

ETUDE DE LA GESTION QUANTITATIVE ET DES DEBITS DU RHONE EN PERIODE DE « BASSES EAUX »



**PHASE 2 - ETUDE DES ETIAGES HISTORIQUES, RECONSTITUTION
DES DEBITS DESINFLUENCES ET EVALUATION DE L'EMPREINTE DES
INFLUENCES ANTHROPIQUES SUR LES DEBITS DU RHONE**

*Document A - Rapport principal de mission 1 : Etude des
étiages historiques*



Edition finale - Octobre 2014

L'étude de la gestion quantitative et des débits du Rhône en période de basses eaux comporte les documents listés ci-dessous. Le présent document constitue le rapport surligné en gris.

Synthèse de l'étude	
Synthèse	Etude de la gestion quantitative du fleuve Rhône à l'étiage : Principaux résultats - Synthèse de l'étude en 100 pages précédée d'un résumé de 6 pages
Phase 1 - Caractérisation du territoire du fleuve Rhône et Bilan des influences anthropiques passées, actuelles et futures possibles	
A	Rapport principal de phase 1
B	Rapport thématique sur l'irrigation dans le bassin du Rhône
C	Rapport thématique sur les nappes en interaction avec le Rhône
D	Fiche de synthèse sur les ouvrages hydroélectriques situés sur la partie française du bassin du Rhône
E	Fiche de synthèse sur l'hydrologie du Rhône alpestre et l'influence des ouvrages hydrauliques suisses
F	Résumé de la phase 1
Phase 2 - Etude des étiages historiques ; Reconstitution des débits désinfluencés et Evaluation de l'empreinte des influences anthropiques sur les débits du Rhône	
A	Rapport principal de mission 1 : Etude des étiages historiques
B	Rapport principal de mission 2 : Reconstitution des débits désinfluencés et évaluation des empreintes des influences anthropiques sur les débits
C	Rapport thématique Hydrogéologie : Estimation des impacts des prélèvements en nappes sur le débit du Rhône
D	Rapport thématique Hydrométrie : Etude critique des débits mesurés aux stations d'étude
E	Résumé de la phase 2
Phase 3 - Détermination des conditions limites (débits et températures) à maintenir dans le fleuve pour l'alimentation en eau potable et le fonctionnement des centres nucléaires de production d'électricité	
A	Rapport principal de phase 3
B	Résumé de la phase 3
C	Impact d'une baisse des débits d'étiage sur la salinisation des hydrosystèmes souterrains en Camargue
D	Impact d'une baisse de débit du fleuve sur les usages préleveurs en nappe alluviale
Phase 4 - Détermination des conditions limites de débits pour les espèces	
A	Rapport principal de phase 4
B	Résumé de la phase 4
Phase 5 - Synthèse des débits limites pouvant être définis dans le Rhône et Approche des volumes prélevables	
A	Rapport principal de phase 5
B	Résumé de la phase 5
Phase 6 - Etude de la sensibilité des étiages du Rhône à des scénarios prospectifs	
A	Rapport principal de phase 6
B	Résumé de la phase 6

	<p>BRL ingénierie</p> <p>1105 Av Pierre Mendès-France BP 94001 30001 NIMES CEDEX 5</p>
---	--

Date de création du document	1^{er} mai 2013
Contact	Sébastien Chazot <u>sebastien.chazot@brl.fr</u>

Titre du document	Phase 2 – Document A : Rapport Mission 1 - Etude des étiages historiques
Référence du document :	800420_Ph2_A_M1_Principal
Indice :	VFb

Date émission	Indice	Observation	Dressé par	Vérifié et Validé par
24 mai 2013	1.0	Phase 1 Mission 2	Mathilde Chauveau, Jeremy Garcia, Marion Mahé, Sébastien Chazot	S. Chazot
9 août 2013	2.0	Phase 1 Mission 2		S. Chazot
20 déc. 2013	3.0	Phase 1 Mission 2		S. Chazot
Octobre 2014	VFb	Phase 1 Mission 2		S. Chazot

ETUDE DE LA GESTION QUANTITATIVE ET DES DÉBITS DU RHÔNE EN PÉRIODE DE « BASSES EAUX »

Phase 2 – Document A : Rapport Mission 1 - Etude des étiages historiques

PRÉAMBULE	1
1. INTRODUCTION	3
1.1 Points d'étude	3
1.2 Données utilisées	6
1.3 Indicateurs hydrologiques	7
2. QUELQUES GRANDS ORDRES DE GRANDEURS DE L'HYDROLOGIE DU RHÔNE ET SES AFFLUENTS	9
2.1 Les régimes hydrologiques du Rhône	9
2.2 Les influences climatiques du bassin du Rhône	15
3. IDENTIFICATION DES ETIAGES SÉVERES DU RHÔNE ET DE SES PRINCIPAUX AFFLUENTS	19
3.1 Identification des années sèches du Rhône	19
3.2 Choix d'un échantillon d'années sèches pour l'étude	24
3.3 Aperçu des années sèches : une grande variabilité hydrologique	24
3.4 Températures de l'eau du Rhône	27
4. ANALYSE DÉTAILLÉE DE SEPT ANNÉES REMARQUABLES DE BASSES EAUX DU RHÔNE	29
4.1 Etiage de 1921	29
4.2 Etiage de 1962	30
4.3 Etiage de 1972	31
4.4 Etiage de 1976	33
4.5 Etiage de 2003	34
4.6 Etiage de 2009	36
4.7 Etiage de 2011	37
5. ESSAI DE SYNTHÈSE SUR LES ÉTIAGES DU RHÔNE	39
5.1 Les étiages historiques sont-ils plutôt des événements courts et intenses ou des déficits de longues durées ?	39
5.1.1 Approche durée et magnitude par les VCN10 de périodes de retour 2 ans et 5 ans	39
5.1.2 Approche complémentaire par les Intensité-Durée-Fréquence des débits du Rhône issues d'études EDF	42

5.2	Une année sèche l'est-elle sur tous les tronçons du Rhône et sur tous ses affluents ?	45
5.3	À quelles périodes de l'année ont lieu les étiages du Rhône ?	45
5.4	Quelle est la contribution de chaque sous-bassin aux débits d'étiage du Rhône ? Cette part est-elle très variable d'une année sur l'autre ?	49
5.5	Quels sont les principaux phénomènes climatiques expliquant les basses eaux ?	51
5.6	Rétrospective : détecte-t-on une tendance sur les bas débits à l'échelle du bassin du Rhône ?	52
5.7	Détecte-on un lien entre les étiages du Rhône et le niveau de la nappe alluviale ?	53
5.7.1	Première caractérisation des informations disponibles	53
5.7.2	Premières analyses sur trois chroniques piézométriques longues	59
5.7.3	Premiers avis sur les relations entre piézométrie et étiages du Rhône	62
6.	PEUT-ON DRESSER UNE TYPOLOGIE DES ETIAGES DU RHÔNE ?.....	63
7.	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	65
ANNEXES		67
	ANNEXE 1 : Indicateurs hydrologiques aux 13 points d'étude, calculés sur la période 1980-2011*	69
	Annexe 2 : Hydrologie et climatologie des 14 années sèches du Rhône étudiées	70
	Annexe 3 : Zoom sur les étiages de quelques grands affluents	73
	Annexe 4 : Tests de rupture des séries hydrométriques du Rhône	79

TABLE DES ILLUSTRATIONS

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte des surfaces contributives aux points SDAGE du Rhône.....	4
Figure 2 : Carte du découpage du bassin du Rhône en «sous-bassins »	5
Figure 3 : Sous-bassin versant contributif du Rhône à Pougny, englobant principalement le bassin versant du Rhône et Suisse et le bassin versant de l'Arve.....	6
Figure 4 : Données hydrométriques journalières disponibles aux points de référence de l'étude	6
Figure 5 : Débits moyens mensuels interannuels [1995-2011] des débits à Porte de Scex (amont Léman) ; à Genève (aval Léman) et à Pougny (aval confluence Arve).	10
Figure 6 : Modules et débits moyens du mois d'août du Rhône et de ses principaux affluents (calculés sur la période 1980-2011).	11
Figure 7 : Régime hydrologique de plusieurs affluents du Rhône, au droit des stations de référence – Débits mensuels interannuels calculés sur 1980-2011	14
Figure 8 : Indicateurs climatiques des sous-bassins du Rhône français, calculés entre 1980 et 2010	16
Figure 9 : Précipitations et évapotranspirations moyennes sur la période 1959-2011. Données SAFRAN (Météo France).....	18
Figure 10 : Sous-passement des VCN10 de périodes de retour 2 ans, 5 ans et 10 ans sur le Rhône et ses affluents, de 1920 à 2011.	21
Figure 11 : Débits 10 jours aux points SDAGE, lors des 14 années sèches du Rhône français.	25
Figure 12 : Cartographie par année et station de la moyenne annuelle de températures du Rhône. Les stations sont classées d'amont en aval. Source EDF.	27
Figure 13 : Evolution moyenne sur 5 années consécutives par stations sur le Rhône. Source EDF	28
Figure 14 : Séries reconstituées des températures de l'eau du Rhône entre 1920 et 2010, moyenne annuelles. Source EDF	28
Figure 15 : Sous-passement des seuils VCN10_T sur le Rhône en 1921 et hydrogrammes de Lagnieu à Beaucaire pour 1921. Les débits glissants sur 10 jours sont considérés.....	29
Figure 16 : Etude des périodes de retours des VCN10 et VCN60 du Rhône de Pougny à Beaucaire en 1921.....	29
Figure 17 : Sous-passement des seuils VCN10_T sur le Rhône en 1962 et hydrogrammes de Pougny à Beaucaire pour 1962.	30
Figure 18 : Etude des périodes de retours des VCN10 et VCN60 du Rhône de Pougny à Beaucaire en 1962.....	30
Figure 19 : Sous-passement des seuils VCN10_T sur le Rhône et hydrogrammes de Pougny à Beaucaire pour 1972 (débits glissants sur 10 jours).	32
Figure 20 : Etude des périodes de retours des VCN10 et VCN60 du Rhône de Pougny à Beaucaire en 1972.....	32
Figure 21 : Sous-passement des seuils VCN10_T sur le Rhône et hydrogrammes de Pougny à Beaucaire pour 1976 (débits glissants sur 10 jours).	33
Figure 22 : Etude des périodes de retours des VCN10 et VCN60 du Rhône de Pougny à Beaucaire en 1976.....	34
Figure 23 : Sous-passement des seuils VCN10_T sur le Rhône et hydrogrammes de Lagnieu à Beaucaire pour 2003 (débits glissants sur 10 jours).	35
Figure 24 : Etude des périodes de retours des VCN10 et VCN60 du Rhône de Pougny à Beaucaire en 2003.....	35
Figure 25 : Sous-passement des seuils VCN10_T sur le Rhône en 1921 et hydrogrammes de Lagnieu à Beaucaire pour 2009 (débits glissants sur 10 jours).	36
Figure 26 : Sous-passement des seuils VCN10_T sur le Rhône et hydrogrammes de Lagnieu à Beaucaire pour 2011 (débits glissants sur 10 jours).	37
Figure 27 : Etude des périodes de retours des VCN10 et VCN60 du Rhône de Pougny à Beaucaire en 2011. Source : Etude thermique du Rhône, EDF, 2012.....	37

Figure 28 : Débits à Genève en 2011. Baisse momentanée des débits à 50m ³ /s en mai 2011 suite à la dérogation du canton de Genève, puis remontée à 100m ³ /s suite à l'accord avec la France.	38
Figure 29 : Durée et magnitude d'un épisode de basses eaux, à partir de l'indicateur VCN10_2.....	39
Figure 30 : Episodes de passage du débit journalier sous le VCN10_5 à Beaucaire et à Lagnieu, depuis 1921. Magnitudes et durées des épisodes.....	41
Figure 31 : Courbes d'Intensité-Durée Fréquence aux stations de Lagnieu et Beaucaire, source EDF	43
Figure 32 : Saisonnalité des basses eaux du Rhône. Nombre de jours pour lesquels le débit journalier est inférieur au VCN10_2ans , pour chaque mois. Années sèches et moyenne interannuelle, aux six points SDAGE du Rhône.	46
Figure 33 : Saisonnalité des basses eaux du Rhône. Nombre de jours pour lesquels le débit journalier est inférieur au VCN10_5ans , pour chaque mois. Années sèches et moyenne interannuelle, aux six points SDAGE du Rhône.	47
Figure 34 : Etude des débits moyens de juillet sur l'Arve à Arthaz (1962-2011)	53
Figure 35 : Piézomètres retenus pour l'analyse sommaire	54
Figure 36 : Exemple de piézomètre situé hors contour alluvial.....	55
Figure 37 : Chroniques piézométriques journalières des 20 stations retenues	56
Figure 38 : Chronique piézométrique à St-Vulbas	59
Figure 39 : Chronique piézométrique à Villeurbanne	60
Figure 40 : Chronique piézométrique à Tarascon	61
Figure 41 : Débits mensuels de la Saône (m ³ /s) et sous passément du VCN10_2ans.....	74
Figure 42 : Moyennes mensuelles des précipitations, ETP et estimation de la neige fondue sur le bassin de la Saône à Couzon.	74
Figure 43 : Débits mensuels de l'Isère (m ³ /s) et sous passément du VCN10_2ans.....	76
Figure 44 : Moyennes mensuelles des précipitations, ETP et estimation de la neige fondue sur le bassin de l'Isère à Beaumont.....	76
Figure 45 : Débits mensuels de l'Arve (m ³ /s) et sous passément du VCN10_2ans.....	77
Figure 46 : Moyennes mensuelles des précipitations, ETP et estimation de la neige fondue sur le bassin de l'Arve à Arthaz.....	78
Figure 47 : Tests de Pettitt sur les débits annuels	79
Figure 48 : Tests de Pettitt sur les débits du mois d'août.....	80
Figure 49 : Tests de Pettitt sur les QMNA	81

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Présentation des indicateurs hydrologiques utilisés dans le présent rapport	7
Tableau 2 : Débits VCN caractéristiques (influencés) au droit des six points SDAGE sur le Rhône, calculés sur la période 1980-2011	19
Tableau 3 : Identification des années de très bas débits du Rhône et de ses affluents	23
Tableau 4 : Echantillon d'années sèches du Rhône étudiées dans le présent rapport	24
Tableau 5 : Episodes de passages sous le VCN10_5 les plus importants depuis 1920, à Beaucaire et à Lagnieu.	40
Tableau 6 : Rappel des modules, VCN10_2 et VCN10_5 aux 6 points SDAGE	45
Tableau 7 : Identification des mois de l'année impactés par de très bas débits du Rhône, pour les 14 années sèches étudiées dans le cadre de la présente étude.....	48
Tableau 8 : Identification des principaux affluents déficitaires, contribuant aux épisodes d'étiages du Rhône, pour les 14 années étudiées.....	50
Tableau 9 : Déficit de débit aux points SDAGE et sur les principaux affluents du Rhône par rapport à la moyenne mensuelle interannuelle calculée sur 1980-2011	50
Tableau 10 : Identifications des facteurs météorologiques prépondérants aux 14 épisodes de basses eaux du Rhône étudiés.....	52
Tableau 11 : Identification des périodes de très bas débits du Rhône pour plusieurs années.....	59

Tableau 12 : Pour chacune des 14 années sèches : identification des facteurs climatiques prépondérants, périodes de l'année impactées, principaux affluents déficitaires, et durées et magnitudes des épisodes.	64
Tableau 13: Débits moyens annuels et du mois d'aout de quelques affluents du Rhône, calculés sur la période 1980-2011*.	73
Tableau 14 : Rappel des débits caractéristiques de la Saône, période 1980-2011	74
Tableau 15 : Rappel des débits caractéristiques de l'Isère, période 1956-2011	75
Tableau 16 : Rappel des débits caractéristiques de l'Arve, période 1980-2011	77

PRÉAMBULE

L'Agence de l'Eau RMC a confié à BRLingénierie, associé à Hydrofis et Hepia (sous-traitants), la réalisation de l'étude de la gestion quantitative et des débits du Rhône en période de basses eaux.

Le Rhône est souvent considéré comme une ressource pléthorique et susceptible de satisfaire de nombreux usages (prélèvements pour l'eau potable, l'industrie ou l'irrigation, production hydroélectrique, refroidissement de centrales nucléaires, navigation, etc.). **On peut cependant s'interroger sur l'évolution de sa capacité à satisfaire, à terme, en périodes d'étiage, tous ces usages, conjointement avec une garantie du bon état des milieux aquatiques associés**, compte tenu de plusieurs paramètres, en particulier :

- ▶ des perspectives d'évolution des usages prélevant dans le fleuve ou sa nappe ;
- ▶ des perspectives de modification de son régime hydrologique et de la température de ses eaux sous l'influence du changement climatique ;
- ▶ l'émergence de divers projets de substitution ou de développement de ressource pour amener de l'eau du fleuve (eau superficielle ou nappe) vers des bassins voisins ne disposant pas des ressources suffisantes pour satisfaire leurs besoins (alimentation en eau potable, usage agricole, usage industriel) ;
- ▶ l'apparition de périodes de tensions, en particulier lors d'épisodes caniculaires et/ou d'étiage prononcé. Certaines années récentes se sont illustrées par des températures d'eau élevées (en particulier 2003 et 2006), qui ont conduit EDF à diminuer la production des centres nucléaires de production d'électricité (CNPE).

Ces différents points soulignent l'importance de la question clé posée par le cahier des charges de l'étude : « **Quelle est la capacité du fleuve Rhône à répondre à l'ensemble des usages actuels et à venir tout en assurant le fonctionnement des milieux aquatiques ?** ». Plus précisément, l'étude doit apporter des réponses aux questions suivantes :

- ▶ Est-il pertinent de considérer le Rhône comme une ressource pléthorique ?
- ▶ Quelles sont les composantes du débit du Rhône (contributions des glaciers, du manteau neigeux, du Lac Léman, des affluents, de la pluviométrie...) et les différents leviers influençant les débits d'étiage ?
- ▶ Quels sont les impacts des variations de débits et de température sur les différents usages ?
- ▶ Quels seuils de débit ne faut-il pas dépasser sur le fleuve pour ne compromettre ni la vie biologique, ni les usages prioritaires (eau potable/sécurité civile) ?

L'étude est découpée en six phases chronologiques.

La phase 1 caractérise le territoire de l'étude et dresse un bilan des influences anthropiques passées, actuelles et futures possibles, à l'échelle du bassin versant, sur les eaux superficielles et les eaux souterraines : gestion du lac Léman, barrages, transferts hydroélectriques, prélèvements pour l'irrigation, l'eau potable, l'industrie et le refroidissement des centrales nucléaires.

La phase 2 reconstitue, au droit des six stations hydrométriques de référence, les débits non influencés par les prélèvements et évalue l'empreinte des influences anthropiques sur ces débits.

La phase 3 examine les conditions limites (débits et températures) à maintenir dans le fleuve pour l'alimentation en eau potable et le fonctionnement des centres nucléaires de production d'électricité.

La phase 4 s'interroge sur les conditions limites de débit à maintenir pour les poissons.

Les phases 5 et 6 font la synthèse des débits limites pouvant être définis à ce stade dans le Rhône et évaluent les effets possibles d'une augmentation des prélèvements sur les étiages du Rhône.

Le présent document expose les résultats de la mission 1 de la Phase 2. Il propose une caractérisation des étiages du Rhône. Il s'attache en particulier à :

- ▶ Déterminer les débits caractéristiques d'étiages (influencés) et les occurrences des étiages historiques sévères sur le Rhône et ses grands affluents ;
- ▶ Identifier quels ont pu être les processus prépondérants dans la genèse des étiages, au niveau météorologique et hydrologique.

Cette étude se fonde uniquement sur l'analyse des débits mesurés, et donc influencés.

Après une présentation générale de l'hydrologie et de la climatologie du bassin du Rhône, on expose une **analyse détaillée de quelques épisodes d'étiages sévères particuliers**. Cette analyse retrace la genèse de quelques épisodes historiques et permet de comprendre quels ont été les causes climatiques et hydrologiques de ces épisodes.

Dans la suite, on analyse de manière plus générale les processus ayant conduit aux étiages du Rhône. On discute en particulier des questions suivantes :

- ▶ Qu'en est-il des durées et des intensités des périodes d'étiages ? Les épisodes d'étiage sont-ils plutôt des événements courts et intenses, ou bien des déficits de longues durées ?
- ▶ Comment se propage une situation d'étiage de l'amont vers l'aval du Rhône ? Une année sèche l'est-elle sur tous les tronçons du Rhône et sur tous ses affluents ?
- ▶ Existe-t-il une saisonnalité des étiages du Rhône ? A quelles périodes de l'année ont lieu les étiages ?
- ▶ Quelle est la contribution des différents affluents aux étiages du Rhône ? Cette part est-elle très variable d'une année sur l'autre ?
- ▶ Quelles sont les principales causes climatiques des épisodes d'étiage du Rhône ?
- ▶ Détecte-on une tendance historique sur les étiages à l'échelle du bassin du Rhône ?
- ▶ Détecte-on un lien entre les étiages du Rhône et le niveau de sa nappe alluviale ?
- ▶ Et enfin, peut-on définir une typologie de ces épisodes d'étiages ?

Cette analyse se concentre sur les basses eaux du Rhône, avec la prise en compte des affluents comme facteurs explicatifs de ces épisodes.

Un dernier chapitre traite également de quelques épisodes d'étiage des affluents eux-mêmes.

1. INTRODUCTION

1.1 POINTS D'ÉTUDE

La présente analyse porte sur les étiages du Rhône et de certains de ses principaux affluents. L'analyse sera menée au droit :

- ▶ des **six points SDAGE sur le Rhône français** (Pouigny, Lagnieu, Ternay, Valence, Viviers, Beaucaire) ;
- ▶ et des sept points de référence de l'étude sur les affluents :
 - l'Arve à Arthaz ;
 - le Fier à Motz ;
 - le Guiers à Belmont ;
 - la Bourbre à Tignieu ;
 - la Saône à Couzon Mont d'Or ;
 - l'Isère à Beaumont Monteux ;
 - la Durance à Cadarache.

L'échelle spatiale d'analyse est donc basée sur :

- ▶ Le découpage du bassin du Rhône français en surfaces contributives aux points SDAGE, présenté Figure 1 ;
- ▶ Le **sous-découpage du bassin du Rhône français en « sous-bassins »**, sous-découpage clé de l'étude, prenant en compte les six points nodaux, les sept points de référence et les centrales nucléaires. Il est rappelé que ces entités géographiques constituent des surfaces contributives à des tronçons du Rhône (avec une différenciation rive gauche/rive droite), et non exactement des sous-bassins versants. Ce sous-découpage est présenté Figure 2.

