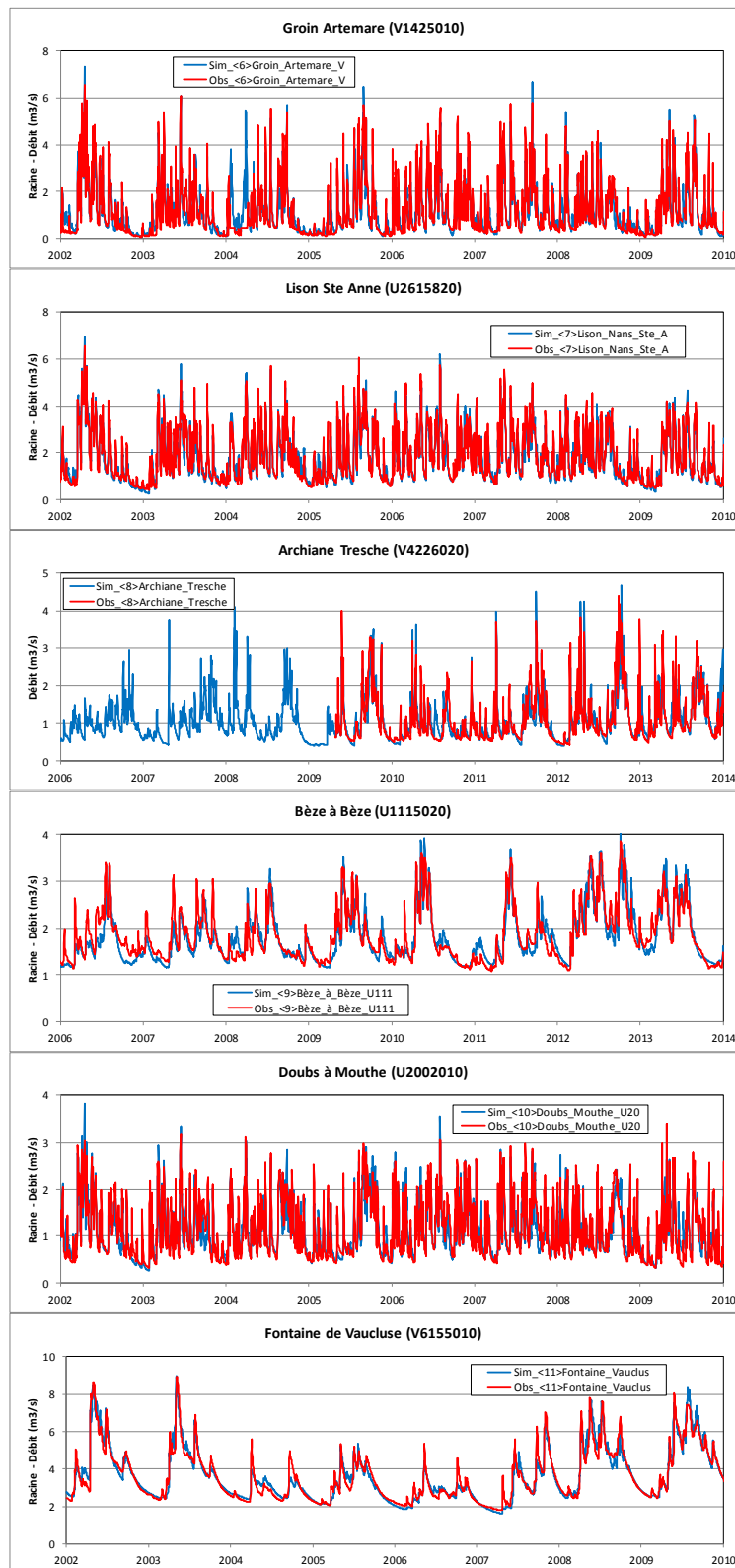


Figure 17 – Racine carrée des débits journaliers observés et simulés avec ÉROS + Météo SAFRAN de 2002 à 2010.