Figure 1 : Carte des surfaces contributives aux points SDAGE du Rhône

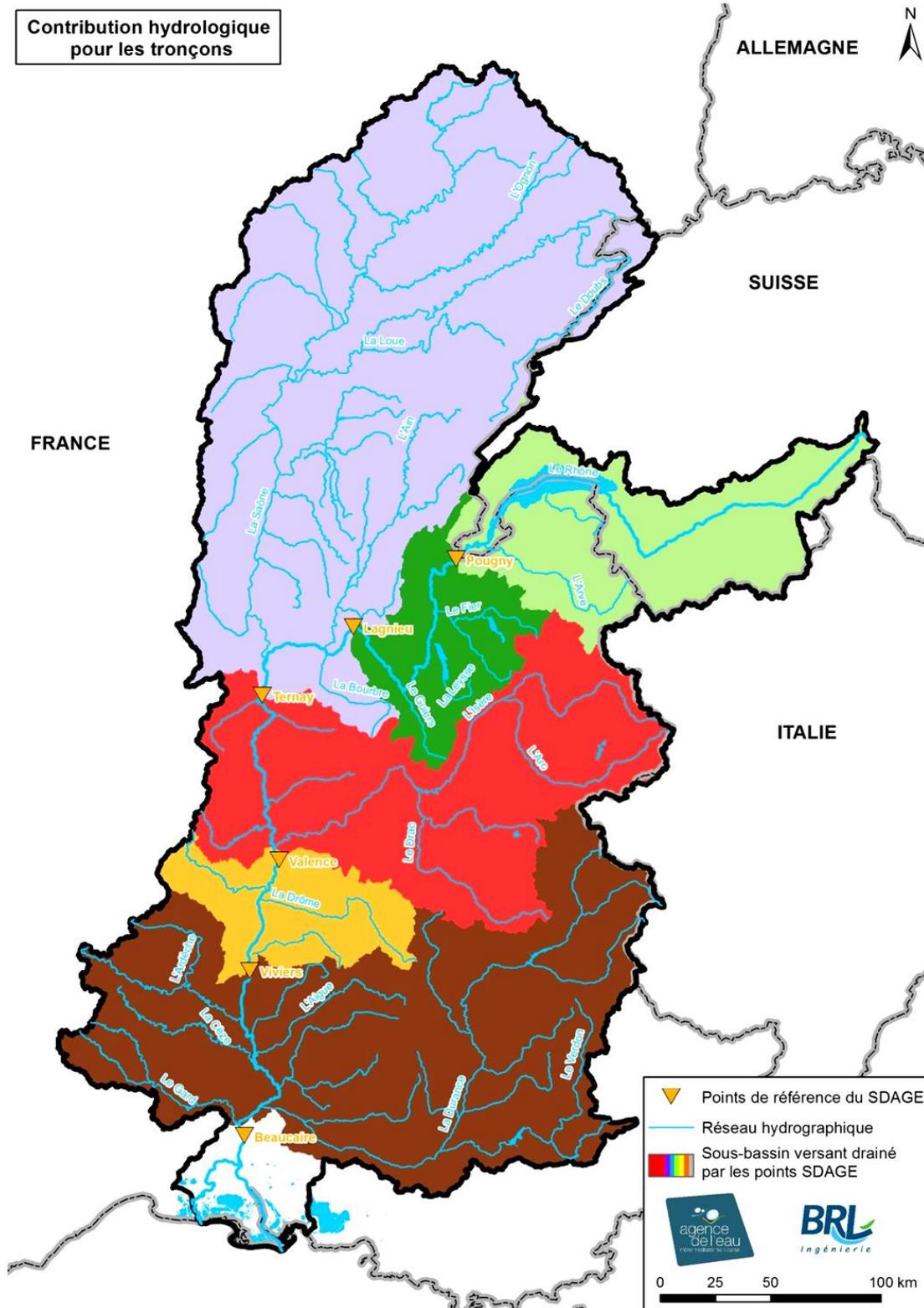
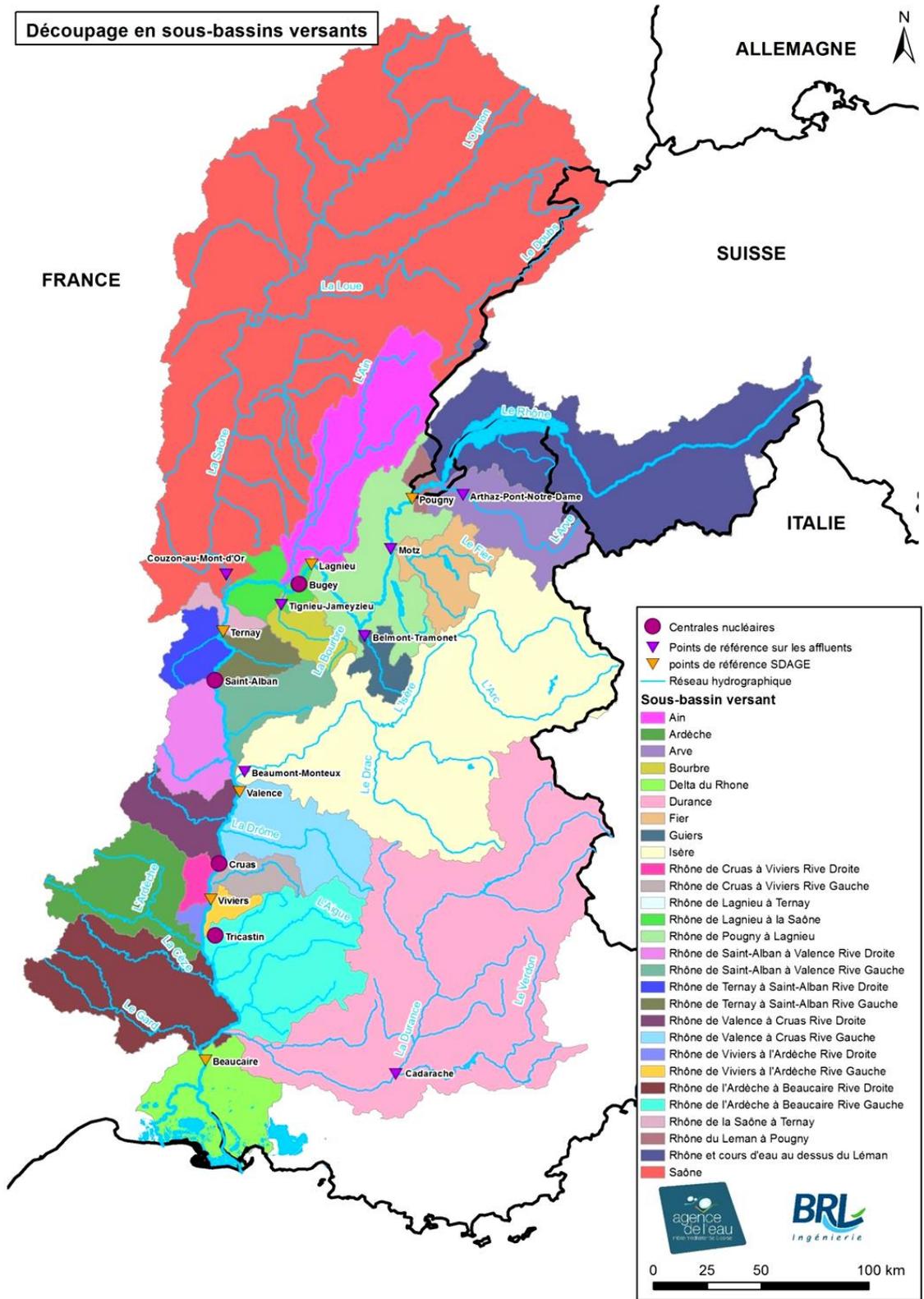


Figure 2 : Carte du découpage du bassin du Rhône en «sous-bassins »



1.2 DONNÉES UTILISÉES

Les **données hydrométriques** mesurées utilisées sont les débits journaliers **mesurés** fournis par les gestionnaires (DREAL, EDF, CNR), au droit des 13 points d'étude. La disponibilité de ces données historiques est rappelée sur la Figure 4.

Les **données météorologiques** utilisées sont les données de précipitations liquide et solide, de température et d'évapotranspiration potentielle (ETP) journalières de la base SAFRAN fournie par Météo-France. Elles couvrent la période 1958-2011, sur un maillage de 8 km par 8 km. **Elles concernent uniquement la partie française** du bassin versant.

Nous ne disposons pas de données météorologiques équivalentes pour la partie suisse du bassin du Rhône. Des demandes sont en cours pour la suite de l'étude.

Pour mener à bien l'analyse des étiages du Rhône, et combler ce manque d'information, on considérera les débits du Rhône à Pougny comme indicateurs de la climatologie du bassin du Rhône en Suisse (et du bassin de l'Arve) (voir Figure 3).

Figure 3 : Sous-bassin versant contributif du Rhône à Pougny, englobant principalement le bassin versant du Rhône et Suisse et le bassin versant de l'Arve.

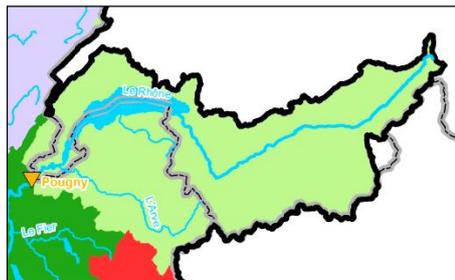
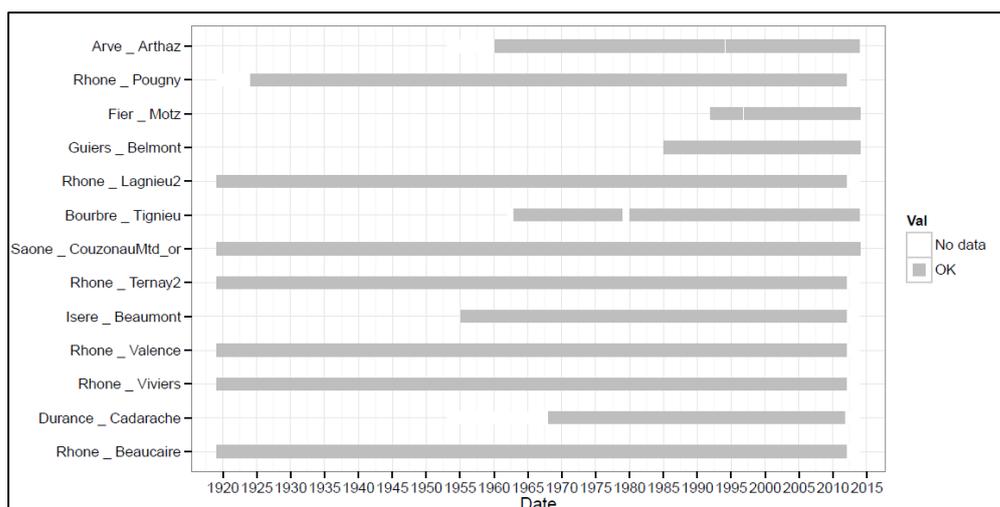


Figure 4 : Données hydrométriques journalières disponibles aux points de référence de l'étude



1.3 INDICATEURS HYDROLOGIQUES

Un ensemble d'indicateurs de régimes hydrologiques et d'étiages ont été calculés et alimentent l'étude des étiages du Rhône et de ses affluents. Les définitions de ces indicateurs sont rappelées dans le tableau suivant. Les indicateurs demandés dans le CCTP au droit des 13 points d'étude sont donnés en Annexe 1.

Tableau 1 : Présentation des indicateurs hydrologiques utilisés dans le présent rapport

Débits annuels	
Module	Moyenne des débits sur toute la période
Débits mensuels	
	Débits mensuels interannuels Débits moyens de chaque mois, calculés sur toute la période (1980-2011 ici)
Indicateur Basses eaux	Débits mensuels quinquennaux secs Pour chaque mois, est calculé le débit mensuel de fréquence de non-dépassement de 0,2 (Période 5 ans). 4 années sur 5, le débit mensuel du mois est supérieur au débit quinquennal sec de ce mois.
Indicateur Basses eaux	Débits mensuels décennaux secs Pour chaque mois, est calculé le débit mensuel de fréquence de non-dépassement de 0,1 (Période 10 ans). 9 années sur 10, le débit mensuel du mois est supérieur au débit quinquennal sec de ce mois.
Indicateur Basses eaux	QMNA Plus petit débit mensuel de chaque année
Indicateur Basses eaux	QMNA5 QMNA de période de retour 5 ans. 4 années sur 5, le plus petit débit mensuel dépasse le QMNA5 ; 1 année sur 5, le plus petit débit mensuel sous-passe le QMNA5.
Indicateur Basses eaux	QMNA2 QMNA de période de retour 2 ans
Débits journaliers	
	Débits journaliers interannuels Pour chaque jour de l'année (de 1 à 365), est calculée la moyenne des débits de ce jour, sur toute la période (1980-2011 ici)
	Débits 10 jours Moyennes glissantes des débits journaliers sur 10 jours
Indicateur Basses eaux	VCN10 Plus petit débit moyen sur 10 jours de chaque année
Indicateur Basses eaux	VCN10_2ans VCN10 de période de retour 2 ans. Une année sur deux, le VCN10_2ans est dépassé.
Indicateur Basses eaux	VCN10_5ans VCN10 de période de retour 5 ans. 4 années sur 5, le VCN10 est supérieur au VCN10_5 ; 1 année sur 5, le VCN10 est inférieur au VCN10_5.
Indicateur Basses eaux	VCN10_10ans VCN10 de période de retour 10 ans.
Indicateur Basses eaux	VCN3 Plus petit débit moyen sur 3 jours de chaque année
Indicateur Basses eaux	VCN3_T VCN3 de période de retour T ans

Remarque : les indicateurs statistiques de basses eaux (VCNX_T, QMNA_T,...) ont été calculés sur des années hydrologiques adaptées aux régimes hydrologiques de chaque cours d'eau (année encadrant l'étiage), et ont été calculés par ajustement sur une loi log-normale. Ces indicateurs ont été calculés sur la période 1980-2011, période pour laquelle les 13 stations de référence présentent moins de 3 % de lacune en débits journaliers.

2. QUELQUES GRANDS ORDRES DE GRANDEURS DE L'HYDROLOGIE DU RHÔNE ET SES AFFLUENTS

Dans ce chapitre, on présente une vue d'ensemble des régimes hydrologiques et des ordres de grandeurs des débits d'étiage et des variables climatiques du bassin du Rhône.

Les chiffres utilisés sont issus d'une première analyse des données hydrométriques disponibles. Une analyse plus fine de ces données et de leur fiabilité est menée parallèlement et est présentée dans un rapport thématique de phase 2.

2.1 LES RÉGIMES HYDROLOGIQUES DU RHÔNE

Le bassin du Rhône dans sa globalité présente une grande diversité physique et climatique qui lui confère des **apports glaciaire, nival et pluvial, contribuant à une hydrologie complexe mais un régime saisonnier assez régulier.**

Les figures des pages 12-14 donnent un aperçu des **régimes hydrologiques influencés** au droit des six points nodaux du Rhône et des principaux affluents du Rhône. Sont représentés les débits mensuels statistiques¹ à chaque station, calculés sur la période 1980-2011.

EN SUISSE

Le Rhône alpestre est caractérisé par un régime hydrologique nival-glaciaire présentant de forts débits en été et des étiages marqués en hiver.

Du fait de la régulation du lac et des apports de ces affluents, les débits mensuels du Rhône en sortie du Léman sont lissés, avec des débits moyens de l'ordre de 200-250 m³/s d'octobre à mai et un débit mensuel maximum de 350 m³/s au mois de juillet.

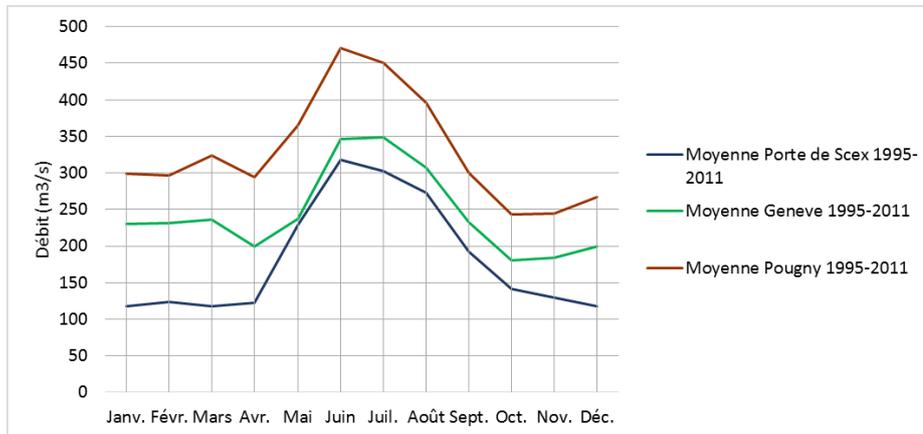
Le premier affluent important limitrophe du Rhône est l'Arve. Ses apports sont soumis à un régime nival-glaciaire, avec de hauts débits liés à la fonte des neiges dès mai. Son module est de 70 m³/s avec une forte amplitude mensuelle et des débits moyens compris entre 35 et 120 m³/s.

A Pougny, le module du Rhône est de 340 m³/s et les débits moyens de juin-juillet sont de l'ordre de 350 m³/s.

En phase 1, une fiche sur le Rhône alpestre a été produite et détaille le régime hydrologique et les fluctuations du Rhône à l'amont et à l'aval du Léman, à différentes échelles de temps.

¹ Les débits statistiques (débits mensuels quinquennaux et décennaux, QMNA_T, VCNx_T) ont été calculés à partir d'un ajustement sur la loi log-normale.

Figure 5 : Débits moyens mensuels interannuels [1995-2011] des débits à Porte de Scex (amont Léman) ; à Genève (aval Léman) et à Pougny (aval confluence Arve).



EN FRANCE

Le Rhône au niveau de la première station de référence, Pougny, est caractérisé par un régime nival avec de hauts débits liés à la fonte des neiges en juin et juillet et des étiages hivernaux, soutenus par la régulation du Léman. D'un module de **340 m³/s** (20 % des débits du Rhône à Beaucaire), il présente une assez grande amplitude mensuelle, avec des débits mensuels moyens compris entre 250 et 500 m³/s. **Sa contribution à Beaucaire en août est forte, elle représente 42 % des débits en moyenne.**

Entre la seconde station SDAGE et Pougny, **le Rhône à Lagnieu** est caractérisé par un régime transitoire pluvio-nival dû à ses affluents que sont le Fier et le Guiers, avec des hauts débits hivernaux et des étiages estivaux. D'un module de **472 m³/s**, il présente une grande amplitude mensuelle (entre 700 et 1 700 m³/s).

Après la confluence avec l'Ain et la Saône, **le Rhône à Ternay** présente un régime pluvial océanique, avec de hautes eaux hivernales, et de bas débits estivaux, dû notamment aux apports de ces deux grands affluents. Le module du Rhône à Ternay est de **1 054 m³/s** et représente plus de 40 % des débits à Beaucaire en moyenne interannuelle par rapport à la précédente station. La Figure 11 met en évidence la forte saisonnalité des débits contributifs des affluents de ce tronçon. Le module de la **Saône** est de **434 m³/s**, soit **26 % des débits à Beaucaire ce qui en fait l'un des affluents les plus contributeurs aux débits du Rhône.**

Le Rhône à Valence présente également un régime pluvial, avec un module de **1 400 m³/s**, et une période de basses eaux située de la fin de l'été au début de l'automne. Il représente 83 % des débits à Beaucaire en moyenne et 92 % en août. Le principal affluent de ce tronçon est l'**Isère**, affluent de régime nival, avec de hauts débits en avril-mai-juin. Il présente un module de **330 m³/s** soit 20 % des débits à Beaucaire.

Enfin, **le Rhône à Beaucaire** a un module de **1 700 m³/s**, et une période de basses eaux située de la fin de l'été au début de l'automne.

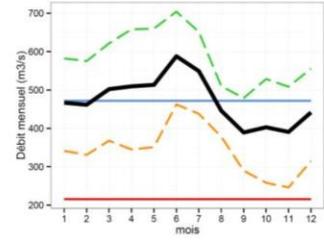
Le tableau suivant synthétise les caractéristiques des différents sous-bassins versants du Rhône (Cf. Figure 2 : Carte du découpage du bassin du Rhône en « sous-bassins ») en termes de superficie et de débit. Les modules interannuels et au mois d'août aux points SDAGE et sur les affluents sont donnés et leur contribution aux débits du Rhône à Beaucaire calculée. On note que certains affluents contribuent plus en été qu'en hiver aux débits, comme l'Arve ou l'Isère, bien que leur module soit plus faible. Cela s'explique par les régimes hydrologiques sous influence nivale des cours d'eaux.

Figure 6 : Modules et débits moyens du mois d'août du Rhône et de ses principaux affluents (calculés sur la période 1980-2011).

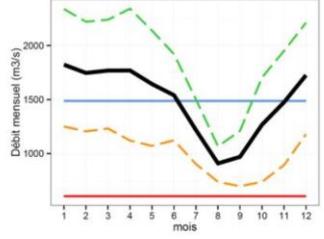
Num sous bassins	Nom des sous bassins	Superficie des sous bassins (km2)	Module interannuel		Débits d'août	
			Module (m³/s)	Part du module du Rhône à Beaucaire (%)	Débit moyen (m³/s)	Part du débit moyen du Rhône à Beaucaire (%)
0abis	BV Rhône Suisse	7 800				
0a	Rhône et cours d'eau au-dessus du Léman	1 262				
1a	Rhône du Léman a Pougny	184				
1b	Arve	2 023	70	4	78	8
0	Rhône à Pougny	11 269	343	20	404	42
2a	Rhône de Pougny a Lagnieu	3046				
2b	Fier	1 376	36	2	14	2
2c	Guiers	609	19	1	8	1
1	Rhône à Lagnieu	1 5380	472	28	446	47
3a	Rhône de Lagnieu a la Saône	810				
3b	Ain	3732				
3c	Bourbe	730	7	0	3	0
4a	Rhône de la Saône a Ternay	338				
4b	Saône	28 753	434	26	134	14
3	Rhône à Ternay	50 560	1 041	62	631	66
5a	Rhône de Ternay au Saint-Alban Rive Droite	785				
5b	Rhône de Ternay au Saint-Alban Rive Gauche	684				
6a	Rhône de Saint-Alban au Valence Rive Droite	1433				
6b	Rhône de Saint-Alban au Valence Rive Gauche	1315				
6c	Isère	11 746	328	20	252	26
4	Rhône à Valence	66 450	1 398	83	879	92
7a	Rhône de Valence a Cruas Rive Droite	1 277				
7b	Rhône de Valence a Cruas Rive Gauche	2 261				
8a	Rhône de Cruas a Viviers Rive Droite	301				
8b	Rhône de Cruas a Viviers Rive Gauche	662				
5	Rhône à Viviers	70 900	1 486	89	908	95
9a	Rhône de Viviers a l'Ardèche Rive Droite	151				
9b	Rhône de Viviers a l'Ardèche Rive Gauche	274				
10a	Rhône de l'Ardèche a Beaucaire Rive Droite	3 754				
10b	Rhône de l'Ardèche a Beaucaire Rive Gauche	3 871				
10c	Ardèche	2 375				
10d	Durance	14 409	153	9	96	10
6	Rhône à Beaucaire	95 590	1 678	100	953	100
11a	Delta du Rhône	2 577				

Régimes hydrologiques du Rhône, de Pougny à Beaucaire
Débits mesurés 1980-2011

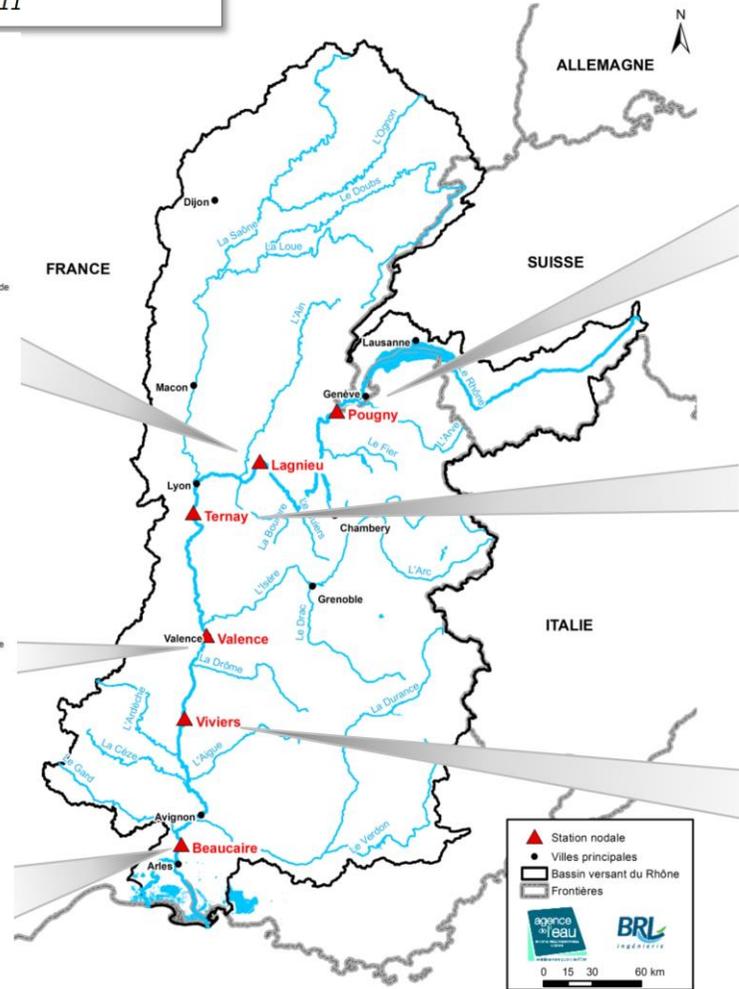
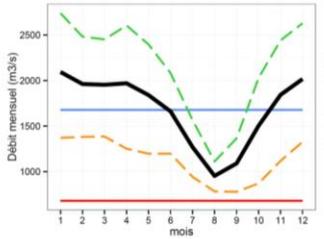
___ Rhône à Lagnieu ___
Superficie BV : 15380 km²
Module : 472 m³/s ; Module spécifique : 31 l/s/km²
QMNA5 : 216 m³/s ; Q_août moyen : 446 m³/s



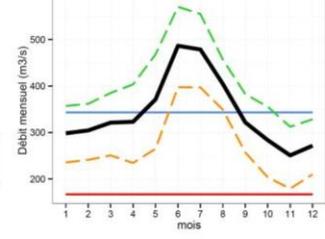
___ Rhône à Viviers ___
Superficie BV : 70900 km²
Module : 1486 m³/s ; Module spécifique : 21 l/s/km²
QMNA5 : 605 m³/s ; Q_août moyen : 908 m³/s



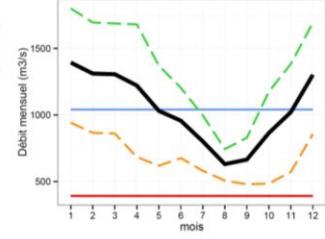
___ Rhône à Beaucaire ___
Superficie BV : 95590 km²
Module : 1678 m³/s ; Module spécifique : 18 l/s/km²
QMNA5 : 680 m³/s ; Q_août moyen : 953 m³/s



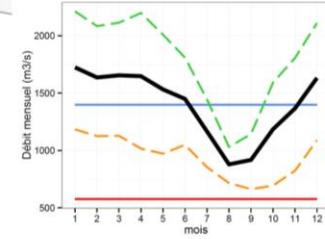
___ Rhône à Pougny ___
Superficie BV : 10320 km²
Module : 343 m³/s ; Module spécifique : 33 l/s/km²
QMNA5 : 167 m³/s ; Q_août moyen : 404 m³/s



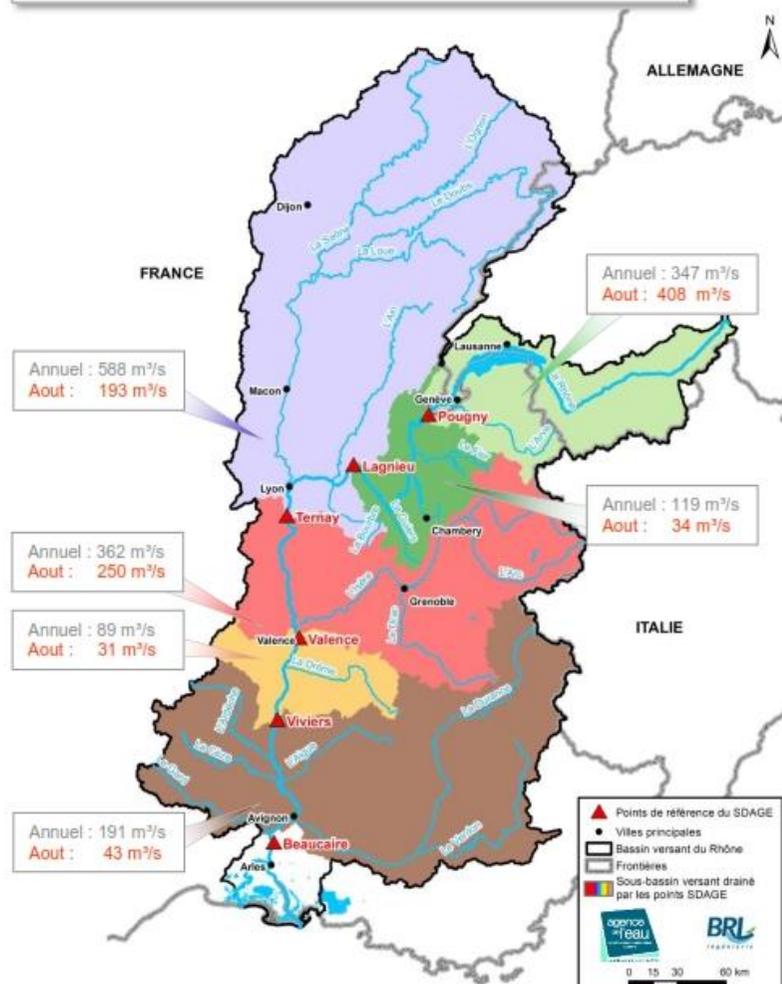
___ Rhône à Ternay ___
Superficie BV : 50560 km²
Module : 1041 m³/s ; Module spécifique : 21 l/s/km²
QMNA5 : 392 m³/s ; Q_août moyen : 631 m³/s



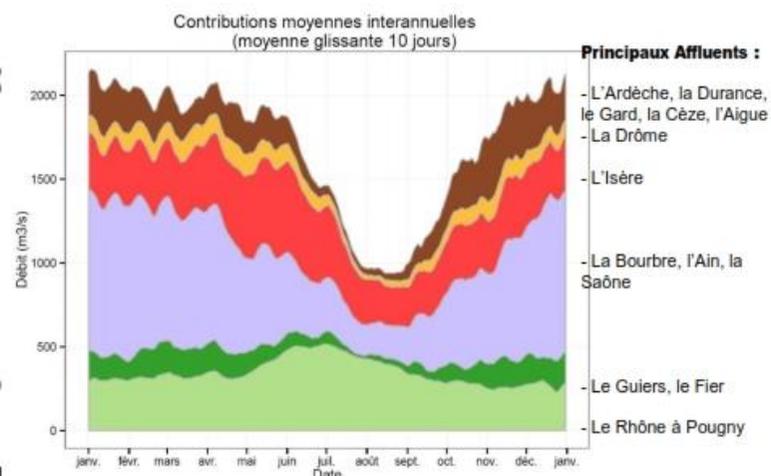
___ Rhône à Valence ___
Superficie BV : 66450 km²
Module : 1398 m³/s ; Module spécifique : 21 l/s/km²
QMNA5 : 577 m³/s ; Q_août moyen : 879 m³/s



**Contributions moyennes aux débits du Rhône (1980-2010) :
Sous-bassins contributifs aux points SDAGE**



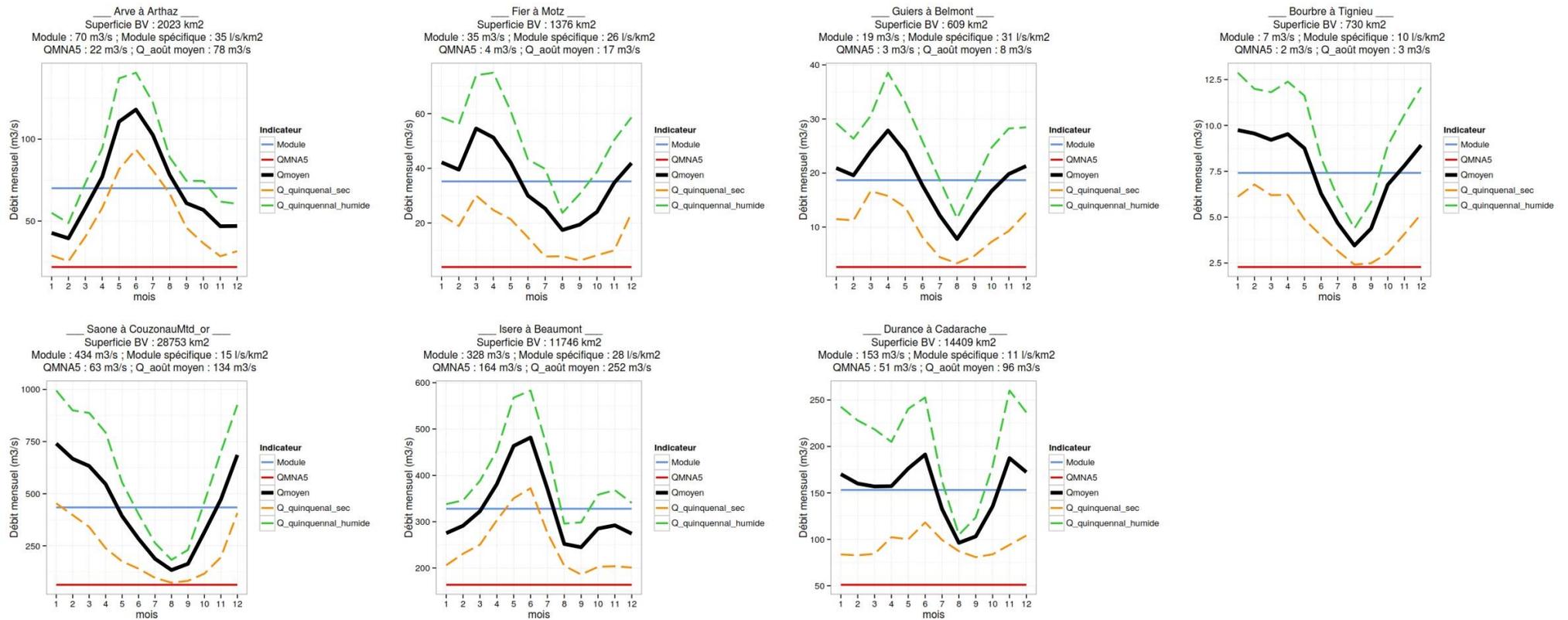
— Contribution moyenne au module
— Contribution moyenne au débit moyen du mois d'Août



Tronçon

- 0_Source - 1_Pougny
- 1_Pougny - 2_Lagnieu
- 2_Lagnieu - 3_Ternay
- 3_Ternay - 4_Valence
- 4_Valence - 5_Viviers
- 5_Viviers - 6_Beaucaire

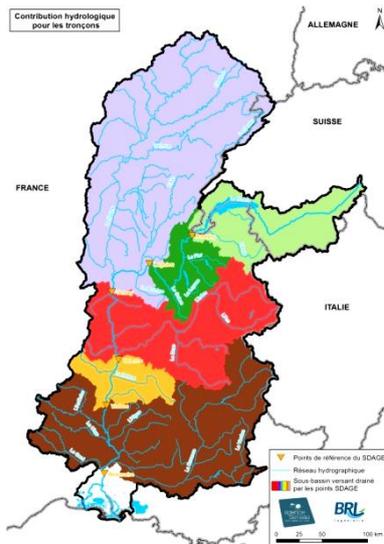
Figure 7 : Régime hydrologique de plusieurs affluents du Rhône, au droit des stations de référence - Débits mensuels interannuels calculés sur 1980-2011



2.2 LES INFLUENCES CLIMATIQUES DU BASSIN DU RHÔNE

L'étude de la diversité climatique permet de mieux appréhender les phénomènes météorologiques qui ont lieu au sein du grand bassin du Rhône, suisse comme français. La climatologie a été étudiée au niveau des sous-bassins contributifs aux stations SDAGE situées sur le Rhône.

Le découpage géographique des surfaces contributives aux points SDAGE est présenté ci-dessous.



Surfaces contributives entre deux points SDAGE	Dénomination
Bassin-versant à Pougny	S1
Pougny à Lagnieu	S2
Lagnieu à Ternay	S3
Ternay à Valence	S4
Valence à Viviers	S5
Viviers à Beaucaire	S6

La climatologie moyenne de ces surfaces contributives est présentée dans les graphiques ci-dessous. Plusieurs indicateurs climatiques ont été calculés :

- ▶ Les précipitations liquides, issues de la BDD Safran ;
- ▶ L'évapotranspiration potentielle (notée ETP) de Penman Monteith, issus de la BDD Safran ;
- ▶ L'estimation du stock de neige sur le bassin versant ;
- ▶ L'estimation de la neige fondue.

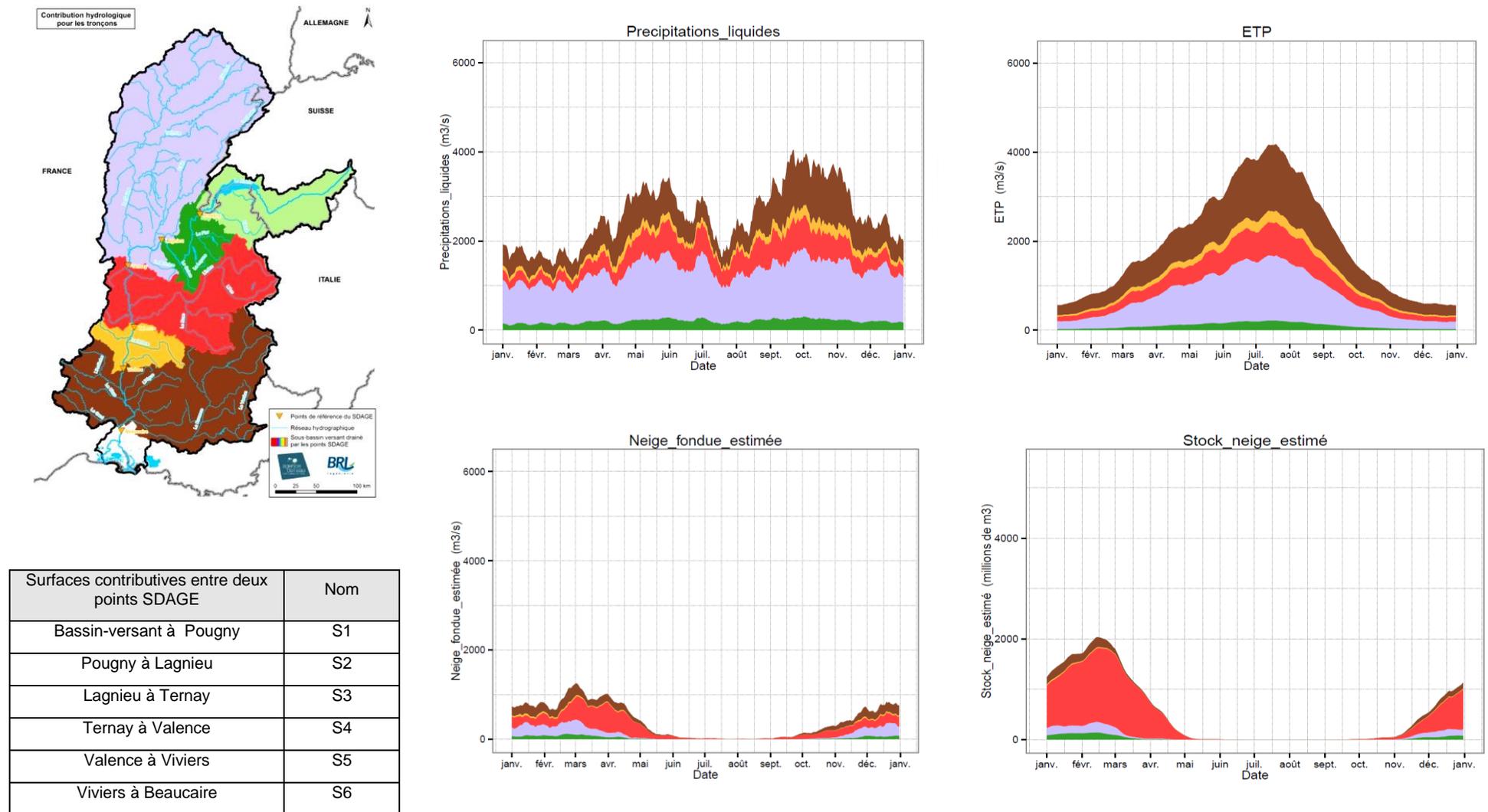
Ces indicateurs sont rapportés en « débits fictifs continus ».

NB1 : Notion de débit fictif continu : Dans le présent rapport, on évoque les variables climatiques de précipitations, ETP et Neige fondue, sous la forme de « débit fictif continu » afin de les rendre directement comparables aux débits et de prendre en compte les surfaces des bassins versants. Le débit fictif continu est calculé comme suit :

$$ETP_dfc \text{ (m}^3\text{/s)} = ETP \text{ (mm/j)} * \text{Surface du bassin (km}^2\text{)} * 1000 / (3600 * 24)$$

NB2 : Estimation de la neige : Les variables « stocks de neige » et « neige fondue » ont été estimées à l'aide d'un modèle degrés-jour simple et des données de température et de précipitations. Elles sont donc soumises à des incertitudes nettement plus importantes mais donnent une première base d'analyse pour la présente étude.

Figure 8 : Indicateurs climatiques des sous-bassins du Rhône français, calculés entre 1980 et 2010



On décrit ci-dessous la climatologie moyenne de ces surfaces contributives aux points SDAGE.

La Figure 8 donne un aperçu des différentes variables climatiques (précipitations, neige fondue, stock de neige ou encore ETP) au droit des surfaces contributives des cinq tronçons nodaux du Rhône, sur la partie française (de Lagnieu à Beaucaire). Les données climatiques sur la partie suisse du bassin du Rhône n'ayant pas été récupérées à ce jour.

La Figure 9 présente les moyennes de précipitations et d'ETP annuelles sur le district Rhône-Méditerranée-Corse.

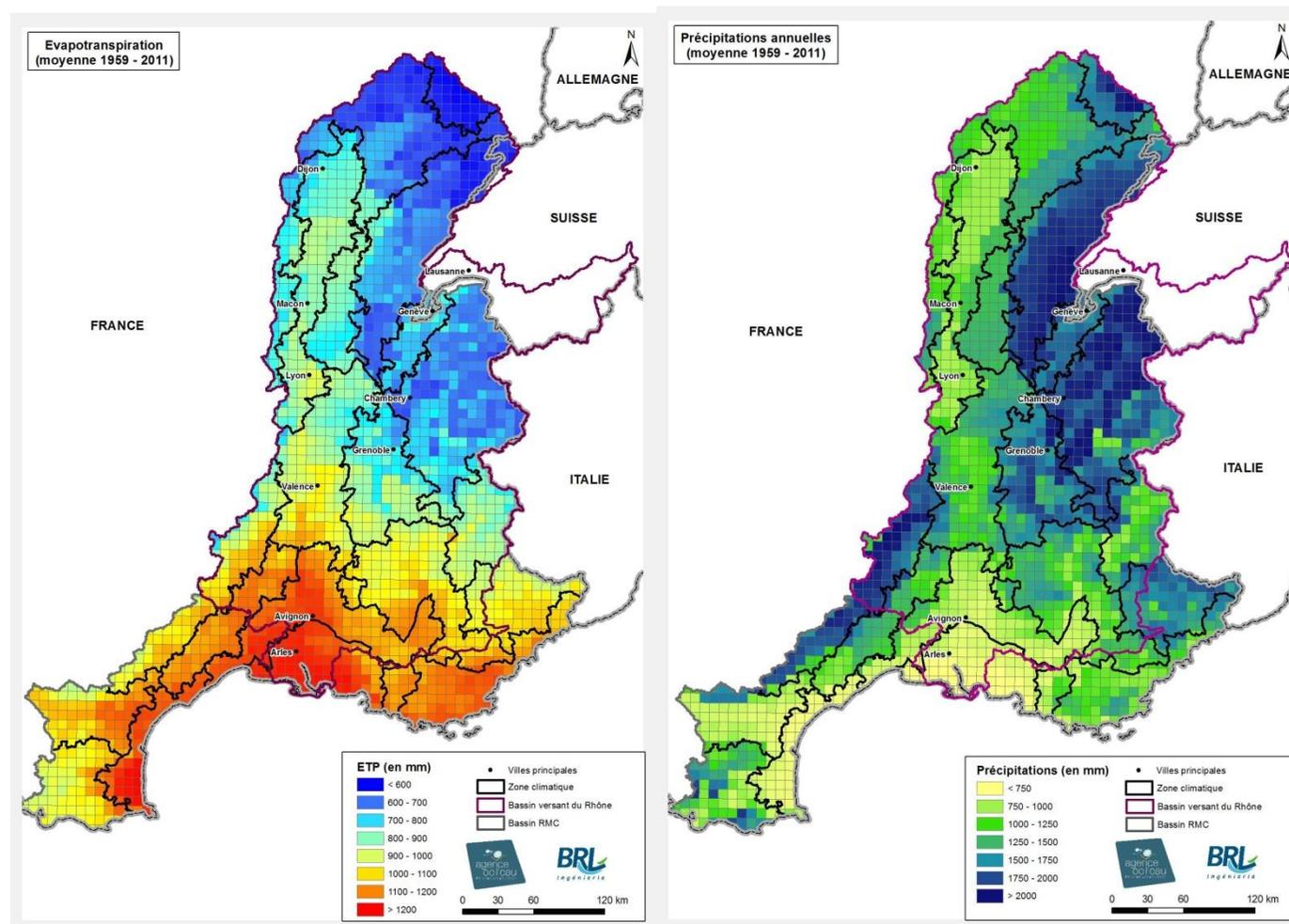
La contribution de la Saône et de l'Ain s'apprécie au niveau de S3 (tronçon à l'amont de Ternay). Ces affluents contribuent fortement aux débits du Rhône à l'hiver et au printemps. En été, l'apport hydrologique de ces affluents est moindre. L'apport d'eau se fait principalement par la pluie avec une moyenne interannuelle de 1 095 m³/s. L'ETP moyenne de mai à septembre s'élève à 1 094 m³/s ; elle est alors du même ordre de grandeur que la pluviométrie.

L'Isère est le principal affluent du Rhône au niveau de S4 (tronçon à l'amont de Valence). L'apport d'eau de cette surface contributive se fait en grande partie par la neige fondue, d'une contribution moyenne de 330 m³/s entre novembre et avril.

L'apport d'eau sur S5 (tronçon à l'amont de Viviers) est principalement dépendant de la pluviométrie, l'apport de neige fondue et le stock de neige estimée étant faible (13 m³/s en moyenne). En été, l'ETP est élevée par rapport aux différentes sources d'apport d'eau liquide sur le tronçon, ce qui explique une faible contribution du Rhône à Viviers en été.

Enfin, S6 (tronçon à l'amont de Beaucaire) se caractérise par une importante pluviométrie annuelle de l'ordre de 670 m³/s/mois et une ETP importante entre mai et septembre, de l'ordre de 1084 m³/s. La neige fondue de novembre à avril est estimée à environ 190 m³/s en moyenne.

Figure 9 : Précipitations et évapotranspirations moyennes sur la période 1959-2011. Données SAFRAN (Météo France)



3. IDENTIFICATION DES ETIAGES SÉVÈRES DU RHÔNE ET DE SES PRINCIPAUX AFFLUENTS

3.1 IDENTIFICATION DES ANNÉES SÈCHES DU RHÔNE

Afin d'identifier les périodes d'étiages sévères ayant marqué l'histoire du Rhône, on représente, au droit des six points de référence, les passages sous des seuils de bas débits caractéristiques : notion de « sous-passement ». Cette analyse porte sur les débits influencés, sur la période 1920-2011.

L'analyse présentée ci-après porte sur des débits moyens sur 10 jours. Les débits seuils considérés sont les VCN10 de périodes de retour 2 ans, 5 ans et 10 ans. L'ensemble des débits seuils demandés dans le CCTP sont présentés dans l'Annexe 1.

Tableau 2 : Débits VCN caractéristiques (influencés) au droit des six points SDAGE sur le Rhône, calculés sur la période 1980-2011

Station	codeBV	Débits caractéristiques (m ³ /s) calculés sur la période 1980-2011		
		VCN10_2	VCN10_5	VCN10_10
Pougy	V1000010	148	119	106
Lagnieu	V1630020	210	170	152
Ternay	V3130020	387	313	280
Valence	V4010010	564	465	421
Viviers	V4530010	604	498	450
Beaucaire	V7200010	670	553	500

Les « sous-passements » de ces seuils sur la période 1920-2011 sont représentés sur la Figure 10. Ils permettent d'identifier les étiages historiques du Rhône, notamment les années 1921, 1934, 1947, 1949, 1962, 1971-72, 1976, 1978, 1989, 2009 et 2011.

La lecture des graphiques précédents permet **d'identifier les années particulièrement sèches sur le Rhône et ses affluents**. Le choix de ces années et la qualification « étiages sévères » sont basés sur la lecture de ces graphiques (notamment : nombres de jours sous les VCN10_5ans et 10ans). La détection des années extrêmes est cohérente avec la bibliographie (Sauquet and Haond, 2003).

Sur la séquence étudiée, **l'année 1921 est l'épisode d'étiage le plus exceptionnel enregistré sur le Rhône**, provoqué par une forte sécheresse climatique. Des bas débits ont été enregistrés sur tout le bassin, pendant une période exceptionnellement longue. **La très longue durée des basses-eaux 2011 est également remarquable**.

Tableau 3 : Identification des années de très bas débits du Rhône et de ses affluents

Années d'étiages historiques							
Fleuve (6 points SDAGE)		Affluents					
Le Rhône	Couzon	Arthaz	Tignieu	Beaumont	Cadarache	Motz	Belmont
Etiages & Etiages Sévères	Saône (depuis 1920)	Arve (depuis 1961)	Bourbre (depuis 1964)	Isère (depuis 1956)	Durance (depuis 1969)	Fier (depuis 1993)	Guiers (depuis 1986)
1921							
	1928						
1932							
1934							
1941							
1945	1945						
1947	1947						
1949	1949						
1953							
1955							
1957				1957			
1959	1959						
1962	1962	1962		1962			
		1963					
1964	1964	1964	1964				
			1966				
			1967				
1969							
1971	1971						
1972	1972						
1973		1973					
	1974						
1976				1976			
1978							
1985	1985						
1989	1989		1989	1989			1989
1990			1990				1990
							1995
			1997				
					2000		
					2002		
2003	2003		2003				2003
							2004
2005					2005		
					2007		
2009	2009		2009	2009		2009	2009
						2010	
2011		2011				2011	

3.2 CHOIX D'UN ÉCHANTILLON D'ANNÉES SÈCHES POUR L'ÉTUDE

Nous ne pouvons examiner en détail l'ensemble des années ayant présenté un étiage marqué depuis 1920, tant cette définition est large et le nombre d'années possibles important. **Parmi ces épisodes, deux jeux d'années sèches ont été sélectionnés.** Le choix s'est porté sur des épisodes d'étiages particulièrement sévères et/ou longs, sélectionnés à partir de la lecture des graphiques précédents et des hydrogrammes.