Bassins n°6 à n°11 : Groin, Lison, Archiane, Bèze, Doubs, Fontaine de Vaucluse.

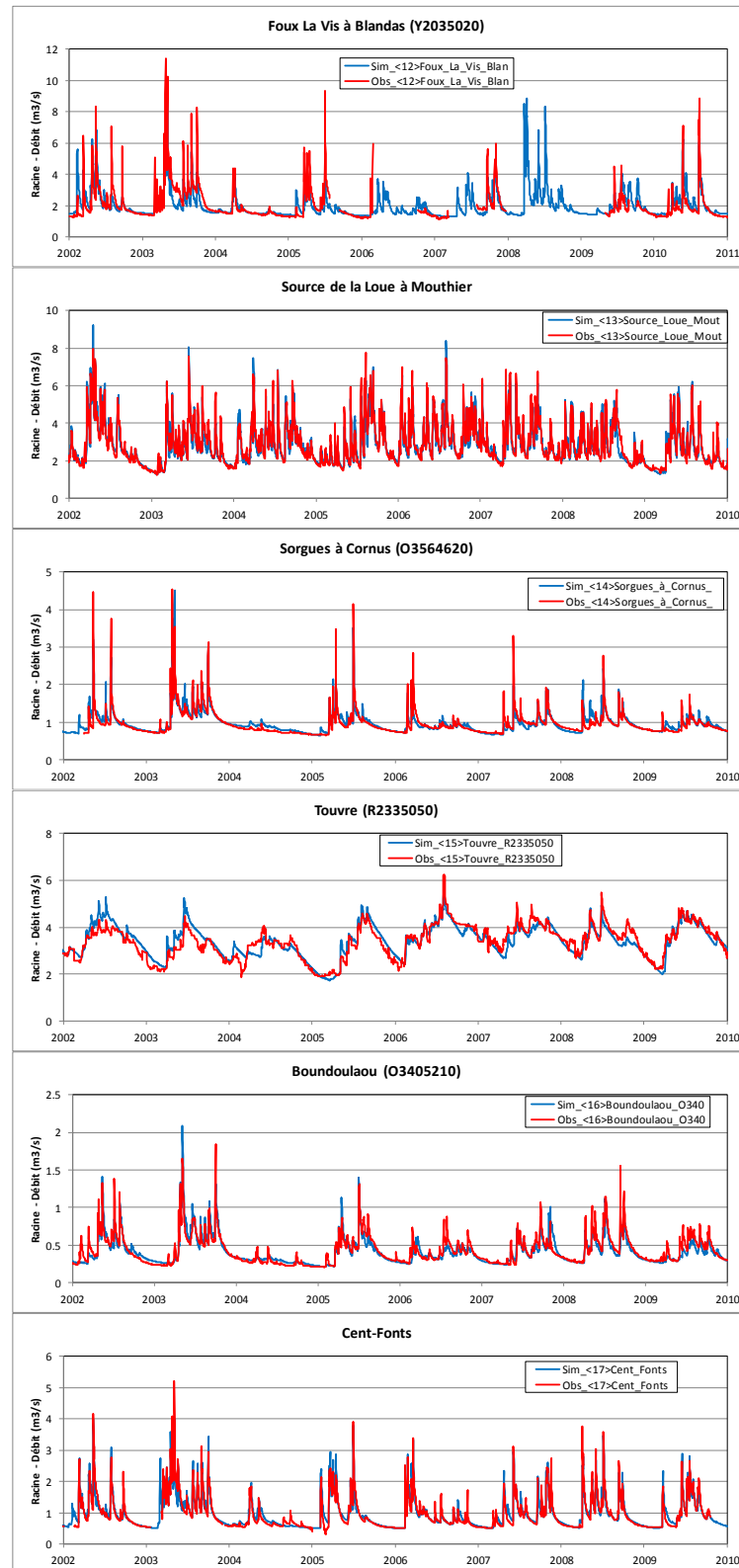


Figure 18 – Racine carrée des débits journaliers observés et simulés avec ÉROS + Météo SAFRAN de 2002 à 2010.