Un jeu de 14 années sèches a été sélectionné à partir de cette analyse. Il est présenté dans le **Tableau 4** (première colonne). Ce jeu d'année servira de **base à toute l'analyse** déroulée dans le présent rapport. **On le nommera « 14 années sèches » dans la suite du rapport.**

De plus, un **sous-ensemble de 7 années** parmi ces 14 années a été sélectionné également et fera **l'objet d'une étude plus détaillée, présentée au chapitre 4.** Ces années sont présentées dans le **Tableau 4 (seconde colonne).** Pour ces années, on décrira **plus spécifiquement la genèse des étiages**, les conditions climatiques et les déficits des différents affluents, afin d'explicitier les processus passés. **On le nommera « 7 années remarquables » dans la suite du rapport.**

Tableau 4 : Echantillon d'années sèches du Rhône étudiées dans le présent rapport

14 années sèches (étude globale – chapitre 5)	7 années remarquables (étude détaillée – chapitre 4)
1921	1921
1947	
1949	
1962	1962
1964	
1972	1972
1976	1976
1978	
1985	
1989	
2003	2003
2005	
2009	2009
2011	2011

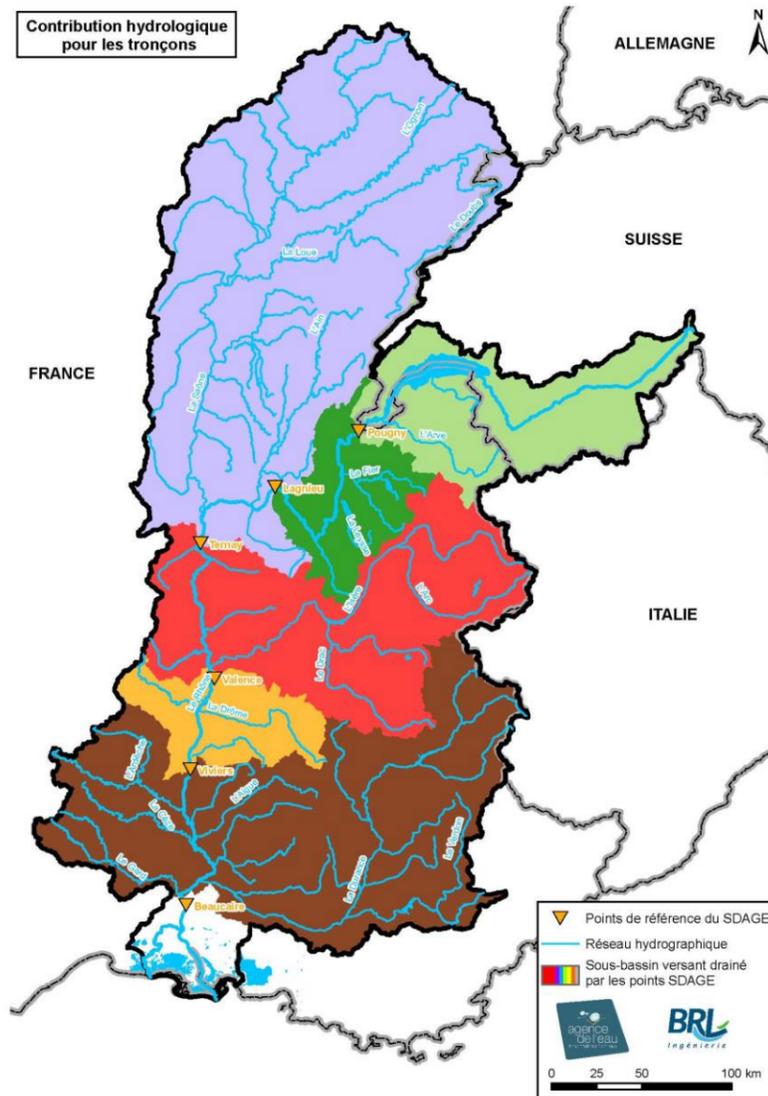
3.3 APERÇU DES ANNÉES SÈCHES : UNE GRANDE VARIABILITÉ HYDROLOGIQUE

Un premier aperçu des 14 années sèches est présenté ci-après. La Figure 11 présente les **hydrogrammes aux niveaux de chaque point SDAGE**, c'est-à-dire la contribution de chaque tronçon aux débits du Rhône. Ces graphes mettent en évidence **la diversité des situations d'étiage : périodes de l'année sujettes aux basses eaux, contributions des différents affluents, etc.**

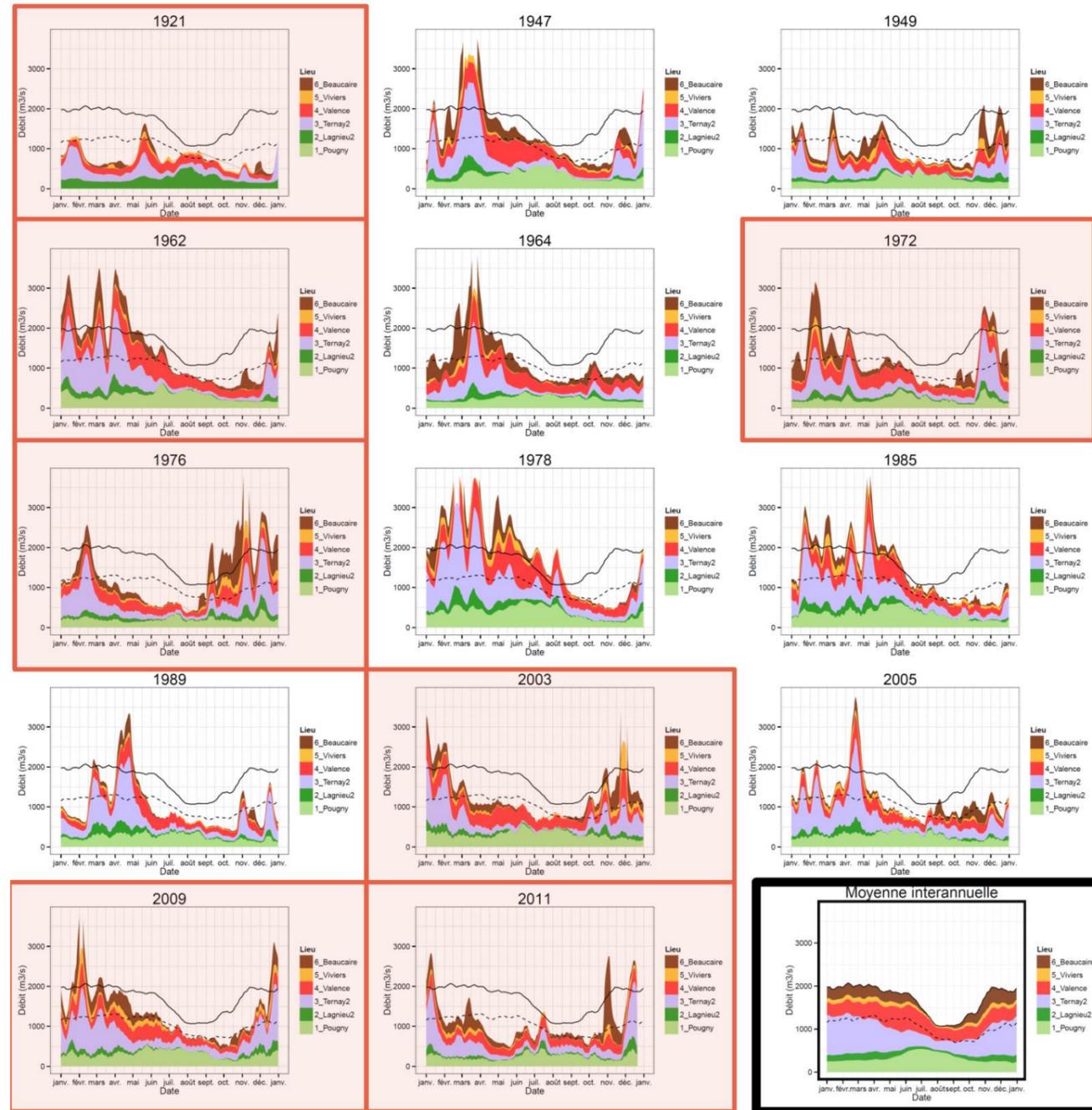
Figure 11 : Débits 10 jours aux points SDAGE, lors des 14 années sèches du Rhône français.

Hydrogrammes (débits 10 jours) des 6 points SDAGE pour les 14 années sèches étudiées

— : Débits moyens interannuels à Beaucaire
 - - - : Débits quinquennaux secs à Beaucaire
 [Echantillon des « 7 années remarquables »]
 [Débits moyens interannuels (sur la période 1980-2011)]



— : débit moyen interannuel (10 jours) à Beaucaire (1980-2011)
 - - - : débit quinquennal sec (10 jours) à Beaucaire (1980-2011)



3.4 TEMPÉRATURES DE L'EAU DU RHÔNE

Référence principale : Etude globale thermique du Rhône, EDF, DRIRE.

Comme évoqué lors de la phase1, sur le bassin du Rhône, le fonctionnement de trois CNPE et d'une centrale thermique se fait en circuit ouvert. L'eau nécessaire au refroidissement de la centrale est prélevée dans un contre-canal dérivant une partie des eaux du fleuve. Ces stations sont contraintes au niveau de la température de prélèvement et de rejet des eaux.

La figure ci-dessous synthétise les données de température sur le fleuve Rhône sur la période [1977-2003] sur les stations thermiques d'EDF. En 2003, on note en plusieurs points du Rhône la plus forte température moyenne annuelle observée depuis 1977. D'autres années semblent avoir connu des températures du fleuve élevées comme 1989, 1990, ou encore 1997 et 2000. On remarque également un important transfert thermique amont-aval du fleuve.

La Figure 13 représente les tendances de l'évolution moyenne sur cinq années consécutives des températures du Rhône. On observe des températures particulièrement élevées pour les périodes [1985-1989] et [2000-2003], comparativement aux autres périodes étudiées. La tendance de ces dernières années est à la hausse des températures. Au niveau de la station d'Aramon les températures de l'eau sont les plus importantes sur le linéaire.

Figure 12 : Cartographie par année et station de la moyenne annuelle de températures du Rhône. Les stations sont classées d'amont en aval. Source EDF.

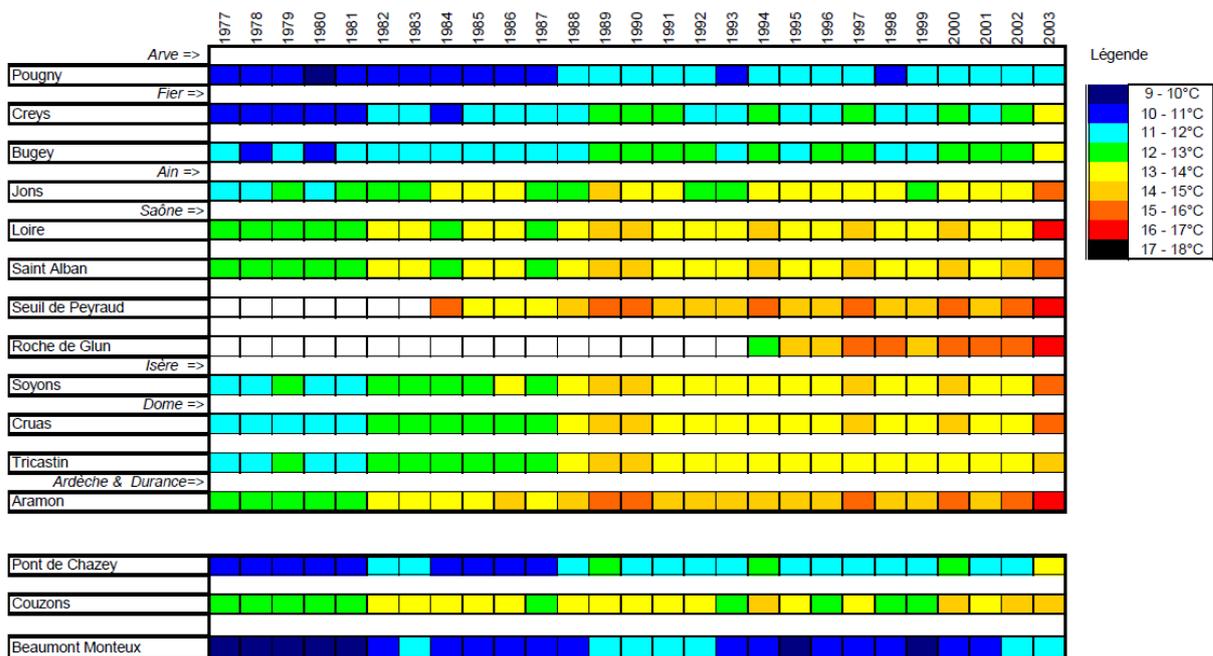
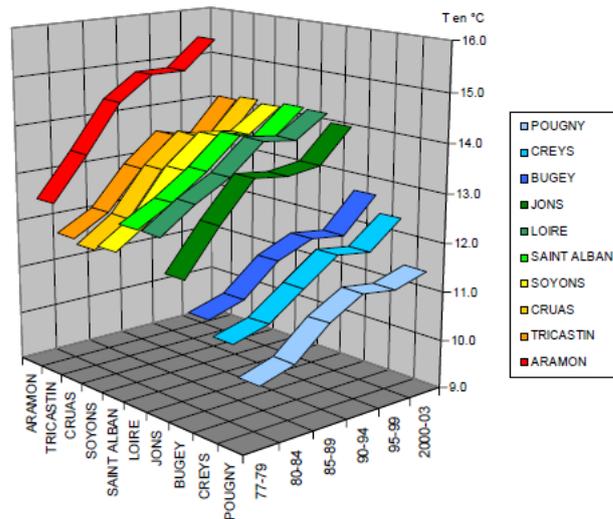
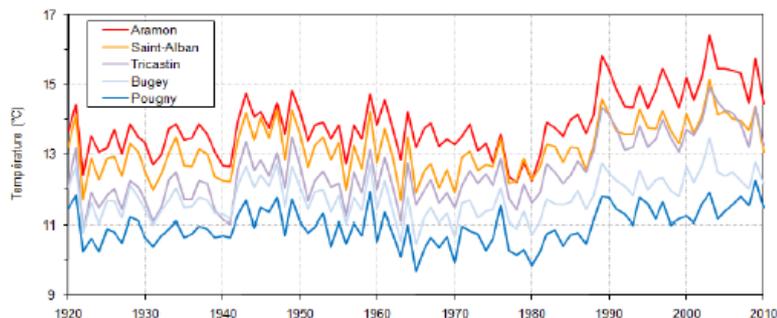


Figure 13 : Evolution moyenne sur 5 années consécutives par stations sur le Rhône. Source EDF



EDF a également reconstitué des séries de température de l'eau du Rhône entre 1920 et 2010 (Figure 14).

Figure 14 : Séries reconstituées des températures de l'eau du Rhône entre 1920 et 2010, moyenne annuelles. Source EDF



Il ressort que :

- ▶ les périodes marquantes par des températures élevées à toutes les stations sont les mois de mai 1990, septembre 1991, juin 2003, juillet 2006, août 2003 et avril 2007 ;
- ▶ la température de l'eau à la station de Pougny présente la plus grande variabilité en été, due essentiellement à l'occurrence des épisodes de goutte froide (sortie d'eau froide depuis le Lac Léman), mais elle présente également la plus faible variabilité en hiver qui peut s'expliquer par l'effet tampon exercé par le lac Léman sur les températures hivernales ;
- ▶ la période qui présente la plus grande hausse de température correspond au mois d'août pour les cinq stations. L'augmentation maximale entre 1920 et 2010 s'élève à + 0,04°C par an, soit + 0,41°C par décennie (station d'Aramon). De plus, l'augmentation semble s'accroître de l'amont vers l'aval du fleuve : la hausse maximum est de +0,12°C/décennie à Pougny (significative à 95 %) tandis qu'on observe +0,25°C/décennie à Bugey et Saint-Alban (significatives à 99 %), +0,32°C/décennie à Tricastin (99 %) et +0,41°C/décennie à Aramon (99 %).

Le croisement de cette étude EDF et de l'analyse des années sèches présentée plus haut, permet d'identifier des années particulières de basses eaux et de fortes températures du Rhône : 1989, 1990 et 2003.

4. ANALYSE DÉTAILLÉE DE SEPT ANNÉES REMARQUABLES DE BASSES EAUX DU RHÔNE

Comment les situations d'étiage se propagent-elles le long du Rhône ? Quels sont les processus de genèse des étiages ? On décrit dans ce chapitre les « 7 années remarquables » de basses eaux du Rhône sélectionnées au chapitre 3, afin de mieux appréhender les processus de bas débits du Rhône, de l'amont vers l'aval.

4.1 ETIAGE DE 1921

L'étiage de 1921 reste l'épisode de très basses eaux le plus exceptionnel enregistré sur le Rhône. Il est caractérisé par de très bas débits sur de longues périodes (sous-passement du VCN10 pendant plus de 70 jours à Viviers), sur tout le linéaire du Rhône.

Dans l'analyse de ces débits, il faut néanmoins garder à l'esprit l'incertitude importante sur les mesures de très bas débits en 1921.

La Figure 15 présente les débits aux points SDAGE pour 1921, et les sous-passements d'indicateurs d'étiage (VCN10_T). La Figure 17, extraite des travaux d'EDF pour l'étude thermique du Rhône (2012), présente les temps de retour des VCN 10 jours et 60 jours atteints en 1921 aux droits de cinq points SDAGE. Elle donne ainsi une vision à la fois spatiale et temporelle de la sévérité de l'étiage.

Figure 15 : Sous-passement des seuils VCN10_T sur le Rhône en 1921 et hydrogrammes de Lagnieu à Beaucaire pour 1921. Les débits glissants sur 10 jours sont considérés.

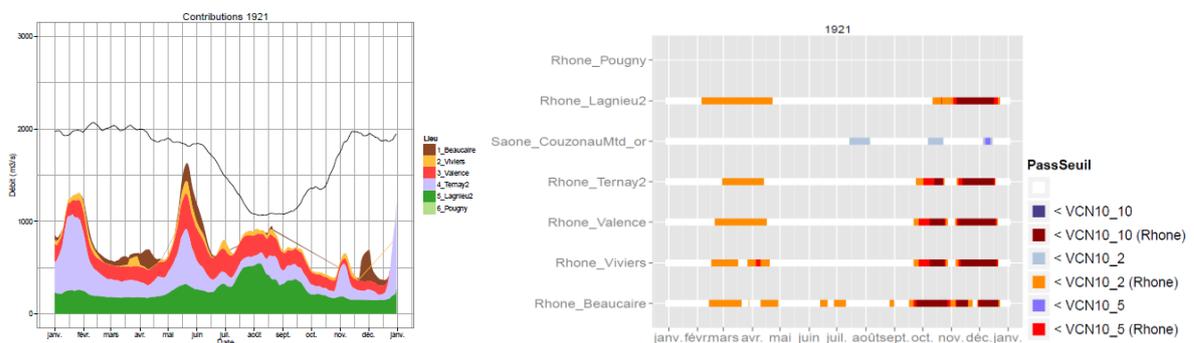
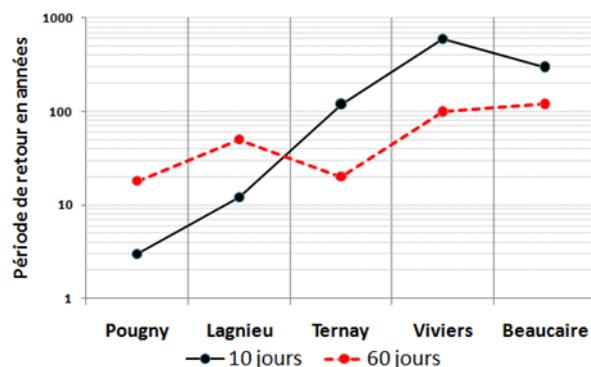


Figure 16 : Etude des périodes de retours des VCN10 et VCN60 du Rhône de Pougny à Beaucaire en 1921.



Source : Etude thermique du Rhône, EDF, 2012

- Dès le **début de l'année 1921**, on constate une situation d'étiage (sous-passement du VCN10_2 pendant plus de deux mois) qui dure et se manifeste dès la station de Lagnieu (pas de mesures à Pougny en 1921). L'étiage se propage jusqu'à Beaucaire sans s'intensifier fortement.

- ▶ En **automne 1921**, dès Lagnieu, le Rhône est en situation d'étiage sévère (sous-passement du VCN10_10), **situation qui se prolonge sur toutes les stations aval jusqu'à Beaucaire**. Cet épisode de très basses eaux dure jusqu'au mois de décembre. D'après les hydrogrammes, **il semble que tous les principaux affluents contribuent à ce déficit hydrique** :
 - Le faible débit du Rhône alpestre est l'une des causes majeures des basses eaux, observables jusqu'à l'aval du bassin ;
 - L'Ain et la Saône apportent une très faible contribution, relativement à leurs débits moyens habituels en mars et en automne ;
 - Les cours d'eau en aval du bassin (de Valence à Beaucaire) semblent apporter également de bas débits sur ces mêmes périodes.
- ▶ Les temps de retours calculés aux stations nodales sont importants et en augmentation jusqu'à Viviers, où le temps de retour est supérieur à la centaine d'années (VCN10). Ces résultats montrent l'augmentation d'intensité de l'étiage de l'amont vers l'aval.

4.2 ETIAGE DE 1962

De septembre à décembre 1962, le Rhône alpestre (Pougny) présente des débits mensuels de temps de retour de l'ordre du quinquennal au décennal sec. **On observe une situation d'étiage marquée à Lagnieu, qui s'intensifie fortement à Ternay**. A la station de Ternay, les débits du Rhône restent inférieurs au VCN10_5 (313 m³/s) pendant presque deux mois (octobre et novembre).

Figure 17 : Sous-passement des seuils VCN10 T sur le Rhône en 1962 et hydrogrammes de Pougny à Beaucaire pour 1962.

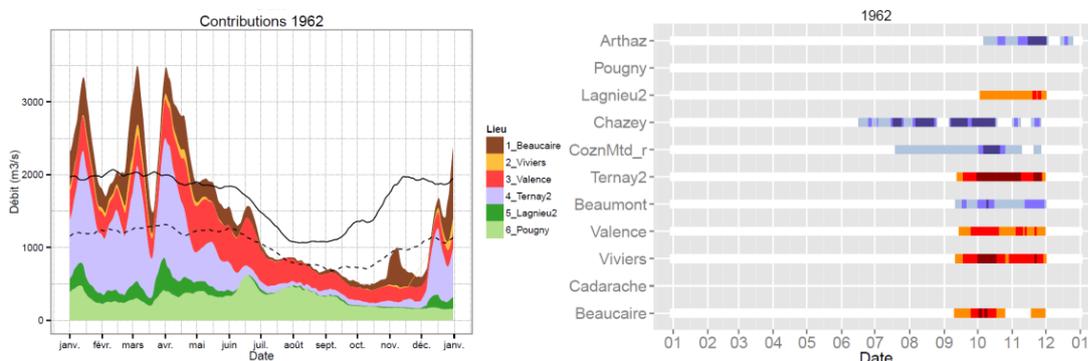
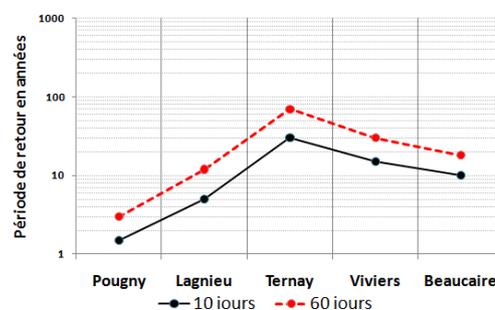


Figure 18 : Etude des périodes de retours des VCN10 et VCN60 du Rhône de Pougny à Beaucaire en 1962.



Source : Etude thermique du Rhône, EDF, 2012.

Les basses eaux du Rhône de l'automne 1962 suivent le schéma suivant :

- ▶ Le Rhône alpestre apporte des débits faibles à l'automne (inférieurs au quinquennal sec mensuel) mais ne constitue pas la cause prépondérante de l'étiage de 1962 ;
- ▶ Les affluents français de l'amont du bassin (principalement la Saône et l'Ain) présentent des déficits importants et contribuent fortement à l'étiage sévère du Rhône en 1962. En octobre 1962, l'Ain à Chazey apporte en moyenne 10 m³/s et la Saône à Couzon 30 m³/s, soit, pour ces deux affluents, 10 % des débits moyens interannuels pour octobre.
Ces faibles apports des affluents semblent dus principalement à **de faibles précipitations** : les précipitations sur le tronçon Pougny-Lagnieu sont d'environ 30 % des moyennes saisonnières pour cette période.
- ▶ Les apports de l'Isère à Beaumont sont faibles également et les débits du Rhône au niveau de Valence, puis Viviers, restent faibles.
- ▶ Des apports d'affluents à l'aval du bassin au début du mois de novembre – liés à d'importantes précipitations - modèrent l'étiage au niveau de Beaucaire.

En conséquence, on observe donc un étiage modéré en amont, qui s'amplifie fortement au fil de l'eau à partir de Ternay, et est temporisé en fin de parcours grâce aux apports des affluents à l'aval du bassin.

Le déficit de précipitations sur la partie haute de bassin français (Fier, Guiers et surtout Ain et Saône) semble être la cause prépondérante de cet épisode de basses eaux.

4.3 ETIAGE DE 1972

L'épisode de basses eaux de 1972 n'est pas d'une même intensité à l'amont et à l'aval du Rhône français. **L'étiage de 1972 est particulièrement sévère à l'amont du bassin français, avec de très bas débits à Pougny et Lagnieu observés en octobre.** On observe des débits inférieurs au VCN10_10 ans pendant quasiment tout le mois d'octobre à Pougny et à Lagnieu.

Les affluents français jouent un double rôle dans l'évolution de la situation d'étiage vers l'aval :

- ▶ Les faibles apports de certains affluents en août et septembre – principalement de la Saône – créent une situation d'étiage marquée à partir de Ternay. Ces faibles apports sont liés à de basses précipitations sur ces bassins (voir Figure 19).
- ▶ **Un apport en octobre des affluents - notamment l'Isère et la Durance - permet de modérer l'étiage du mois d'octobre** : l'étiage du mois d'octobre reste important à Ternay (basses eaux de la Saône) puis devient plus modéré à partir de Valence. Cet apport aval est provoqué notamment par de fortes précipitations de Vivier à Beaucaire (35 % au-dessus de la moyenne interannuelle pour le mois d'octobre).
- ▶ Ces observations sont confirmées par la Figure 20 où l'on note des temps de retours très importants dès Pougny qui diminuent fortement jusqu'à Beaucaire, de la centaine d'années à six ans, traduisant une diminution de l'intensité de l'étiage.

En conséquence, on observe donc

- ▶ un étiage très sévère du Rhône français amont (Pougny-Lagnieu) en octobre 1972 ;
- ▶ **Un étiage plus modéré mais plus long du Rhône aval (Ternay-Viviers) de mi-août à fin-octobre 1962.** A Beaucaire, les débits du mois d'octobre redeviennent plus hauts grâce aux affluents situés le plus à l'aval (dont la Durance).

Ces basses eaux sont provoquées notamment par :

- ▶ Un faible apport du Rhône alpestre ;
- ▶ Des précipitations assez basses sur le bassin de la Saône notamment.

Figure 19 : Sous-passement des seuils VCN10_T sur le Rhône et hydrogrammes de Pougny à Beaucaire pour 1972 (débits glissants sur 10 jours).

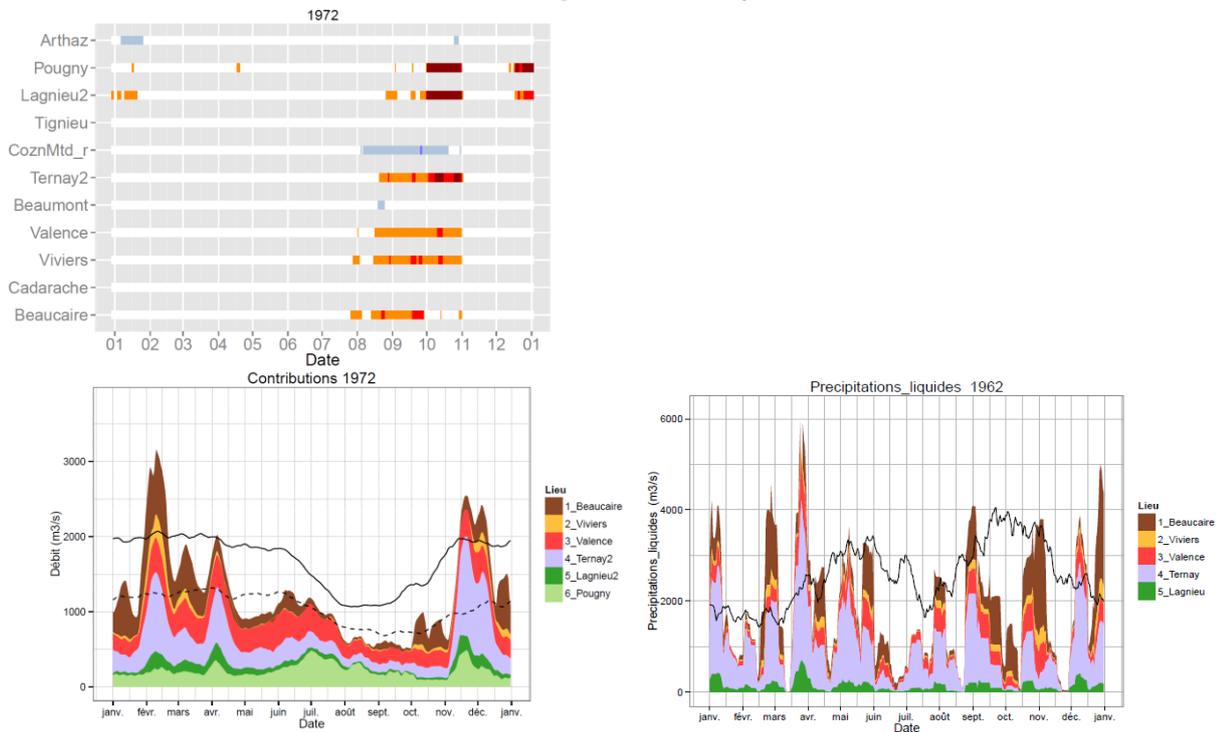
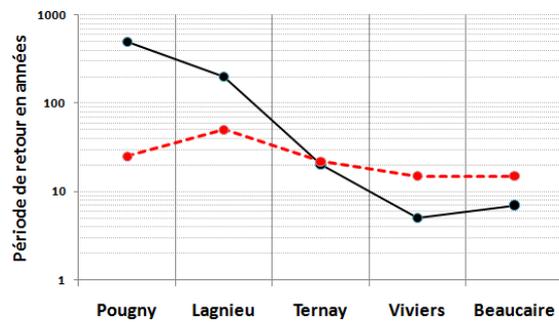


Figure 20 : Etude des périodes de retours des VCN10 et VCN60 du Rhône de Pougny à Beaucaire en 1972



Source : Etude thermique du Rhône, EDF, 2012

4.4 ETIAGE DE 1976

L'année 1976 est marquée par un épisode de très bas débits durant la période estivale, de mai à août principalement.

- ▶ **Une cause prépondérante de ces faibles débits du Rhône semble être les faibles débits du Rhône alpestre**, à leur période habituelle de hauts débits liés à la fonte. En juin et août, les débits à Pougny sont de 180 et 170 m³/s, soit **50 % des débits décennaux secs de ces mois**.
- A cette période de l'année, les débits du Rhône alpestre contribuent habituellement à environ 40 % des débits du Rhône à Beaucaire. **Un tel déficit à l'été 1976 entraîne de basses eaux sur tout le linéaire du Rhône.**
- ▶ En outre, l'Ain, la Saône et l'Isère se montrent également nettement déficitaires pendant l'été 1976, amplifiant ainsi l'étiage observé à l'amont.
 - ▶ Les basses eaux des affluents sont la résultante :
 - d'un fort déficit de précipitations au début de l'été 1976, notamment à l'amont du bassin (de Pougny à Ternay, les précipitations du mois de juin atteignent 10 % des moyennes interannuelles) ;
 - d'une évapotranspiration particulièrement élevée en juin (sur les bassins de la Saône et l'Ain, l'ETP est d'environ 65 % supérieure à la moyenne interannuelle).
 - ▶ A Beaucaire, les débits journaliers restent inférieurs au VCN10_5ans (550 m³/s) pendant tout le mois d'août.

Figure 21 : Sous-passement des seuils VCN10_T sur le Rhône et hydrogrammes de Pougny à Beaucaire pour 1976 (débits glissants sur 10 jours).

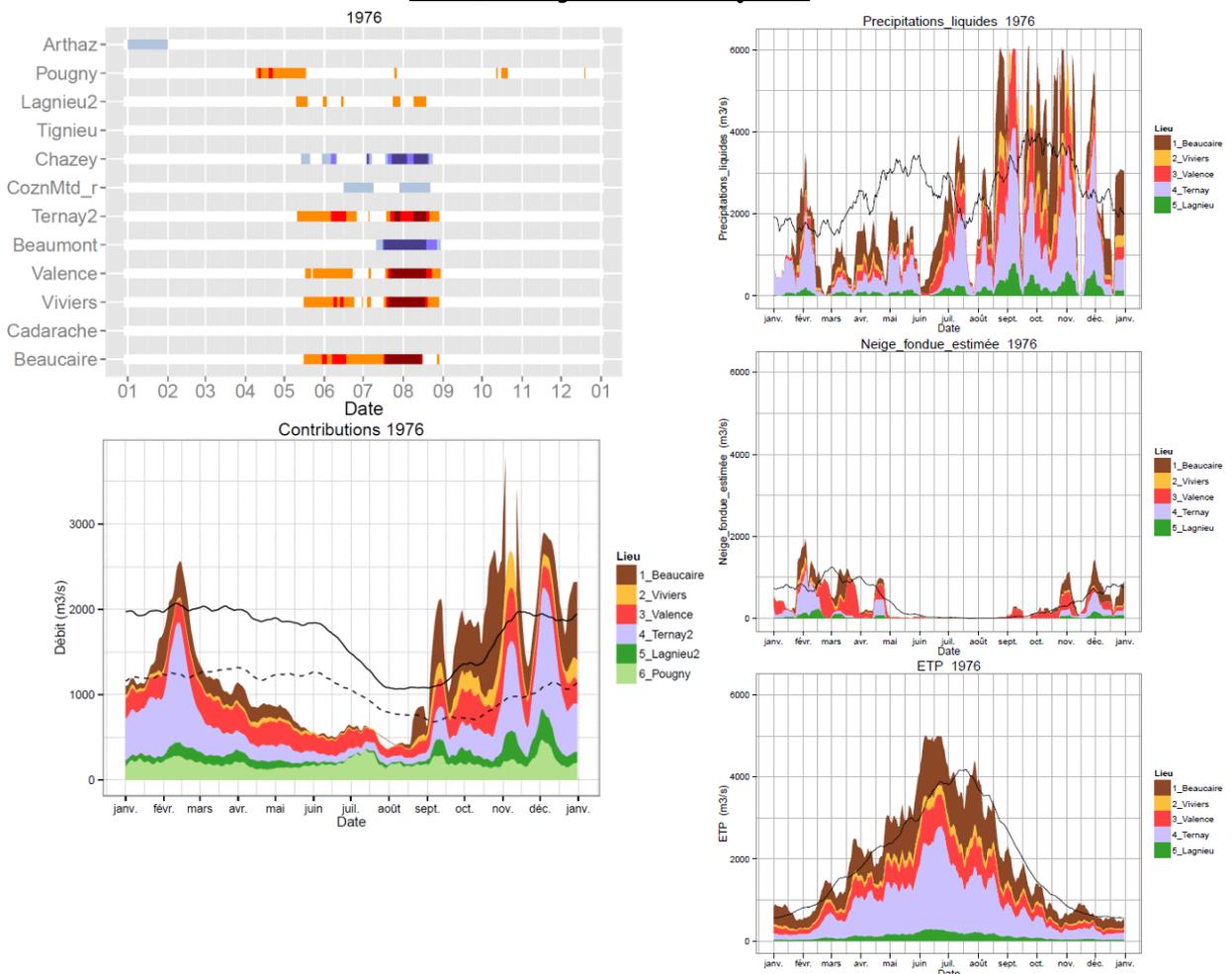
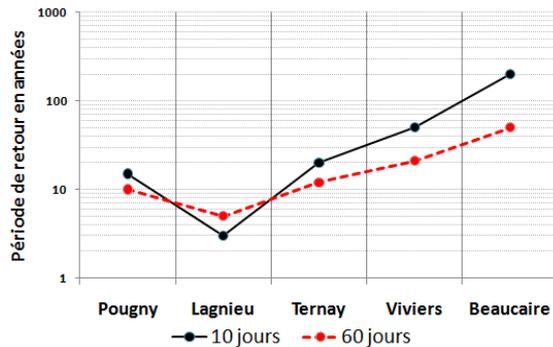


Figure 22 : Etude des périodes de retours des VCN10 et VCN60 du Rhône de Pougny à Beaucaire en 1976



Source : Etude thermique du Rhône, EDF, 2012.

4.5 ETIAGE DE 2003

L'année 2003 est considérée comme une année remarquable. Elle a marqué l'opinion par une canicule estivale intense et longue. On a observé cette année-là des eaux particulièrement chaudes qui ont entraîné des difficultés pour gérer les CNPE tout en respectant les seuils réglementaires de température. Hydrologiquement parlant, on note en 2003 des étiages très sévères sur de nombreux cours d'eau et en particulier la Saône. **Le Rhône lui-même a connu un étiage important mais relativement plus modéré, grâce à l'apport des débits de fonte (Rhône alpestre et Isère).**

- ▶ A l'été 2003, le Rhône alpestre apporte des débits de l'ordre de 400 m³/s (en moyenne sur juillet-août supérieurs aux débits quinquennaux secs de ces mois).
- ▶ En raison des très faibles apports du Guiers, de la Bourbre et surtout de la Saône (Figure 23), les débits du Rhône à Ternay restent de l'ordre de 455 m³/s en juillet-août (soient légèrement inférieurs aux débits mensuels décennaux secs – 480 m³/s pour juillet-août).
- ▶ En outre, l'Isère apporte une contribution non négligeable aux débits estivaux, de l'ordre de 210 m³/s.
- ▶ A Beaucaire, les débits moyens estivaux (juillet-août) sont de 730 m³/s, c'est-à-dire légèrement inférieurs aux débits décennaux secs pour ces mois (780 m³/s).

En conséquence, on observe en 2003, des débits mensuels du Rhône de temps de retour de l'ordre du quinquennal sec au décennal sec pour juillet-août et des débits journaliers qui restent supérieurs aux VCN10_2ans.

L'été 2003 est caractérisé par une longue période de basses eaux, qui est la résultante :

- ▶ des débits de fonte (Rhône alpestre et Isère) qui permettent de soutenir l'étiage ;
- ▶ **d'une contribution très faible des affluents à régime pluvial**, en particulier la Saône qui apporte en moyenne 28 m³/s en juillet-août 2003 (QMNA5 de la Saône à Couzon = 63 m³/s). Ces faibles apports s'expliquent par **l'effet cumulé de faibles précipitations et d'une évapotranspiration exceptionnellement élevée** (l'ETP sur la partie française du bassin du Rhône a dépassé les 6000 m³/s en août 2003) pendant les mois d'été (voir Figure 23).

Figure 23 : Sous-passement des seuils VCN10 T sur le Rhône et hydrogrammes de Lagnieu à Beaucaire pour 2003 (débits glissants sur 10 jours).

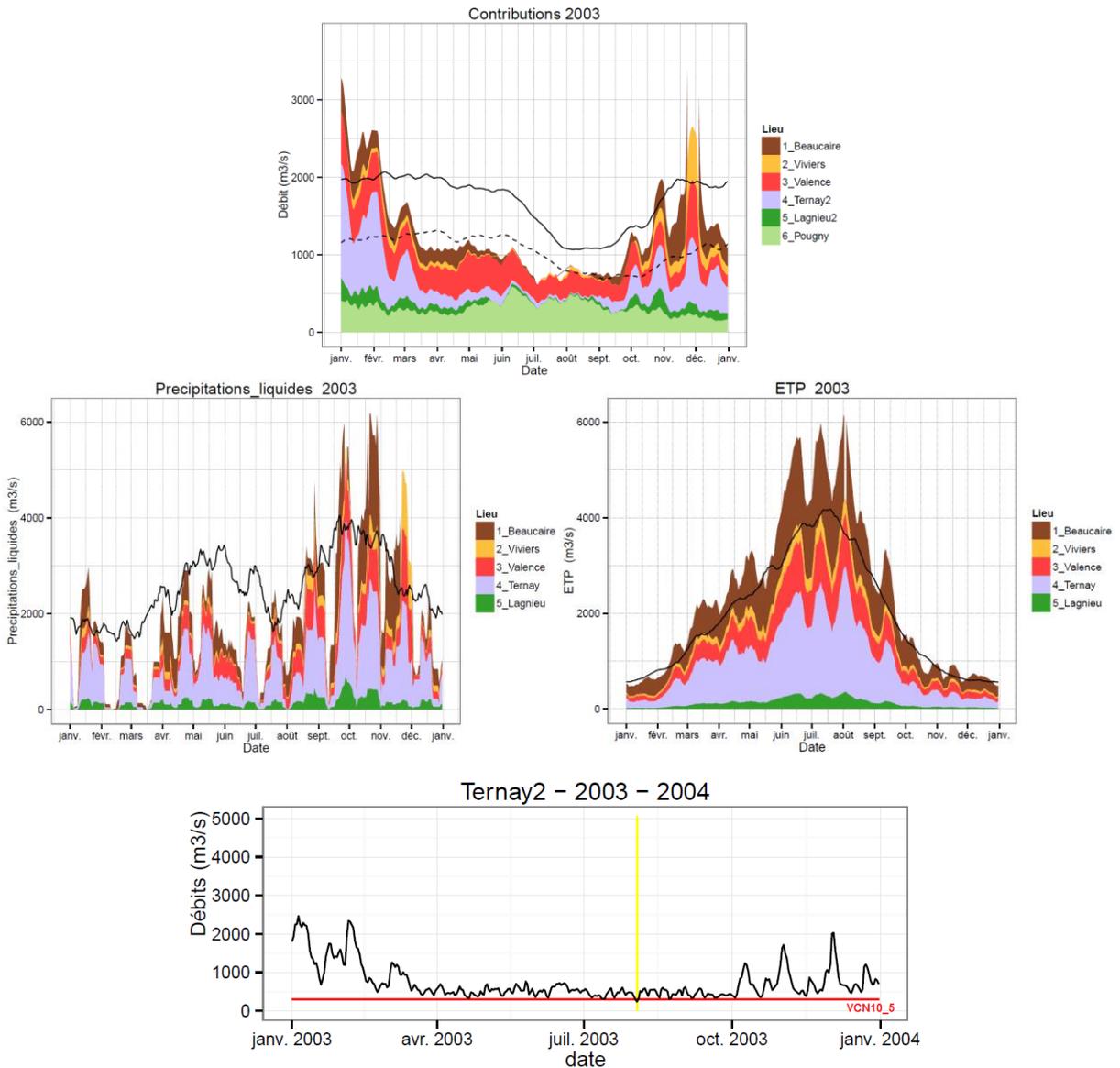
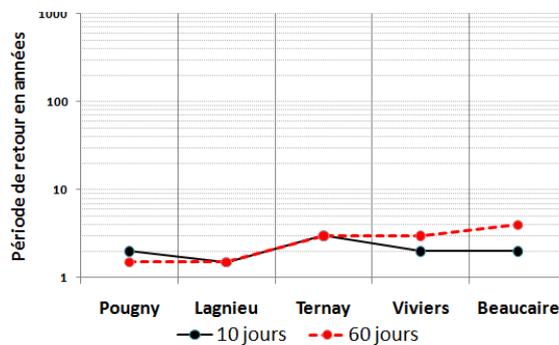


Figure 24 : Etude des périodes de retours des VCN10 et VCN60 du Rhône de Pougny à Beaucaire en 2003

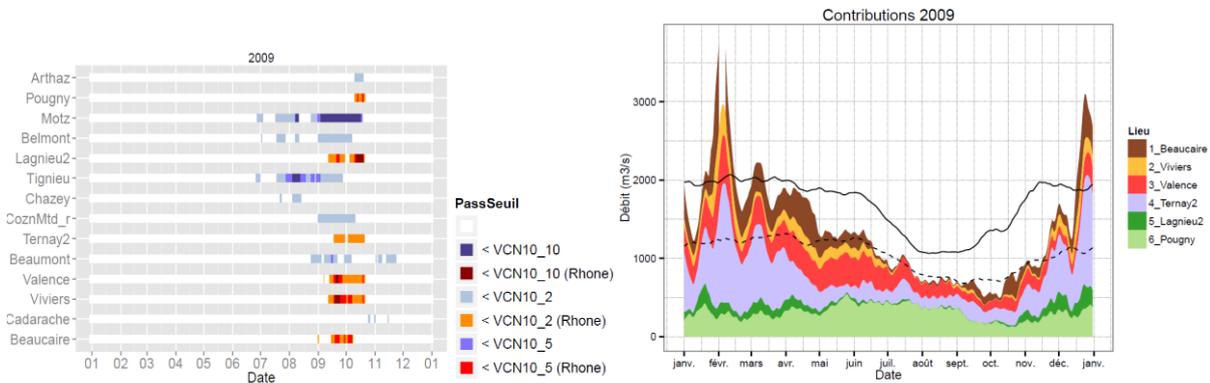


Source : Etude thermique du Rhône, EDF, 2012.

4.6 ÉTIAGE DE 2009

L'épisode d'étiage du Rhône de 2009 se concentre sur les mois de septembre-octobre. La situation d'étiage évolue de l'amont vers l'aval.

Figure 25 : Sous-passement des seuils VCN10_T sur le Rhône en 1921 et hydrogrammes de Lagnieu à Beaucaire pour 2009 (débits glissants sur 10 jours).



- ▶ Le Rhône alpestre à Pougny présente en octobre 2009 des débits de l'ordre de 150 m³/s (soit légèrement inférieurs au débit mensuel décennal sec d'octobre (160 m³/s).
- ▶ Le Fier et le Guiers connaissent des déficits de mi-juillet à mi-octobre et **amplifient ainsi l'étiage du Rhône** (Lagnieu).
- ▶ Les apports faibles des affluents plus à l'aval (Saône, Isère) ne permettent pas de rétablir les débits du Rhône, qui connaît de très bas débits en septembre-octobre (Viviers, Valence).
- ▶ La Durance et les affluents très à l'aval du bassin apportent des débits plus importants et permettent ainsi de modérer l'étiage du Rhône à Beaucaire, au mois d'octobre notamment.

Les basses eaux du Rhône de 2009 s'expliquent par :

- ▶ un faible apport du Rhône alpestre à l'automne ;
- ▶ **accompagné par des précipitations assez faibles sur l'ensemble du bassin français.** De Lagnieu à Viviers, les précipitations de septembre-octobre représentent environ 50 % des moyennes interannuelles. Ces précipitations conduisent à de faibles apports des affluents, notamment la Saône et l'Isère.

Dans ce cas de figure, tous les tronçons du Rhône français ont connu une situation d'étiage à l'automne 2011, avec cependant des nuances (décalage dans le temps et en intensité de l'étiage) liées aux différents apports des affluents.

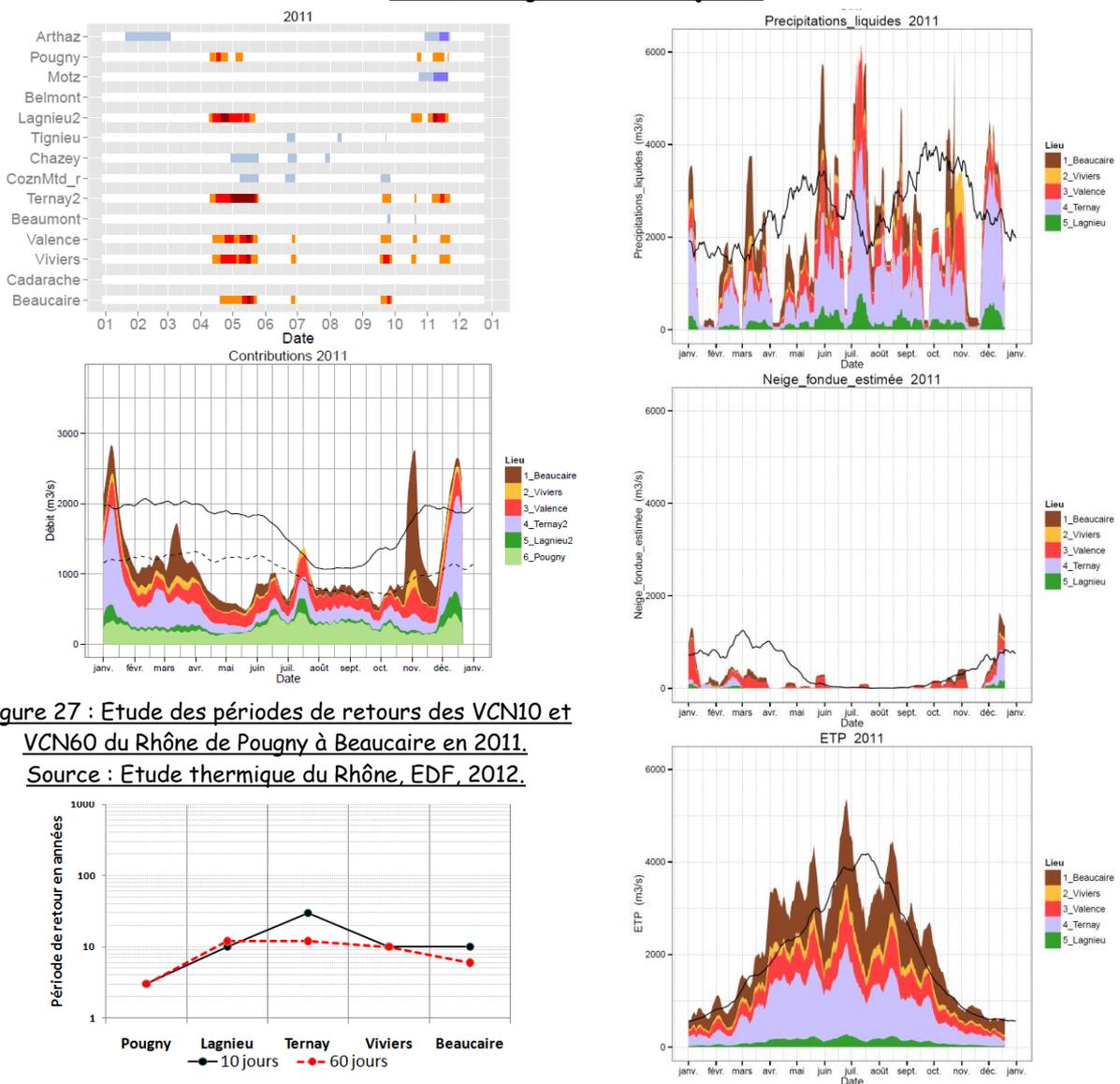
4.7 ETIAGE DE 2011

En mai 2011, on observe de très basses eaux sur le Rhône, de Pougny à Beaucaire. L'Ain et la Saône semblent être les seuls affluents marqués par des déficits importants pendant cet épisode (Figure 26).