Bassins n°12 à n°17 : Foux-la-Vis, Loue, Sorgues, Touvre, Boundoulaou, Cent-Fonts.

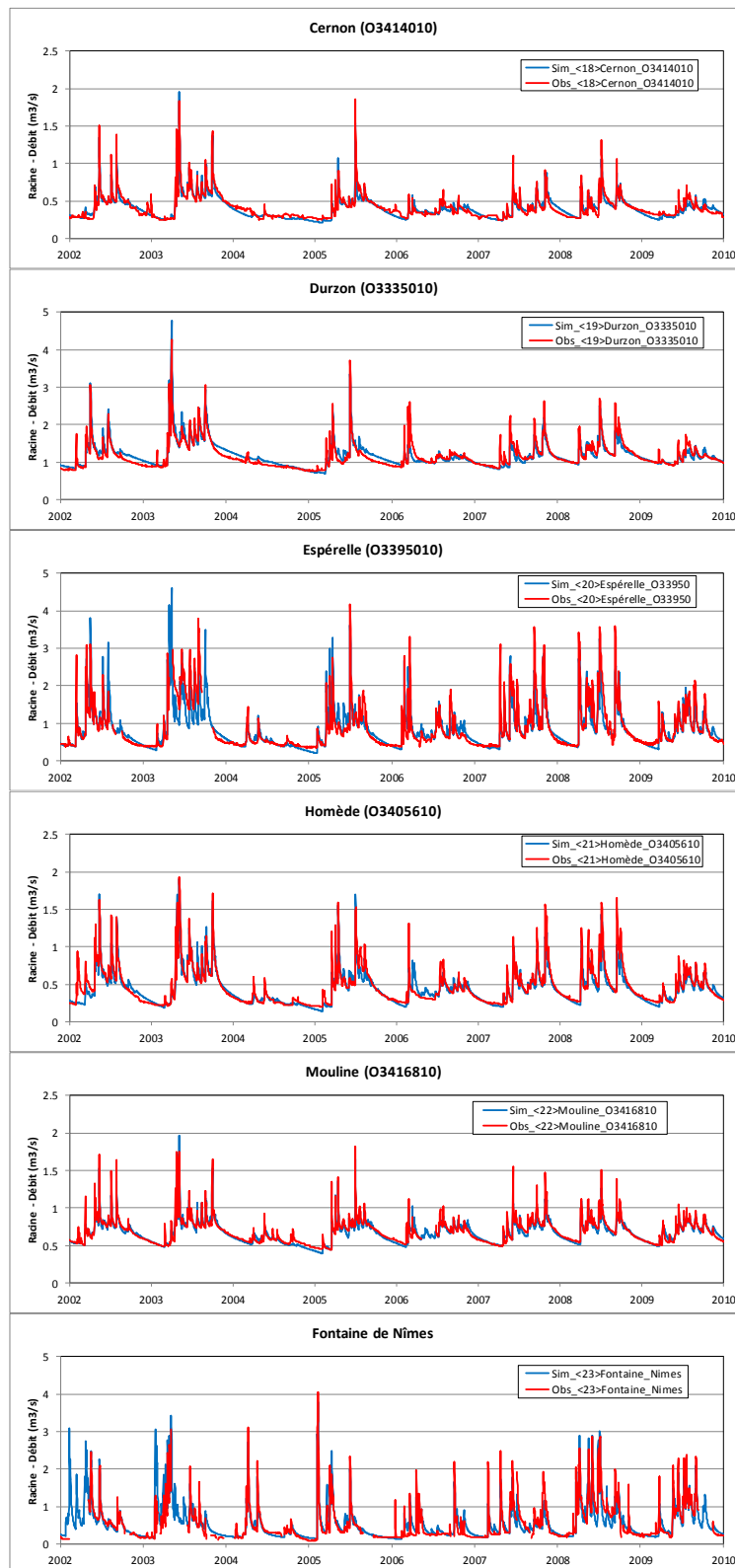


Figure 19 – Racine carrée des débits journaliers observés et simulés avec ÉROS + Météo SAFRAN de 2002 à 2010.

Bassins n°18 à n°23 : Cernon, Durzon, Espérelle, Homède, Mouline, Fontaine de Nîmes.

Annexe 5

Moyennes interannuelles des débits journaliers observés et simulés avec ÉROS + météo SAFRAN pour les 365 jours de l'année

Moyennes interannuelles des débits journaliers observés et simulés avec ÉROS + données météo SAFRAN pour les 365 jours de l'année

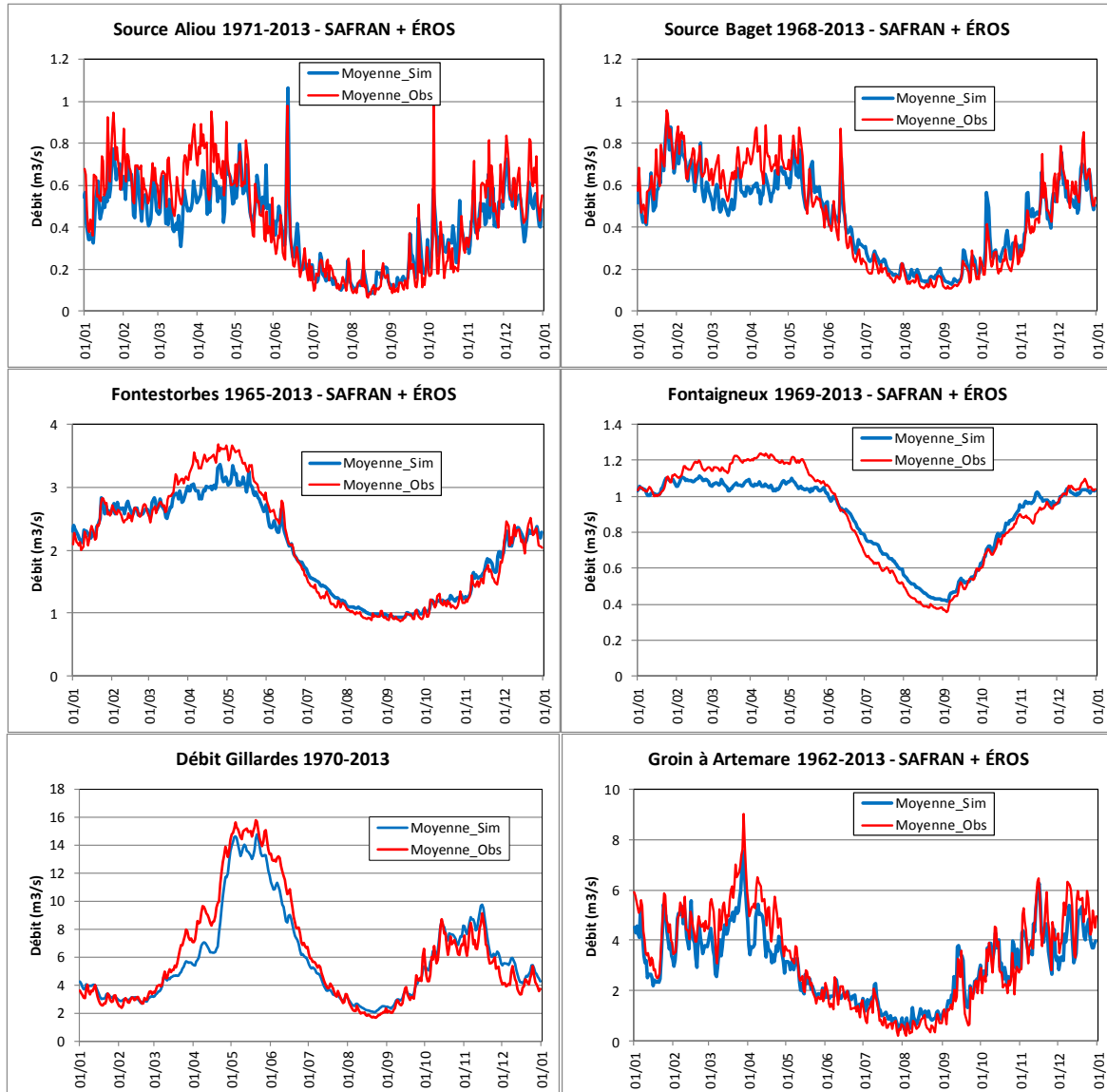


Figure 20 – Moyennes interannuelles des débits journaliers observés et simulés avec ÉROS + données météo SAFRAN.

Bassins n°1 à n°6 : Aliou, Baget, Fontestorbes, Fontaigneux, Gillardes, Groin-Artemare.