Les basses eaux du mois de mai 2011 semblent s'expliquer par :

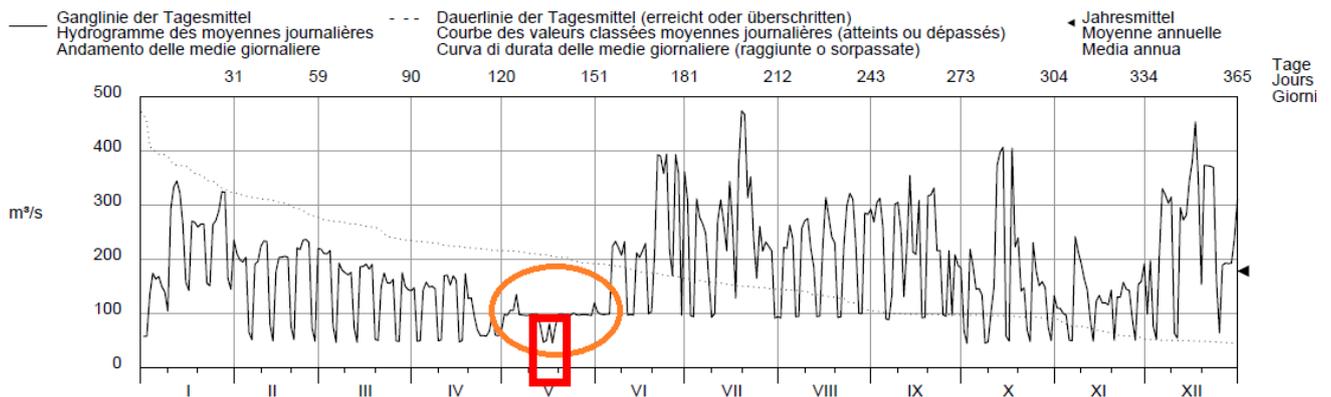
- ▶ De très bas débits du Rhône alpestre, à Pougny, liés notamment à des conditions de précipitations et neiges déficitaires en Suisse en 2011.
- ▶ **De très bas débits de l'Ain et de la Saône, qui amplifient l'étiage du Rhône.** A Ternay, après les confluences avec l'Ain et la Saône, le Rhône passe plus de 35 jours sous le VCN10_5 soit 300 m³/s entre avril et juin ; le temps de retour y est plus fort qu'aux autres stations, de l'ordre de 30 ans contre 10 ans en moyenne. Ces basses eaux sont **liées aux basses précipitations et à de fortes valeurs d'ETP sur ces bassins** (en mai 2011, les précipitations représentent environ 50 % des moyennes interannuelles sur ces bassins, et l'ETP plus de 160 % de la moyenne interannuelle).
- ▶ De bas débits de l'Isère, liés à un déficit neigeux important (voir Figure 26).

Figure 26 : Sous-passement des seuils VCN10_T sur le Rhône et hydrogrammes de Lagnieu à Beaucaire pour 2011 (débits glissants sur 10 jours).



Niveaux du Léman en mai 2011 : En outre, les conditions climatiques ont conduit à un faible niveau du Lac Léman en mai 2011. En conséquence, comme déjà décrit dans le rapport de phase 1, la DGeau de Genève a proposé exceptionnellement une dérogation pour réduire les débits de sortie à 50 m³/s début mai afin de remonter le niveau du Léman, au lieu des 100 m³/s réglementaires (encadré rouge). Cette décision a provoqué la réaction d'EDF, qui a demandé un débit d'au moins 130 m³/s pour le refroidissement de la centrale nucléaire de Bugey. Il a alors été convenu pour 2011, entre la DREAL et le canton de Genève, que les débits minimums au Seujet pourraient passer sous le seuil 100 m³/s dans la limite du respect d'un débit minimum de 130 m³/s à Bugey.

Figure 28 : Débits à Genève en 2011. Baisse momentanée des débits à 50m³/s en mai 2011 suite à la dérogation du canton de Genève, puis remontée à 100m³/s suite à l'accord avec la France.



5. ESSAI DE SYNTHÈSE SUR LES ÉTIAGES DU RHÔNE

Suite à la description détaillée des sept épisodes précédents, on présente dans ce chapitre une analyse plus générale des **14 années sèches sélectionnées**, à travers plusieurs questionnements présentés ci-après.

5.1 LES ÉTIAGES HISTORIQUES SONT-ILS PLUTÔT DES ÉVÉNEMENTS COURTS ET INTENSES OU DES DÉFICITS DE LONGUES DURÉES ?

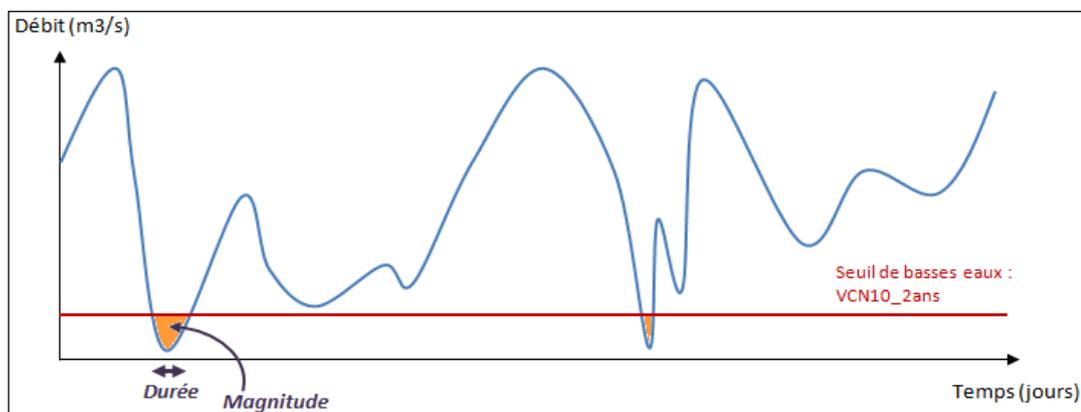
5.1.1 Approche durée et magnitude par les VCN10 de périodes de retour 2 ans et 5 ans

Afin d'appréhender quelles peuvent être les durées et magnitudes des épisodes de très bas débits sur le Rhône, nous étudions les passages des débits (lissés sur 10 jours) sous les débits seuils VCN10 de période 5 ans. Nous centrons l'analyse sur les épisodes de plus de 10 jours à Lagnieu et à Beaucaire. Sur la période 1920-2011, une dizaine d'épisodes de plus de 10 jours ont été identifiés, pour chacune des deux stations.

Pour chaque épisode de passage sous le VCN10_5 ans, on calcule :

- ▶ la durée de l'épisode (jours) ;
- ▶ la magnitude de l'épisode (Mm^3), c'est-à-dire le volume sous le seuil (voir Figure 29) ;
- ▶ le rapport magnitude/durée, en m^3/s , qui rend compte de l'écart moyen entre les débits d'étiage et le VCN10_5ans pendant cet épisode.

Figure 29 : Durée et magnitude d'un épisode de basses eaux, à partir de l'indicateur VCN10_2



Les tableaux et graphiques ci-après présentent les principaux épisodes identifiés à Beaucaire et à Lagnieu, leurs durées et leurs magnitudes. Pour mémoire, le VCN10_5ans est de 170 m³/s à Lagnieu, et de 553 m³/s à Beaucaire.

On observe une certaine disparité selon les épisodes :

- ▶ On retrouve l'année 1921, exceptionnelle en terme de durée et de magnitude : en cumulé, on décompte à Beaucaire 74 jours sous le VCN10_5, avec un écart moyen au VCN10_5ans de plus de 110 m³/s.
- ▶ Des épisodes particulièrement longs et intenses : 1921 ; 1976 (Beaucaire) ; 1972 (Lagnieu).
- ▶ Des épisodes très longs (plus de 50 jours consécutifs), relativement moins intenses : 1989 à Beaucaire.
- ▶ Des épisodes courts et particulièrement intenses : 2009 à Lagnieu.

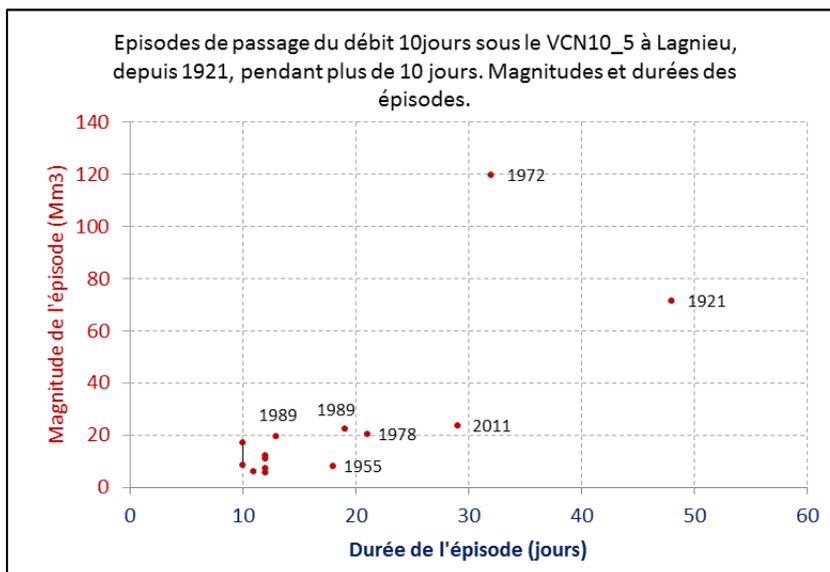
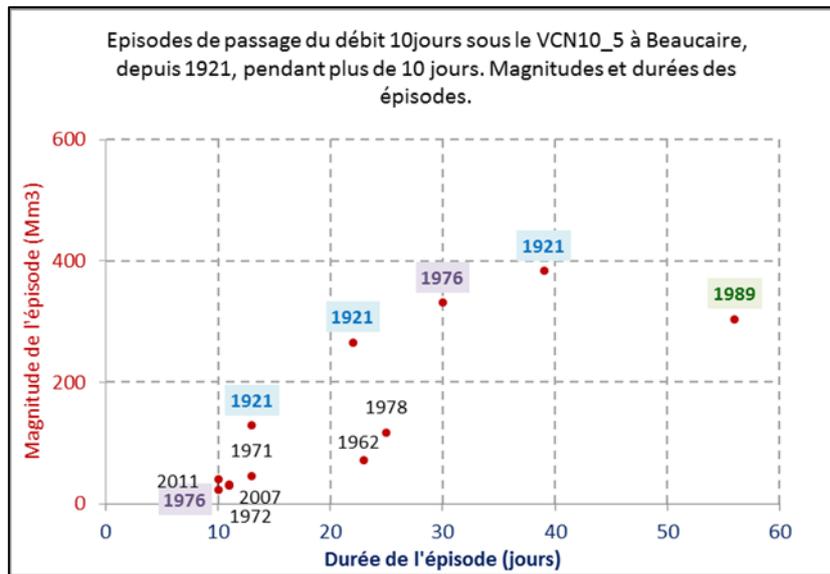
Les épisodes identifiés les plus longs ou les plus intenses ne sont pas les mêmes à l'amont et à l'aval du Rhône.

Tableau 5 : Episodes de passages sous le VCN10_5 les plus importants depuis 1920, à Beaucaire et à Lagnieu.

Station Beaucaire			
Date	Durée sous le VCN10_5 (jours)	Volume sous le VCN10_5 (Mm3)	magnitude/durée (m3/s)
1 972	10	23	27
2 007	10	40	46
1 976	11	29	31
2 011	11	31	33
1 921	13	129	115
1 971	13	46	41
1 921	22	266	140
1 962	23	72	36
1 978	25	118	55
1 976	30	331	128
1 921	39	383	114
1 989	56	304	63

Station Lagnieu			
Date	Durée sous le VCN10_5 (jours)	Volume sous le VCN10_5 (Mm3)	magnitude/durée (m3/s)
2 005	10	8	10
2 009	10	17	20
1 941	11	6	6
1 932	12	6	5
1 953	12	7	7
2 007	12	11	10
2 011	12	12	12
1 989	13	20	17
1 955	18	8	5
1 989	19	22	14
1 978	21	20	11
2 011	29	24	9
1 972	32	120	43
1 921	48	72	17

Figure 30 : Episodes de passage du débit journalier sous le VCN10_5 à Beaucaire et à Lagnieu, depuis 1921. Magnitudes et durées des épisodes.



5.1.2 Approche complémentaire par les Intensité-Durée-Fréquence des débits du Rhône issues d'études EDF

Afin de compléter l'analyse précédente et de mieux rendre compte de la complexité des étiages du Rhône, nous présentons en complément les travaux d'EDF réalisés sur les Intensité-Durée-Fréquence (IDF) des débits du Rhône.

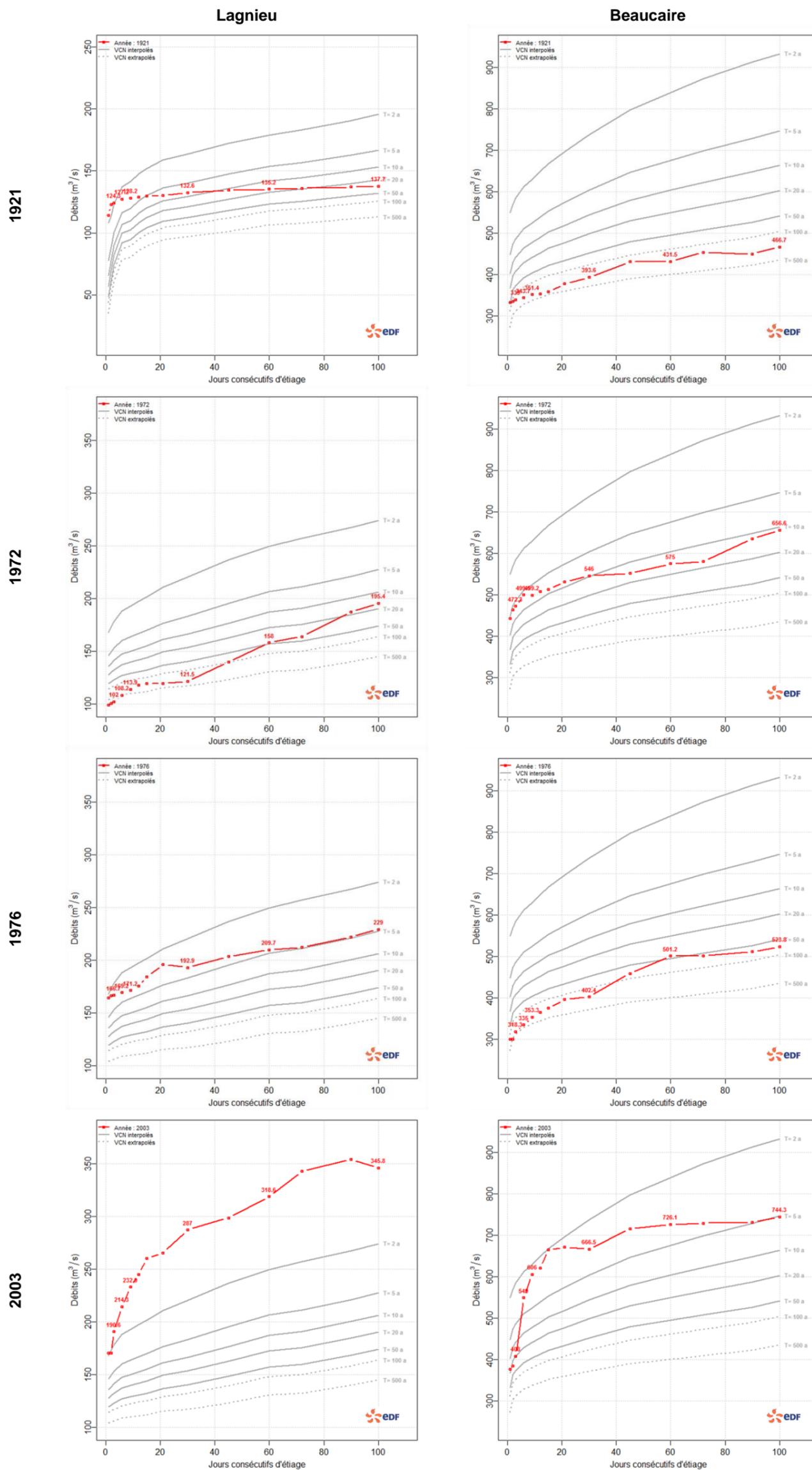
L'analyse propose les **courbes Intensité-Durée-Fréquence pour les débits au droit de cinq points nodaux**.

En complément de l'analyse précédente, les analyses IDF présentées ci-dessous à Lagnieu et Beaucaire permettent d'évaluer le temps de retour des événements ayant eu lieu en 1921, 1972, 1976, 2003.

- ▶ 1921 : Aux deux épisodes de plus de 70 jours consécutifs à Lagnieu correspondent des temps de retour de l'ordre de 20 ans tandis que les épisodes de 25 et 68 jours à Beaucaire présentent un temps de retour important, de plus de 200 ans confirmant le caractère intense de cet étiage. On note ainsi une gradation de l'intensité de l'étiage amont-aval.
- ▶ 1972 : A contrario de 1921, on note que le temps de retour de l'étiage de 1972 est plus important à l'amont du Rhône avec des temps de retour de l'ordre de 100 ans pour les deux plus longues périodes d'étiages à Lagnieu par rapport à la quinzaine d'année pour l'étiage de 47 jours consécutif à Beaucaire.
- ▶ 1976 : On note un temps de retour peu élevé à Lagnieu en 1976, inférieur à 5 ans. En ce qui concerne l'épisode de 92 jours consécutif de basses eaux à Beaucaire, on observe un temps de retour de l'ordre de 75 ans.
- ▶ 2003 : Les courbes IDF montrent que le temps de retour a été plus important à l'aval, du fait de l'accumulation des basses eaux des affluents. Ce temps de retour reste toutefois modeste, inférieure à 5 ans.

Au travers des analyses de longueur et de magnitude, on note que les étiages ne présentent pas de tendance généralisée. Ce fait est confirmé par les courbes Intensité-Durée-Fréquence fournies par EDF qui viennent rendre compte de la complexité des étiages du Rhône. Ainsi des étiages de courtes durées peuvent être plus intenses que des étiages longs (1921 et 1972 à Beaucaire), et inversement.

Figure 31 : Courbes d'Intensité-Durée Fréquence aux stations de Lagnieu et Beaucaire, source EDF



5.2 UNE ANNÉE SÈCHE L'EST-ELLE SUR TOUS LES TRONÇONS DU RHÔNE ET SUR TOUS SES AFFLUENTS ?

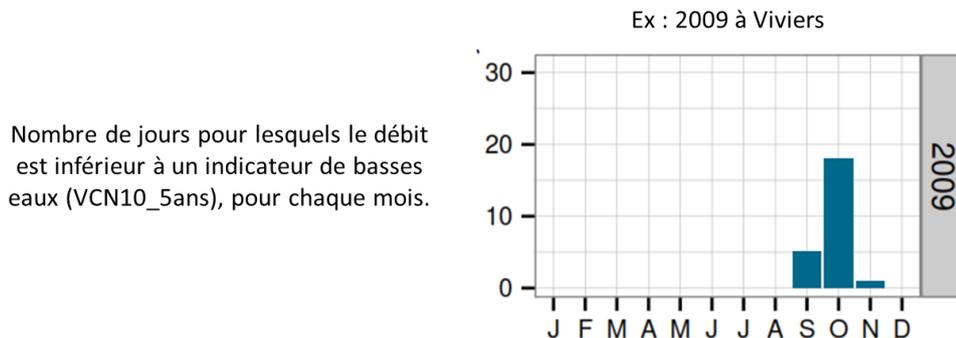
Le chapitre 4 a décrit, pour les sept épisodes d'étiage sélectionnés, la genèse et la propagation des situations d'étiage de l'amont vers l'aval du Rhône. Ces quelques situations d'étiages historiques présentées mettent en évidence **une certaine variabilité des processus d'étiage sur le linéaire du Rhône**, conséquence cumulée de la part de chaque affluent au débit du Rhône.

Tous les tronçons du Rhône ne sont pas systématiquement en étiage simultanément et avec une intensité équivalente. Compte tenu de ces différents apports des affluents, **une situation d'étiage du Rhône évolue de l'amont vers l'aval du bassin versant**. Les débits du Rhône peuvent être moyens sur le haut Rhône et bas à l'aval, si les affluents de l'aval connaissent un étiage sévère.

5.3 À QUELLES PÉRIODES DE L'ANNÉE ONT LIEU LES ÉTIAGES DU RHÔNE ?

Nous étudions la **saisonnalité des épisodes de basses eaux des 14 années sèches du Rhône**. Pour ce faire, nous calculons, pour chaque année, le **nombre de jours par mois pour lesquels les débits journaliers du Rhône se situent en dessous du débit seuil VCN10_2ans ou 5ans**. Les résultats sont présentés sous forme d'histogrammes dans les pages suivantes.

On donne ci-dessous l'exemple de l'année 2009 à Viviers, afin d'explicitier la lecture de ces histogrammes. Le graphique ci-après montre que l'on a enregistré environ 18 jours sous le VCN10_5 en octobre, environ 5 jours sous le VCN10_5 en septembre, 1 jour en novembre et aucun jour sous le VCN10_5 de janvier à août. Ce graphique permet d'identifier facilement la période d'étiage sur septembre-octobre pour Viviers en 2009. **La comparaison de ces histogrammes pour les 14 années sèches sélectionnées et pour les six points SDAGE vise à identifier les périodes de l'année le plus souvent marquées par de bas débits sur le Rhône.**



Le tableau ci-dessous rappelle les valeurs de VCN10_2 au niveau de chaque station SDAGE ainsi qu'un rappel des modules aux mêmes points.