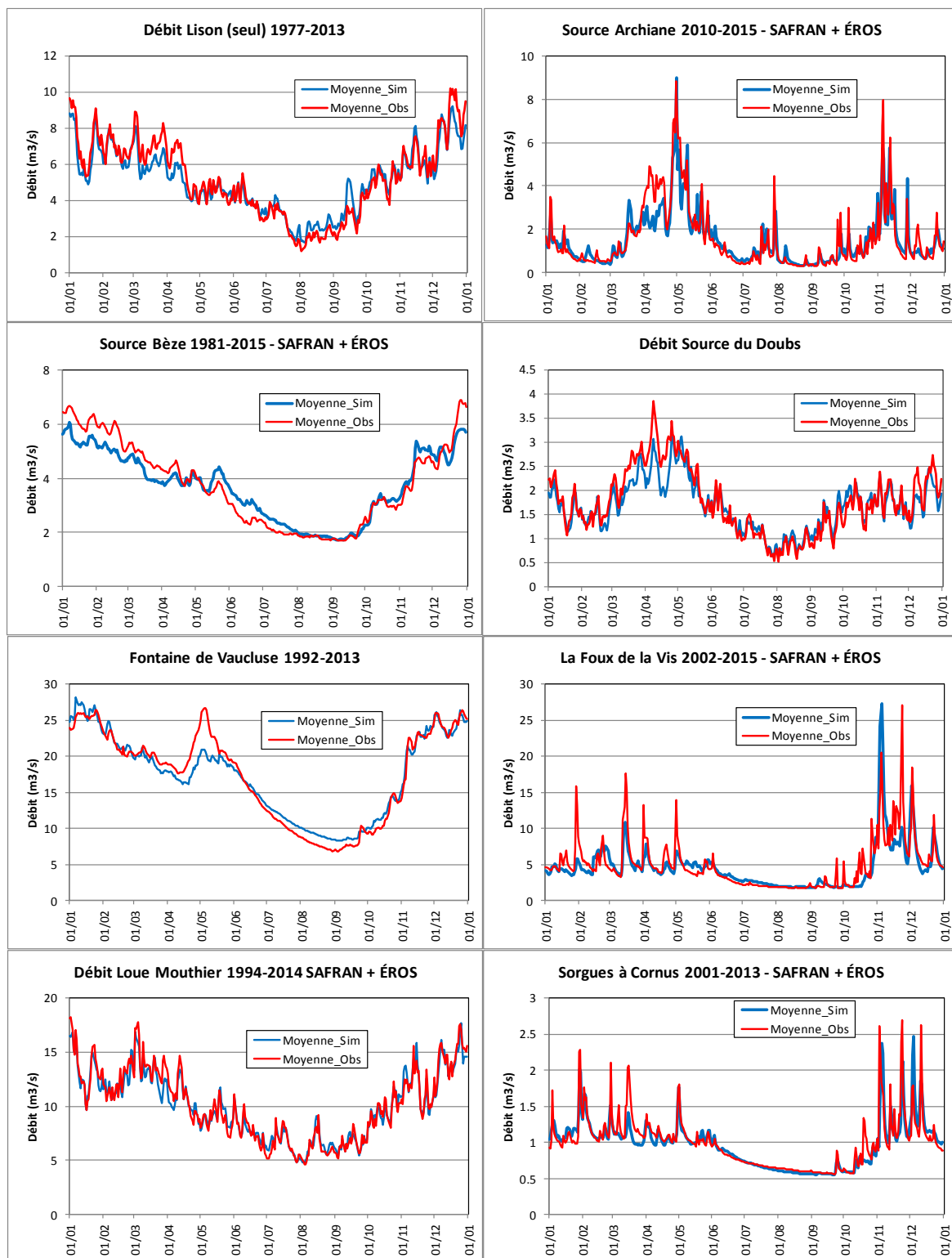


Figure 21 – Moyennes interannuelles des débits journaliers observés et simulés avec ÉROS + données météo SAFRAN.

Bassins n°7 à n°14 : Lison, Archiane, Bèze, Doubs, Fontaine de Vaucluse, Foux-la-Vis, Loue, Sorgues.

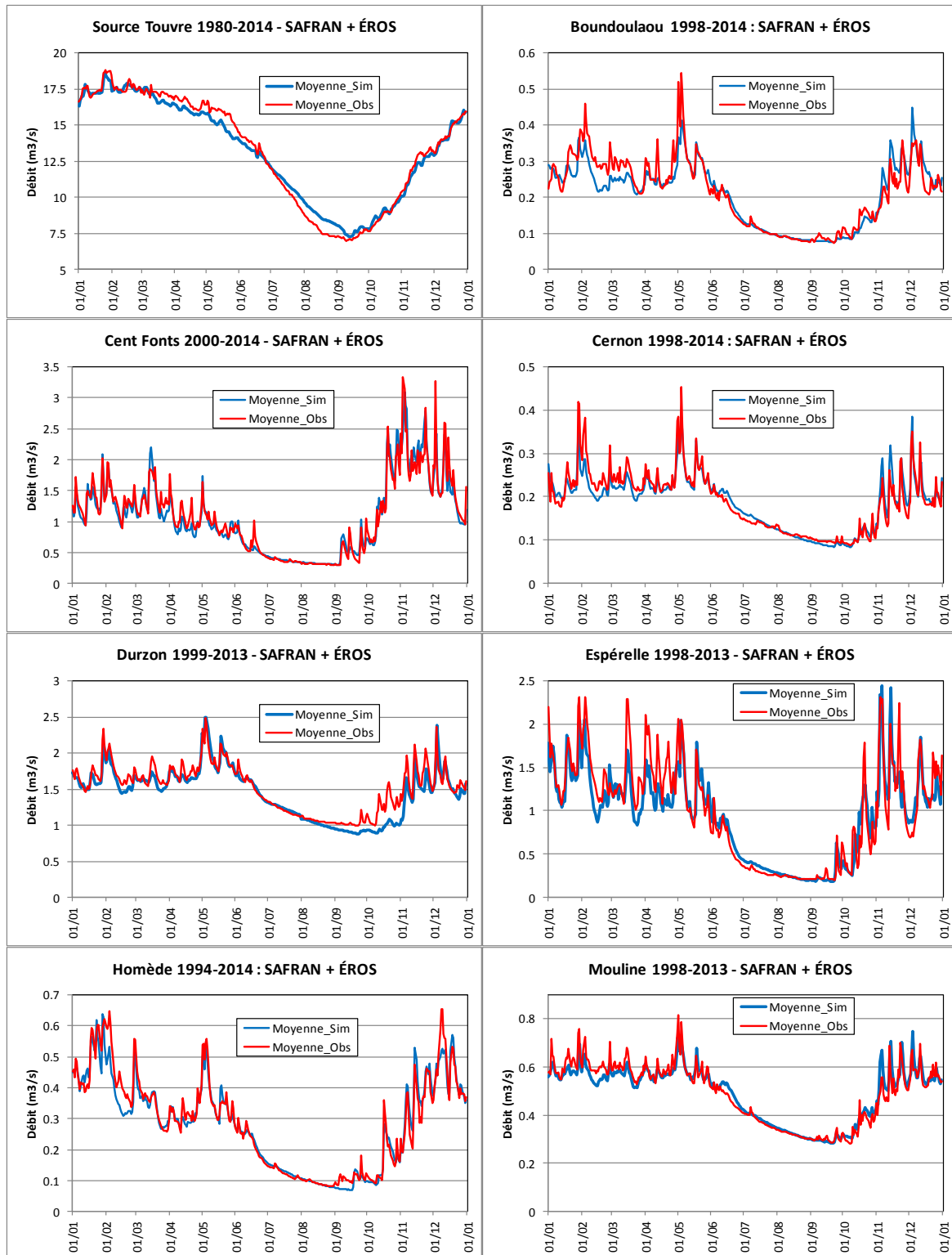


Figure 22 – Moyennes interannuelles des débits journaliers observés et simulés avec ÉROS + données météo SAFRAN.

Bassins n°15 à n°22 : Touvre, Boundoulaou, Cent-Fonts, Cernon, Durzon, Espérelle, Homède, Mouline.

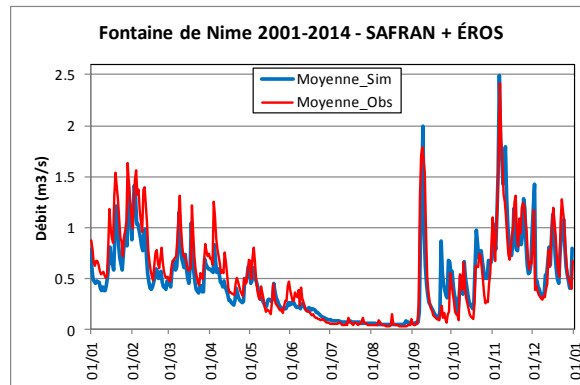


Figure 23 – Moyennes interannuelles des débits journaliers observés et simulés avec ÉROS + données météo SAFRAN.
Bassin n°23 : Fontaine de Nîmes.

Annexe 6

Liste des mailles SAFRAN utilisées pour la simulation des bassins karstiques avec le code de calcul ÉROS

Liste des mailles SAFRAN utilisées pour la simulation des bassins karstiques avec le code de calcul ÉROS.

Pour chaque bassin est indiquée la liste des numéros de maille SAFRAN, suivie de la pondération qui est selon le cas : le pourcentage utile de la maille (%) ou bien la superficie utile (en km²).

Aliou (O0525010) : n°1 ; X_km = 495.5 ; Y_km = 1777
(9484 100)

Baget à Hountas (O0485110) ; (Lachein à Balaguères) ; n°2
(9526 100)

Fontestorbes (O1432930) : n°3 ; X_km = 561 ; Y_Km = 1759
(9579 100)

Fontaigneux (V4275910) n°4 (Gervanne-Fontaigneux) ; X_G_km= 825.5 ; Y_G_km = 1985.
(7392 100)

Gillardes_La_Souloise n°5 (Débit = La Souloise ; Bassin = Gillardes)
(7398 4.5) ; (7399 1) ; (7481 36.2) ; (7482 51.4) ; (7483 1.3)
(7565 25.6) ; (7566 61.9) ; (7567 11.4) ; (7648 7.3)