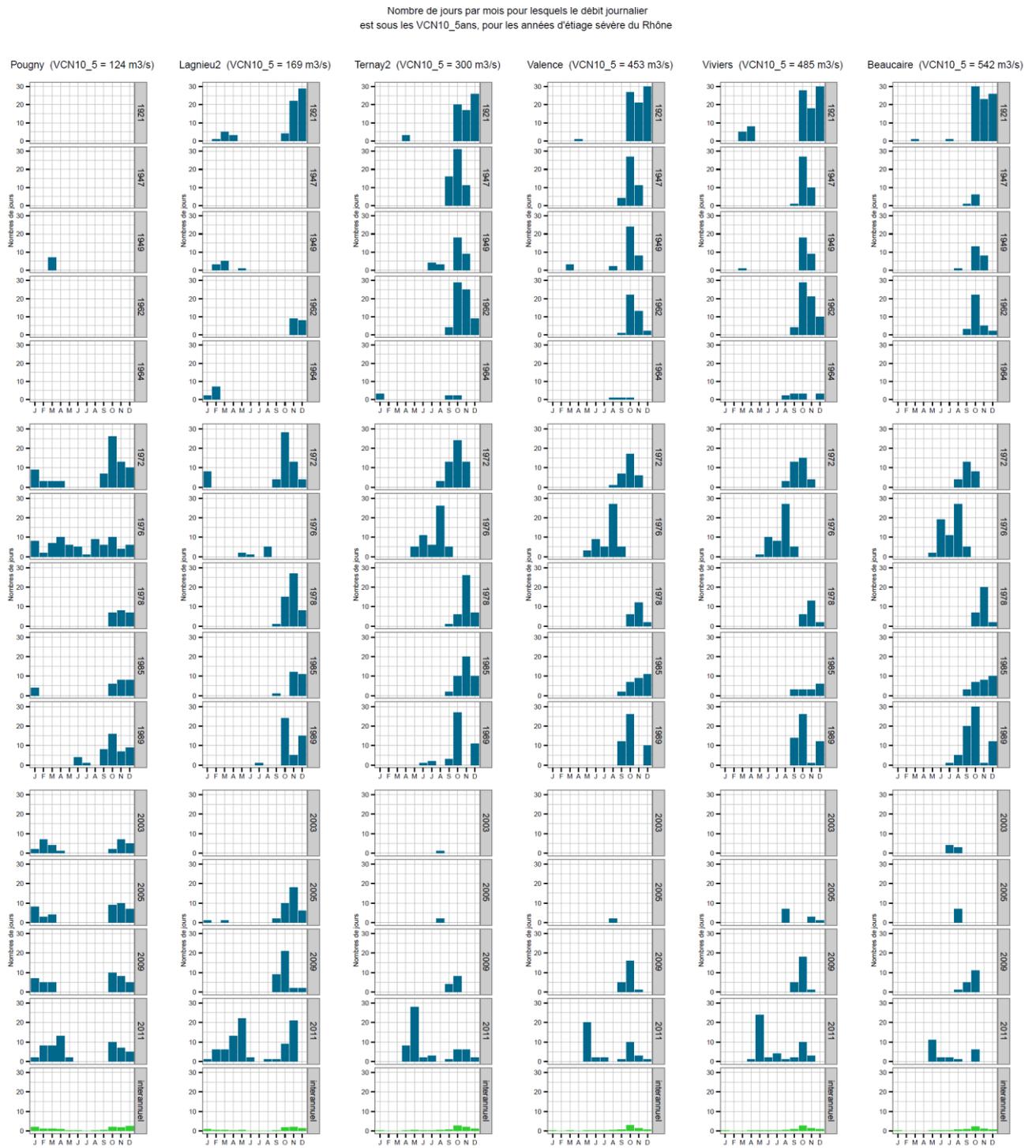
Tableau 6 : Rappel des modules, VCN10_2 et VCN10_5 aux 6 points SDAGE

Stations SDAGE	Module (m ³ /s)	VCN10_2 (m ³ /s)	VCN10_5 (m ³ /s)
Pougy	343	148	119
Lagnieu	472	200	170
Ternay	1054	367	313
Valence	1400	548	465
Viviers	1504	583	498
Beaucaire	1700	651	553

Figure 32 : Saisonnalité des basses eaux du Rhône. Nombre de jours pour lesquels le débit journalier est inférieur au VCN10_2ans, pour chaque mois. Années sèches et moyenne interannuelle, aux six points SDAGE du Rhône.



Figure 33 : Saisonnalité des basses eaux du Rhône. Nombre de jours pour lesquels le débit journalier est inférieur au VCN10_5ans, pour chaque mois. Années sèches et moyenne interannuelle, aux six points SDAGE du Rhône.



Ces graphiques montrent que :

- ▶ **Les mois d'octobre et novembre** totalisent le plus grand nombre de sous-passements sur les 14 années étudiées ; ce sont les mois les plus marqués par de bas débits globalement à l'échelle des six points SDAGE.
- ▶ Du Léman jusqu'à l'amont de Lyon, les étiages les plus sévères ont eu lieu majoritairement en automne et en hiver (on peut citer les années 1921, 1947, 1949, 1962, 1972, 1978, 1985, 1989, 2005, 2009).
- ▶ De Lyon à la mer, les étiages les plus sévères ont eu lieu majoritairement à la fin de l'été et à l'automne (on peut citer les années 1921, 1947, 1949, 1962, 1972, 1989, 2009).

Cependant des situations d'étiage fort du Rhône ont parfois eu lieu à d'autres périodes : la plus récente est le mois de **mai 2011**, conséquence d'un déficit de neige en hiver 2011 et de faibles précipitations en mai 2011. Cela a été le mois de mai le plus sec depuis 1920 pour le Rhône. Autre exemple, **l'été 1976** a été marqué par un étiage fort du Rhône, et ce dès le mois de juin : le débit moyen du mois de juin enregistré à Beaucaire en 1976 a été de 536 m³/s.

On retrouve le caractère exceptionnel de **l'année 1921** : sous-passement du VCN10_5ans de plus de 25 jours sur 31 en septembre et décembre.

Le Tableau 9 synthétise les mois impactés par des bas débits pour les 14 années étudiées.

A la vue de nos résultats, il n'apparaît **pas de saisonnalité marquée des étiages du Rhône : des épisodes de basses eaux peuvent avoir lieu toute l'année**. Sur les 14 années étudiées, on distingue cependant deux périodes plus impactées par les bas débits : **des étiages estivaux (juillet-septembre) et des étiages en automne-hiver (septembre-décembre)**.

Le mois qui compte le plus de nombre de jours de sous-passement du VCN10_2ans est **octobre** (24 %).

1921 correspond à l'année où le nombre de jours de sous-passements a été le plus important.

Tableau 7 : Identification des mois de l'année impactés par de très bas débits du Rhône, pour les 14 années sèches étudiées dans le cadre de la présente étude

Année de basses eaux	Période de l'année											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1921		1	1	1		1			1	1	1	1
1947									1	1	1	
1949		1					1	1	1	1	1	
1962									1	1	1	1
1964	1	1					1	1	1		1	1
1972								1	1	1	1	1
1976				1	1	1	1	1	1			
1978										1	1	1
1985									1	1	1	1
1989		1						1	1	1	1	1
2003				1	1	1	1	1	1			
2005								1		1	1	1
2009									1	1		
2011				1	1	1				1	1	
Total (nombre d'épisodes)	1	4	1	4	3	4	4	7	11	11	11	8

5.4 QUELLE EST LA CONTRIBUTION DE CHAQUE SOUS-BASSIN AUX DÉBITS D'ÉTIAGE DU RHÔNE ? CETTE PART EST-ELLE TRÈS VARIABLE D'UNE ANNÉE SUR L'AUTRE ?

On cherche à identifier, pour chaque épisode d'étiage sévère, **quels sont les principaux affluents déficitaires, contribuant majoritairement aux étiages**. L'identification proposée ici s'est basée sur l'**analyse graphique** des éléments suivants :

- ▶ Hydrogrammes aux six points SDAGE (donnés en Annexe) ;
- ▶ Graphiques de sous passements des seuils (VCN10_2ans ; 5ans ; 10 ans) (donnés en Annexe) ;
- ▶ Les courbes intensité-fréquence fournies par EDF (données en Annexe) ;
- ▶ Les valeurs des « déficits mensuels » aux stations SDAGE et stations de référence, définies comme suit :

$$\text{Déficit (mois, année)} = 1 - \frac{\text{Débit (mois, année)}}{\text{Débit moyen interannuel (mois)}}$$

Cet indicateur représente l'écart entre le débit mensuel d'une année et le débit moyen mensuel interannuel. Ces valeurs sont données dans le Tableau 9.

Ainsi l'analyse proposée est qualitative. Le Tableau 8 tente de résumer cette identification des affluents déficitaires pour les 14 années, mais il est important de noter qu'un tel exercice comporte une part de subjectivité.

Quelques situation d'étiages sont présentées ci-dessous :

- ▶ En 1962, on observe un faible déficit au niveau de Pougny, qui s'intensifie à Lagnieu, puis à Beaucaire, en raison d'un faible apport des affluents amont, et notamment de la Saône (- 89 %). Par la suite, bien que l'Isère présente un déficit de 50 %, le déficit du Rhône reste du même ordre (63 % des débits moyens) jusqu'à Beaucaire.
- ▶ En octobre 1972, la Saône présente également un déficit important (84 %), accentuant l'étiage du Rhône alpestre. L'Isère connaît un déficit relativement plus faible (34 %), permettant ainsi une atténuation de l'étiage au niveau du Rhône aval.
- ▶ En août 1976, le Rhône présente un déficit relatif constant de l'amont vers l'aval.
- ▶ En mai 2011, bien qu'il y ait un fort déficit de débit de la Saône(84 %), la variation de déficit entre Lagnieu et Ternay n'est que de 6 % alors qu'elle avait été de 22 % en octobre 1962. La situation à Pougny (Rhône alpestre) influe beaucoup sur les débits aval du Rhône. Les débits de l'Ain, non présentés ici, constituent également un facteur contributif important des débits du Rhône.

De manière générale, on peut faire les remarques suivantes :

- ▶ La Saône est souvent l'un des facteurs clés d'apparition ou d'accentuation de l'étiage du Rhône, pour les années étudiées.
- ▶ Les déficits de l'Isère contribuent souvent à propager la situation d'étiage vers l'aval mais sont plus rarement la cause d'une aggravation nette de l'étiage du Rhône.
- ▶ Ces observations mettent en évidence la variabilité des scénarios avec, toutefois, le rôle majeur du Rhône alpestre (sous-bassin à l'amont de Pougny), de l'Ain et de la Saône pour la plupart des épisodes. Ces sous-bassins présentent des déficits importants pour quasiment toutes les années étudiées. L'Isère contribue également aux basses eaux dans certains cas.
- ▶ La plupart des étiages étudiés sont la résultante d'une combinaison de déficits importants et simultanés des principaux affluents. A l'exception de l'année 2003, on observe la combinaison de déficits importants du Rhône alpestre, de la Saône et de l'Isère.

Tableau 8 : Identification des principaux affluents déficitaires, contribuant aux épisodes d'étiages du Rhône, pour les 14 années étudiées

Année de basses eaux	Principaux affluents déficitaires			
	Rhône Alpestre (Suisse + Arve)	Saône - Ain	Isère	Affluents aval - Durance
1921	Oui	Oui	partiel	Oui
1947	partiel	Oui	partiel	
1949	partiel	Oui	partiel	
1962	partiel	Oui	Oui	Partiel
1964	Oui	Oui	partiel	
1972	Oui	Oui	partiel	
1976	Oui	Oui	Oui	
1978	Oui	Oui	Oui	Oui
1985	partiel	Oui	Oui	Oui
1989	Oui	Oui	Oui	Oui
2003		Oui		
2005	Oui	Oui	partiel	
2009	Oui	Oui	Oui	
2011	Oui	Oui	Oui	

NB : Ce tableau doit être lu avec prudence, il s'agit d'une analyse qualitative de l'impact des différents affluents sur les épisodes d'étiages du Rhône à partir des données hydrométriques, il est soumis à une part de subjectivité dans l'appréciation des causes hydrologiques

Tableau 9: Déficit de débit aux points SDAGE et sur les principaux affluents du Rhône par rapport à la moyenne mensuelle interannuelle calculée sur 1980-2011

	Année	1962		1972		1976		1978		2009		2011		
		Mois	10	11	9	10	6	8	10	11	9	10	5	6
Pts SDAGE	Pougny		28%	32%	45%	55%	62%	58%	33%	42%	17%	42%	58%	34%
	Lagnieu		46%	54%	48%	61%	63%	58%	49%	58%	32%	54%	68%	34%
	Ternay		68%	73%	53%	64%	67%	59%	53%	73%	32%	57%	74%	45%
	Valence		61%	66%	48%	56%	65%	59%	51%	63%	41%	58%	71%	49%
	Viviers		63%	68%	50%	56%	66%	58%	52%	65%	40%	59%	72%	49%
	Beaucaire		65%	58%	48%	46%	68%	49%	58%	71%	40%	57%	70%	47%
Affluents	Arve		62%	72%	49%	56%	48%	46%	37%	57%	41%	56%	58%	32%
	Saone		89%	88%	77%	84%	70%	59%	72%	87%	64%	80%	84%	73%
	Isère		52%	52%	31%	34%	61%	58%	47%	32%	43%	35%	16%	17%

5.5 QUELS SONT LES PRINCIPAUX PHÉNOMÈNES CLIMATIQUES EXPLIQUANT LES BASSES EAUX ?

MÉTHODE

A travers la description détaillée des « 7 années remarquables » au cours du chapitre 4, une première analyse des facteurs climatiques prépondérants associés à ces épisodes a été faite.

Cette analyse, **qualitative**, se base sur l'**étude graphique** des courbes des **chroniques de débits** aux six points SDAGE et des **chroniques de variables climatiques** calculées sur les surfaces contributives de chaque point SDAGE, lissés sur 10 jours. Les variables climatiques considérées sont les suivantes :

- ▶ Estimation des **précipitations liquides et de l'évapotranspiration potentielle** moyenne journalières de chaque sous-bassin, à partir des données SAFRAN, pour 1959-2011 ;
- ▶ Estimation de la **neige fondue journalière** (fonte du stock de neige) de chaque sous-bassin, à partir des données de précipitations solides et de températures (SAFRAN 1959-2011) ainsi que d'un modèle simple degrés-jour.

L'analyse graphique de ces chroniques est menée pour les 14 années sèches de l'étude. Les courbes de débits et variables climatiques pour les 14 années sont données en annexe.

SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

Il s'agit d'une analyse graphique et qualitative, afin d'apporter une première compréhension des causes climatiques des épisodes d'étiages sévères.

N.B. : Il est cependant rappelé que les débits étudiés sont des débits mesurés influencés, résultant des conditions climatiques mais également des influences humaines, et notamment de la régulation des ouvrages hydroélectriques et du lac Léman. Ces aspects sont abordés en phase 2 mission 2.

Pour les 14 années considérées, on retrouve deux facteurs climatiques prépondérants :

- ▶ le climat du bassin du Rhône alpestre (précipitations et neige en Suisse) ;
- ▶ les précipitations liquides des bassins de la Saône et de l'Ain (Ternay) en particulier, et de l'ensemble du bassin du Rhône dans de nombreux cas.

Ces deux facteurs sont identifiés comme impactant **pour quasiment toutes les années sèches étudiées et sont souvent combinés**.

En outre, la **composante nivale du bassin de l'Isère** joue aussi un rôle important pour plusieurs épisodes.

Cela corrobore les précédents résultats concernant la synchronisation des déficits de ces affluents lors des épisodes d'étiages sévères du Rhône.

L'**évapotranspiration** a également pu jouer un rôle pour certains épisodes de basses eaux, notamment en **2003 et en 2011**.

La part contributive de chaque facteur climatique aux étiages reste cependant variable d'une année sur l'autre.

Le tableau suivant tente de résumer l'identification des facteurs climatiques prépondérants pour les 14 épisodes étudiés. On rappelle que cet exercice doit être considéré avec prudence car il comporte une part de subjectivité.

Tableau 10 : Identifications des facteurs météorologiques prépondérants aux 14 épisodes de basses eaux du Rhône étudiés.

Année de basses eaux	Facteur climatique prépondérant (sur les surfaces contributives des tronçons SDAGE)			
	Composante Suisse	Précipitations (France)	Neige (France)	ETP (France)
1921				
1947				
1949				
1962	Suisse	Lagnieu - Ternay		
1964	Suisse	Ensemble	(Valence)	(Ternay)
1972	Suisse	Lagnieu - Ternay		
1976	Suisse	Lagnieu - Viviers		Lagnieu - Valence
1978	Suisse	Ensemble	Valence	
1985	Suisse	Ensemble	(Valence)	(Lagnieu Ternay)
1989	Suisse	Ensemble	Ensemble	
2003		Ternay - Valence		Ternay - Valence
2005	Suisse	Ensemble	Températures Valence	(Ternay)
2009	Suisse	Lagnieu - Viviers		
2011	Suisse	Ternay -	Valence	Ensemble

NB : Ce tableau doit être lu avec prudence, il s'agit d'une analyse qualitative de l'impact des différents facteurs climatiques sur les épisodes d'étiages du Rhône à partir des données hydrométriques et météorologiques, il est soumis à une part de subjectivité dans l'appréciation des causes météorologiques.

5.6 RÉTROSPECTIVE : DÉTECTE-T-ON UNE TENDANCE SUR LES BAS DÉBITS À L'ÉCHELLE DU BASSIN DU RHÔNE ?

L'analyse de tendance sur des chroniques hydrométriques est un exercice très délicat, et cela pour plusieurs raisons :

- ▶ La variabilité climatique, et donc hydrologique, est très importante et rend difficile l'identification d'une tendance qui ne serait pas attribuable uniquement à cette variabilité intrinsèque ;
- ▶ Ce travail requiert des séries de données suffisamment longues et de qualité suffisante ;
- ▶ Les causes de changement sont multiples : changement météorologique (modification de la station, etc.), influence de prélèvements, d'ouvrages (dont le lac Léman dans le cas présent) et d'aménagements sur les débits ou les mesures ; changement climatique ; etc.
- ▶ Les analyses statistiques ont leurs limites.

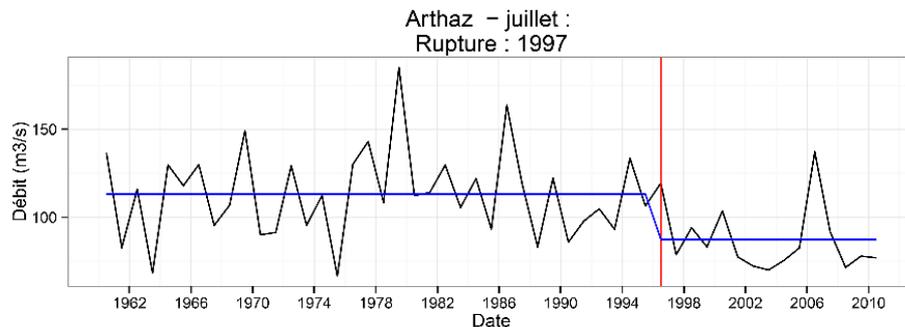
Des tests de rupture (**tests de Pettitt**) ont été réalisés sur les chroniques de débits du Rhône en France, sur plusieurs indicateurs statistiques (moyennes, débits d'étiage, etc.). Les graphiques réalisés pour ces tests sont proposés en Annexe. **Ces tests n'ont pas permis de détecter des tendances significatives avec consistance sur le Rhône, ni de leur attribuer une origine de changement climatique.**

Cependant, cette analyse n'est pas exhaustive, et ne permet pas de conclure sur l'absence ou l'existence de tendances.

En outre, les débits du fleuve Rhône sont la résultante d'un système complexe, combinaisons de nombreux affluents aux régimes hydrologiques variés et modifiés par la gestion humaine : en conséquence, il est d'autant plus difficile de détecter les effets éventuels du changement climatique dans la variabilité hydrologique.

En revanche, on détecte des changements locaux, en particulier pour les cours d'eau alpestres. Sur le haut bassin du Rhône, on observe par exemple une tendance à la baisse des débits estivaux de l'Arve ; cette tendance doit cependant être analysée avec prudence en raison des divers facteurs pouvant y contribuer.

Figure 34 : Etude des débits moyens de juillet sur l'Arve à Arthaz (1962-2011)



5.7 DÉTECTE-ON UN LIEN ENTRE LES ÉTIAGES DU RHÔNE ET LE NIVEAU DE LA NAPPE ALLUVIALE ?

Afin de réaliser un premier travail sur les possibles corrélations entre les étiages marqués du Rhône et les niveaux de sa nappe alluviale, une première analyse des chroniques piézométriques disponibles et des données généralistes sur les étiages du Rhône a été effectuée.

Rappelons cependant qu'une analyse approfondie des chroniques piézométriques sera effectuée en phase 3 de l'étude, lorsque la problématique des impacts de la diminution du débit du fleuve sur la productivité de la nappe sera étudiée.

5.7.1 Première caractérisation des informations disponibles

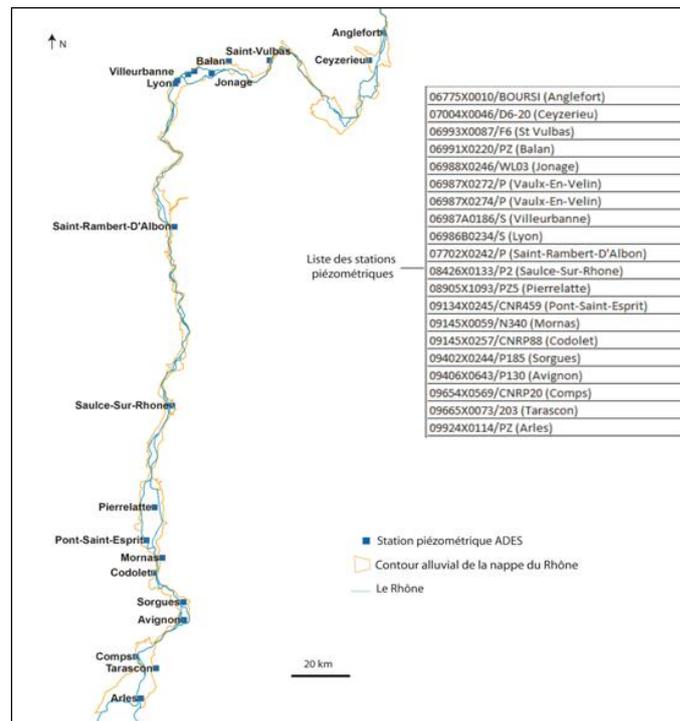
5.7.1.1 Sélections des données piézométriques

Une recherche des stations piézométriques a été effectuée sur le site de la base de données ADES (www.ades.eaufrance.fr). Nous avons retenu :

- ▶ Les piézomètres strictement localisés dans la nappe alluviale du Rhône telle qu'elle est délimitée dans la BD LISA ;
- ▶ Les piézomètres implantés dans un aquifère en position d'alimenter la nappe alluviale du Rhône, avec une connexion hydraulique souterraine entre les deux nappes et, comme condition supplémentaire, une faible distance à la limite entre la nappe encaissante et la nappe du Rhône ($d < 1000$ m).

Au final, nous avons sélectionné 20 piézomètres satisfaisant à ces critères.

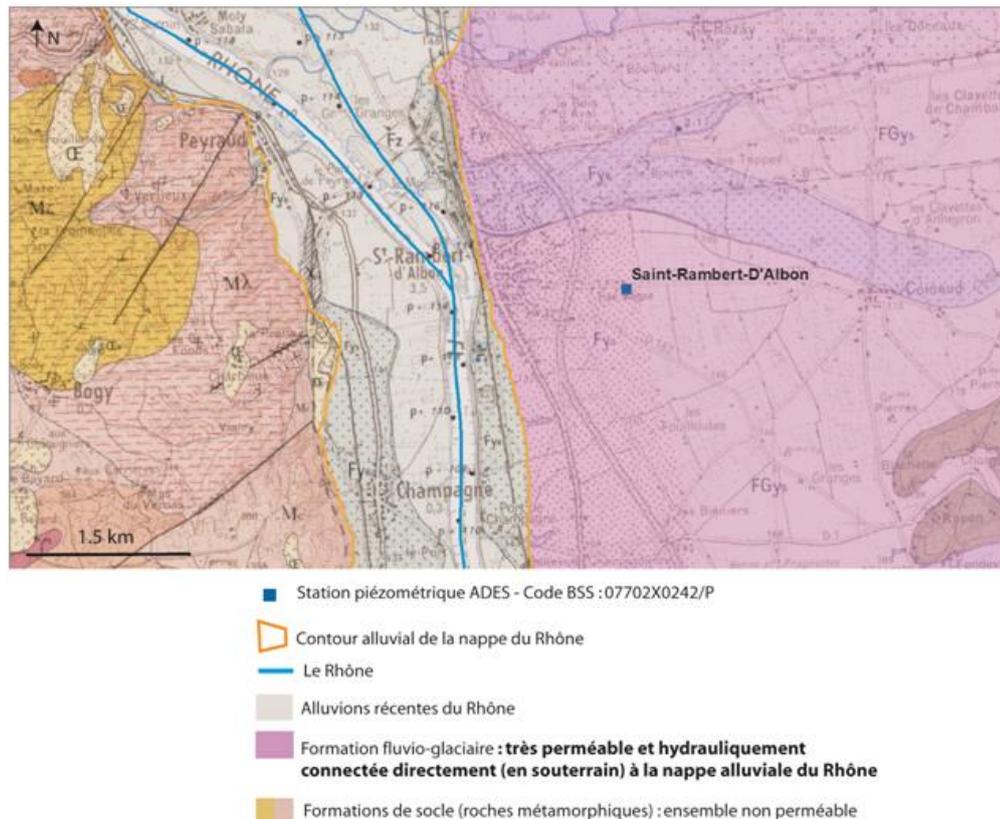
Figure 35 : Piézomètres retenus pour l'analyse sommaire



Cette première visualisation nous renseigne sur la répartition spatiale de l'information piézométrique disponible :

- ▶ En tête de bassin versant (au nord d'Anglefort jusqu'à la frontière Suisse), aucun piézomètre n'est référencé ;
- ▶ A l'amont du secteur de Jonage et Lyon, trois piézomètres peuvent renseigner sur les variations piézométriques ;
- ▶ La zone de Lyon est bien représentée (six piézomètres en prenant en compte le secteur de Balan et Jonage) ;
- ▶ Une lacune est présente à l'aval de Lyon jusqu'au Sud de la confluence avec la Varèze à Saint-Rambert d'Albon) ;
- ▶ A l'aval de ce seul piézomètre, une seconde lacune plus importante est visible jusqu'au Sud de la confluence avec la Drôme où un seul piézomètre renseigne la région (Saulce-sur-Rhône) ;
- ▶ Le domaine du bas Rhône est enfin bien informé grâce à un panel de stations réparties de façon égale sur les plaines de Pierrelatte, Avignon et Tarascon/Arles.