Groin_Artemare (V1425010) n°6 ; X_G_km = 863 ; Y_G_km = 2109.
(6093 100)

Lison seul (sans Sarrazine) n°7 : Nans-sous-Sainte-Anne
(4671 11) ; (4672 32.5) ; (4787 40.6) ; (4788 35.9) ; (4903 4.8) ; (4904 12.9)

Archiane à Treschenu (V4226020) n°8 ; X_km = 850 ; Y_km = 1980"
(7478 100)

Bèze à Bèze (U1115020) n°9 ; X_km = 820 ; Y_km = 2280
(3839 100)

Source du Doubs n°10
(5021 1.4) ; (5133 35.7) ; (5134 24.0) ; (5245 7.0)

Fontaine de Vaucluse n°11
(8055 12.5) ; (8056 10.8) ; (8145 0.2) ; (8146 48.3) ; (8147 60.2) ; (8148 39.9)
(8149 45.8) ; (8150 33.4) ; (8151 20.5) ; (8152 3.6) ; (8153 13.5) ; (8154 7.5)
(8237 3.9) ; (8238 58.4) ; (8239 63.9) ; (8240 63.9) ; (8241 63.9) ; (8242 63.9)
(8243 60.5) ; (8244 47.9) ; (8245 15.2) ; (8328 2.8) ; (8329 60.2) ; (8330 63.9)
(8331 63.9) ; (8332 63.9) ; (8333 43) ; (8334 12.2) ; (8420 47.7) ; (8421 55.3)
(8422 46.6) ; (8423 56.4) ; (8424 39.8) ; (8510 1.1) ; (8511 20.3) ; (8512 2.7)

Foux de La Vis à Blandas (Y2035020) n°12 ; X_km = 685 ; Y_km = 1880
(8493 100)

Source de la Loue à Mouthier n°13
(4442 8.9) ; (4443 0.1) ; (4557 29) ; (4558 62.4) ; (4559 7.1) ; (4673 20.2) ;
(4674 58) ; (4675 29) ; (4676 0.9) ; (4789 24.5) ; (4790 7.6)

Sorgues à Cornus (O3564620) n°14 ; X_G_km = 670.5 ; Y_G_km = 1876.5
(8582 100)

Touvre à Gond-Pontouvre (R2335050) n°15 (1475 km2)
(6209 27) ; (6210 42) ; (6211 31) ; (6212 36) ; (6213 8) ; (6288 21)
(6289 64) ; (6290 64) ; (6291 64) ; (6292 17) ; (6293 4) ; (6368 12)
(6369 64) ; (6370 64) ; (6371 64) ; (6372 64) ; (6373 64) ; (6374 54)
(6375 21) ; (6448 17) ; (6449 64) ; (6450 64) ; (6451 64) ; (6452 64)
(6453 64) ; (6454 54) ; (6455 19) ; (6456 3) ; (6529 35) ; (6530 40)
(6531 59) ; (6532 64) ; (6533 48) ; (6534 7) ; (6613 5) ; (6614 20)
(6615 2)

Boundoulaou (O3405210) n°16
(8308 100)

Cent_Fonts n°17
(8586 1) ; (8587 6.4) ; (8676 15.9) ; (8677 7.5)

Cernon (O3414010) n°18
(8400 100)

Durzon (O3335010) n°19
(8308 100)

Espérelle (O3395010) n°20 : X_G_km = 678. ; Y_G_km = 1893.
(8309 100)

Homède (O3405610) n°21
(8308 100)

Mouline (O3416810) n°22 ; X_G_km = 663.5 ; Y_G_km = 1885.5
(8399 100)

Fontaine de Nîmes n°23
(8501 1) ; (8502 3) ; (8503 1) ; (8592 15) ; (8593 50) ; (8594 30)



Centre scientifique et technique
Direction Eau, Environnement et Écotechnologies
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34