Figure 36 : Exemple de piézomètre situé hors contour alluvial.



Précisons que cinq piézomètres sélectionnés sont localisés hors contour alluvial :

- ▶ Le « 09665X0073/203 » (Tarascon) situé à l'aval de la nappe latérale des alluvions récentes de la basse Durance ; il reste néanmoins intéressant à étudier de par la connexion hydraulique existante entre les alluvions à l'extrême aval de la Durance et les alluvions du Rhône ;
- ▶ Le « 09145X0059/N340 » (Mornas), représentant certes le niveau piézométrique des alluvions basses de l'Aigues mais étant proche des alluvions du Rhône et situé à 2 km du Rhône ; il n'y a pas de cours d'eau secondaire principal qui viendrait influencer le signal (l'Aigues est situé à 3,5 km au Sud du point) ;
- ▶ Le point « 06991X0220/PZ » (Balan) proche du Rhône et situé dans une nappe fluvioglacière connectée en souterrain à la nappe alluviale du Rhône ;
- ▶ Le point « 06993X0087/F6 » (St-Vulbas) situé en domaine alluvial proche de la nappe du Rhône ;
- ▶ Le point « 06775X0010/BOURSI » (Anglefort) situé en domaine sédimentaire perméable proche de la nappe du Rhône et un des seuls représentants du Haut-Rhône.

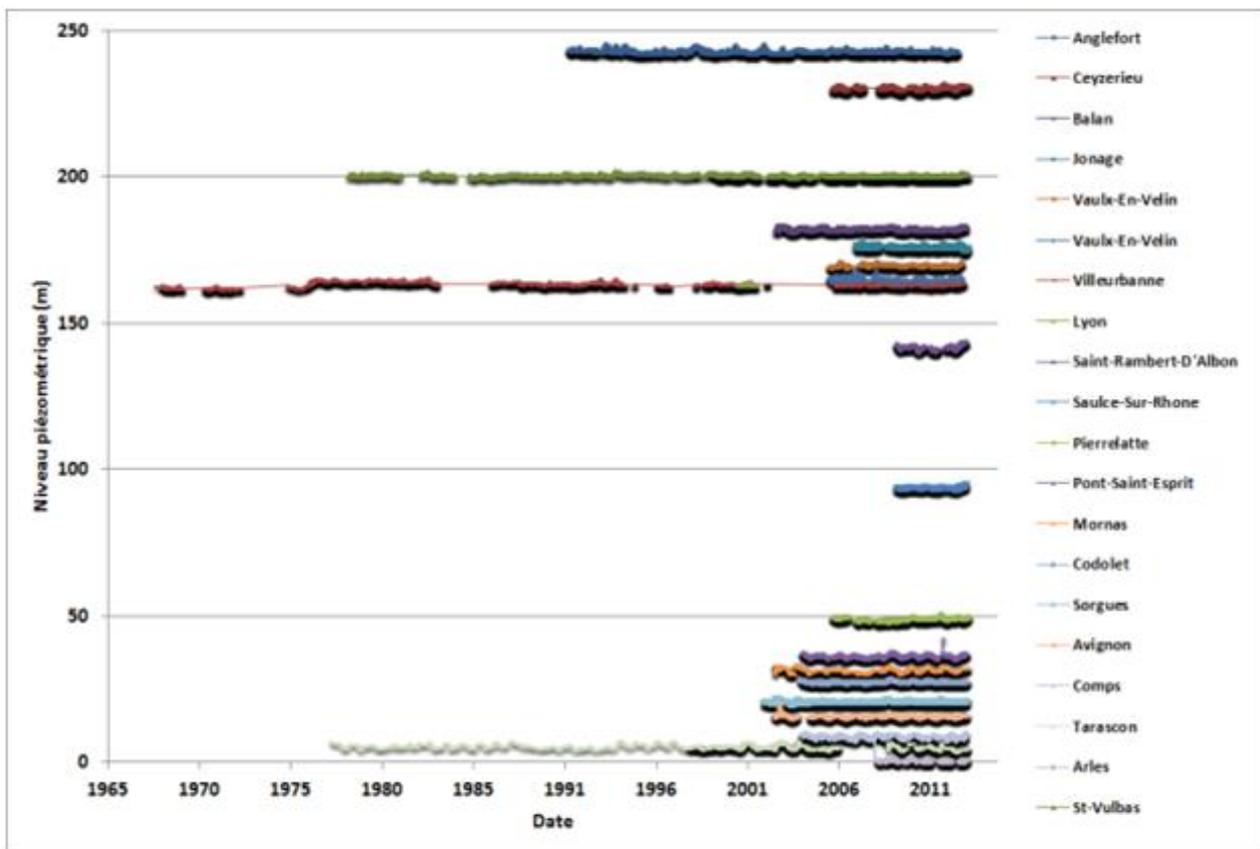
5.7.1.2 Etendues des chroniques piézométriques

L'ensemble des chroniques de ces stations correspondent à des périodes de mesures variables et le plus souvent égales ou inférieures à 10 ans, comme le montre le graphique suivant, qui présente l'ensemble des chroniques des 20 stations piézométriques.

Les mesures sont journalières et peuvent contenir des lacunes plus ou moins longues : quelques jours ou plusieurs années. Certaines stations ont échantillonné sur des périodes courtes d'environ cinq ans ; c'est le cas des piézomètres à Ceyzerieu, St-Rambert-d'Albon et Pierrelatte.

Nous retiendrons pour cette première analyse sommaire les trois chroniques les plus longues : les stations à St-Vulbas, Villeurbanne et Tarascon qui correspondent respectivement à 34, 44 et 35 années de mesures.

Figure 37 : Chroniques piézométriques journalières des 20 stations retenues



5.7.1.3 Premier avis sur la représentativité des chroniques piézométriques

Il est intéressant de qualifier la représentativité des mesures disponibles au regard de leur position relative vis-à-vis des aménagements du Rhône.

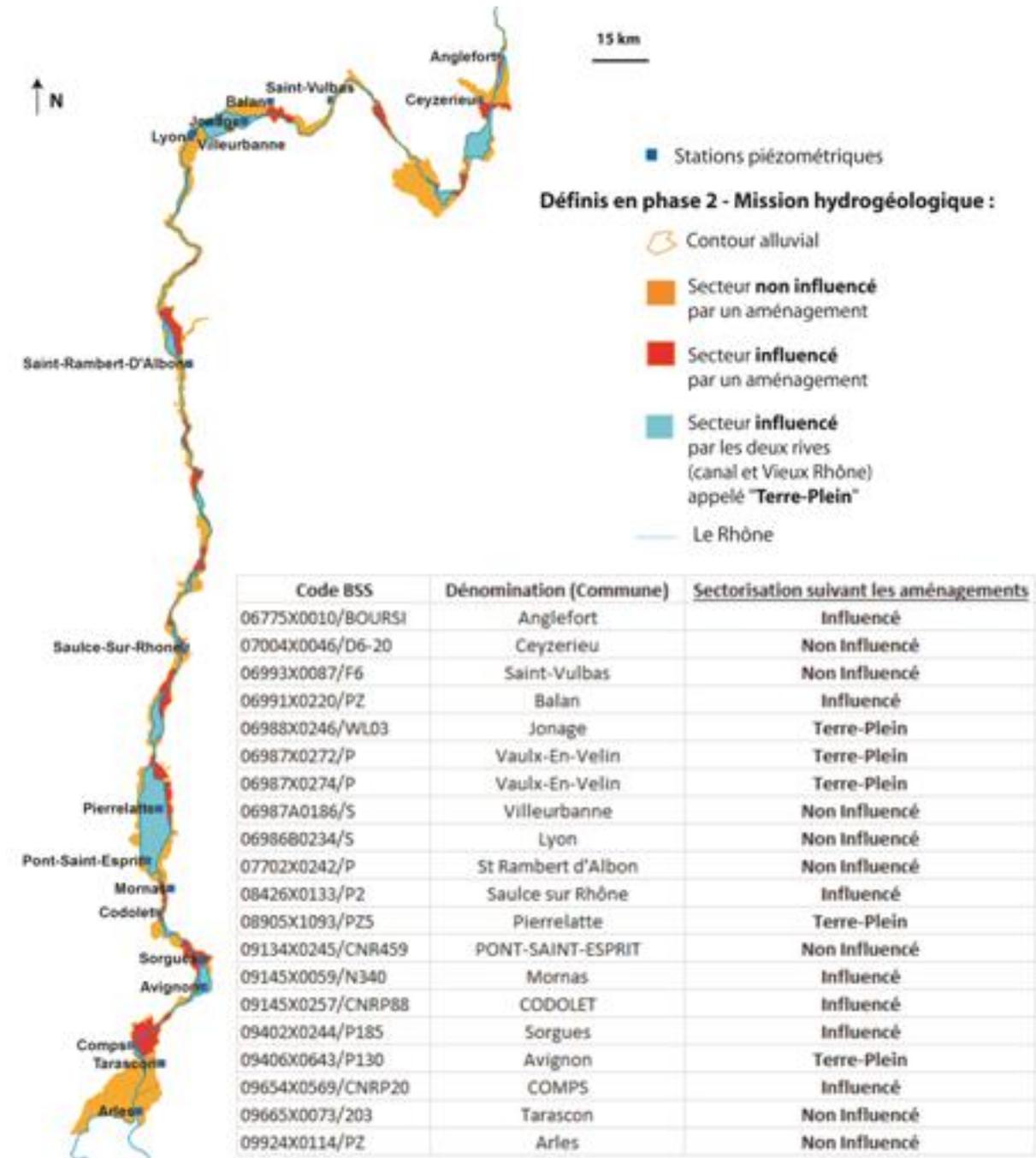
En effet, si une station échantillonne la variation du niveau de la nappe alluviale dans un secteur où le Rhône est endigué (à proximité d'un canal d'amenée ou d'un Rhône « unique » en amont direct d'un barrage par exemple), nous pouvons nous attendre à une absence de variation piézométrique en fonction de la variation du débit du Rhône. En effet, le niveau est régulé à ces sections, même à l'étiage. Inversement, nous pouvons supposer que les variations piézométriques associées aux variations du débit du Rhône sont plus fortes au niveau des sections de Rhône non endigué : le niveau n'y est pas régulé (et donc influencé par les étiages) et le colmatage du fond et des berges est moins important.

Rappelons que dans le travail de sectorisation de la nappe alluviale réalisé en phase 2 de l'étude, nous avons discrétisé la nappe en secteurs influencés ou non par les aménagements. La figure ci-dessous rappelle cette sectorisation. Les points piézométriques choisis y sont reportés et peuvent être associés à un secteur défini : cela permet de voir leur degré de représentativité.

On peut ainsi constater que sur 20 piézomètres :

- ▶ 7 sont implantés dans une plaine alluviale bordée par un Rhône endigué (position dite influencée par les aménagements) ;
- ▶ 8 sont localisés dans une portion de la nappe alluviale en contact avec un Rhône « libre » (position dite non influencée par les aménagements) ;
- ▶ 5 sont dans une position intermédiaire, c'est-à-dire dans un îlot limité à la fois par une section de Rhône endigué mais aussi par une portion de Rhône libre.

Notons que les trois chroniques longues (supérieures à 30 ans) correspondent toutes à des piézomètres non influencés par des aménagements du fleuve, donc a priori susceptibles de renseigner sur d'éventuelles relations entre étiages du Rhône et variations piézométriques.



5.7.2 Premières analyses sur trois chroniques piézométriques longues

Les épisodes historiques d'étiage remarquable du Rhône sont présentés dans le chapitre 3 du présent rapport. Le tableau ci-dessous rappelle les épisodes d'étiage remarquable identifiés.

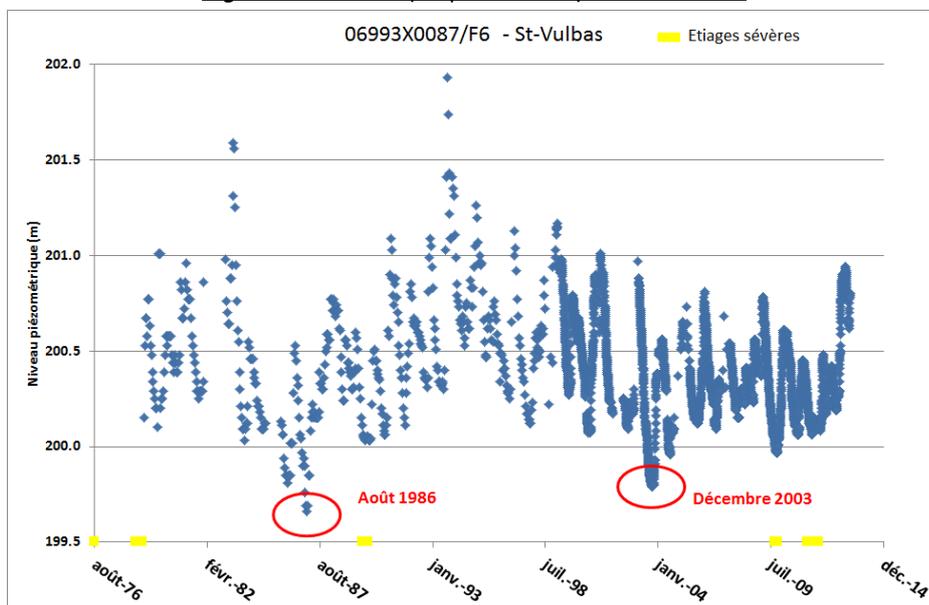
Tableau 11 : Identification des périodes de très bas débits du Rhône pour plusieurs années

Année de basses eaux	Période de l'année											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1921												
1947												
1949												
1962												
1964												
1972												
1976												
1978												
1985												
1989												
2003												
2005												
2009												
2011												

PIÉZOMÈTRE DE ST VULBAS

La station de St-Vulbas présente des mesures journalières sur une période allant de 1979 à 2013. Les données rapportant les grandes périodes d'étiage sur la station de Ternay (plus à l'aval de Lyon, en direction de Givors) sont utilisées car ce point est le plus proche de la station piézométrique. On identifie ainsi quatre périodes d'étiages sévères : de mars à août 1976, de septembre à décembre 1989, de septembre à octobre 2009, d'avril à octobre 2011.

Figure 38 : Chronique piézométrique à St-Vulbas



De manière générale, les variations du niveau piézométrique entre hautes eaux et basses eaux sont de l'ordre de 2 m en moyenne pour toute la série. Les minima piézométriques sont généralement observés pour les mois d'août et septembre mais il peut arriver qu'ils soient très marqués durant les mois d'automne.

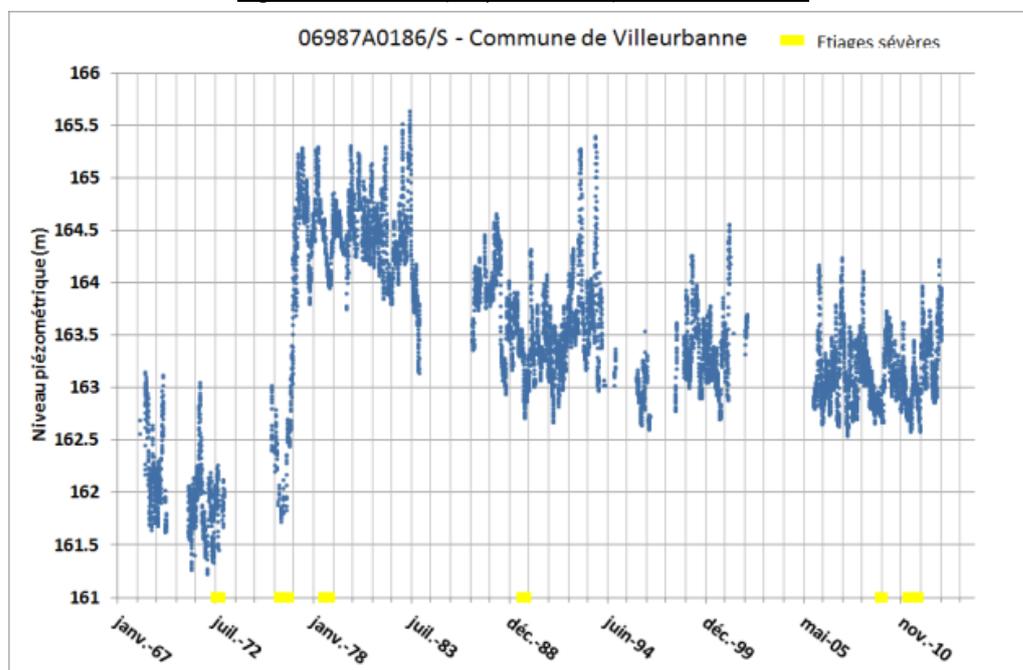
En première approximation, il est difficile de déterminer une relation univoque entre étiages sévères et minima piézométriques.

En effet, si l'on observe que les étiages sévères du Rhône correspondent bien à des périodes de baisse du niveau piézométrique, ce ne sont pas les minima piézométriques les plus marqués. Ceux-ci sont observés durant les années 1986 et 2003 qui ne sont pas des années remarquables en termes d'étiage du fleuve.

PIÉZOMÈTRE DE VILLEURBANNE

La station de Villeurbanne présente des mesures journalières sur une période de 45 ans : de 1968 à 2013. Cette station est également considérée comme étant la plus proche des points de mesure hydrométrique de Ternay ; ce sont donc les mesures enregistrées sur cette station qui ont servi à déterminer les périodes d'étiage sévère. On identifie ainsi cinq périodes d'étiages sévères : de août à novembre 1972, de mars à aout 1976, de septembre à décembre 1989, de septembre à octobre 2009, d'avril à octobre 2011.

Figure 39 : Chronique piézométrique à Villeurbanne



La chronique piézométrique est caractérisée par une certaine complexité :

- ▶ On observe un premier "palier" piézométrique de 1968 à fin 1977, avec des variations liées au cycle des hautes et basses eaux, comprises entre 161 et 163 m NGF. Les minima piézométriques sont observés durant les mois de février à mars. Ce comportement est difficile à expliquer ; insistons sur l'année 1976 avec un minima en mars qui est suivi d'une hausse piézométrique certaine alors que le Rhône subit simultanément une baisse de débit remarquable.
- ▶ On observe une brutale augmentation du niveau piézométrique entre avril 1976 et février 1977, qui passe ainsi de 161,7 m NGF à 165,2 m NGF. Nous n'avons pas d'explication à ce phénomène.
- ▶ De 1977 à nos jours, le niveau piézométrique présente une tendance sur le long terme à la baisse, avec des cycles annuels hautes eaux-basses eaux bien marqués (amplitude de l'ordre de 2 m).

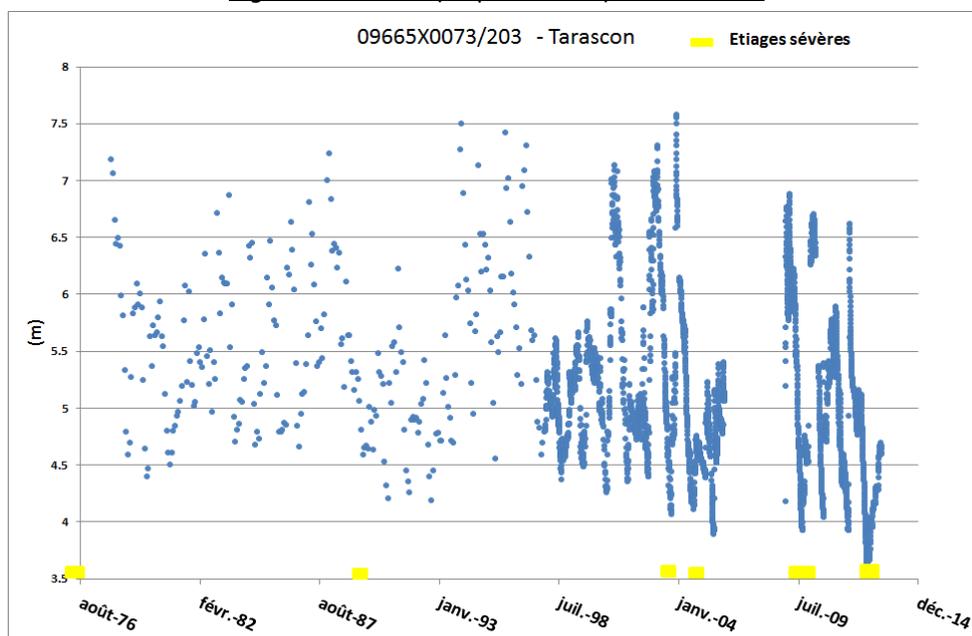
Ces observations, qui traduisent un signal complexe, probablement influencé par de multiples phénomènes (influence des encaissements fluvio-glaciaires, phénomènes de colmatage ou de recharge exceptionnels, politique de prélèvements...), ne peuvent être expliquées pour l'instant sans information complémentaire sur le secteur.

Comme pour les données du piézomètre de St-Vulbas, les étiages sévères du fleuve ne correspondent pas à des années de basses eaux remarquables.

PIÉZOMÈTRE DE TARASCON

La station de Tarascon propose des mesures journalières sur une période de 1978 à 2013. Les données enregistrées par la station hydrométrique de Beaucaire ont été utilisées afin de délimiter les périodes d'étiage historiques du Rhône sur cette zone. On identifie ainsi cinq périodes d'étiages sévères : de août à octobre 1989, de juillet à août 2003, août 2005, octobre 2009, mai juin 2011.

Figure 40 : Chronique piézométrique à Tarascon



Cette chronique présente des caractéristiques intéressantes :

- ▶ On observe une forte amplitude annuelle entre hautes et basses eaux, de l'ordre de 3 à 4 m.
- ▶ Il semble que depuis 1995, la courbe présente une tendance à la baisse qui s'est accentuée depuis le début des années 2000.
- ▶ En première approximation, il apparaît que les étiages sévères du Rhône correspondent bien à des minima remarquables du niveau piézométrique. Notons cependant que tous les minima piézométriques ne correspondent pas systématiquement à des étiages sévères du fleuve (relation non univoque).

Précisons que ce secteur est caractérisé par une forte influence anthropique : influence par une alimentation artificielle liée à l'irrigation gravitaire mais aussi par de forts prélèvements agricoles.

C'est un élément important qui conduit à considérer la relation non univoque proposée entre le débit du fleuve et la piézométrie. Il faut en effet rappeler que tout épisode d'étiage est produit par une absence de précipitations sur de longues périodes ; et que cette absence de précipitations peut aussi conduire à une augmentation significative des prélèvements sur la période donnée.

5.7.3 Premiers avis sur les relations entre piézométrie et étiages du Rhône

Les trois chroniques longues analysées montrent **qu'il est difficile de mettre en évidence une relation entre minima piézométriques et étiages remarquables du fleuve** :

- ▶ Sur deux des chroniques, les périodes de fort étiage répertoriées ne correspondent pas à des baisses piézométriques exceptionnelles.
- ▶ Sur une chronique, on observe une association entre minima et étiages mais le piézomètre est localisé dans une nappe très influencée par les prélèvements et cette association doit être considérée avec prudence.

Cette première analyse sommaire montre la difficulté de mettre en avant les relations hydrauliques possibles entre le Rhône et sa nappe alluviale :

- ▶ En effet, le signal piézométrique est la résultante de plusieurs phénomènes venant impacter la nappe, les principaux retenus pouvant être : la présence d'ouvrages, la piézométrie des encaissements géologiques, le signal pluviométrique et les influences anthropiques telles que les prélèvements ou les retours liés à l'irrigation.
- ▶ Ajoutons que **le signal enregistré par un piézomètre est très sensible aux conditions locales** (perméabilité autour de l'ouvrage, présence de zones préférentielles d'infiltration, etc.) et qu'il est généralement difficile de distinguer ces influences locales d'influences relatives à d'autres échelles, comme celle d'une variation de la charge aux limites (niveaux d'eau dans un cours d'eau en connexion hydraulique avec la nappe).

Rappelons qu'il est prévu de réaliser dans le cadre de la phase 3 de cette étude une analyse détaillée de la relation entre baisse du débit du fleuve et productivité de la nappe alluviale. Il est ainsi prévu d'approfondir cette première analyse des relations entre chroniques piézométriques et débit du fleuve. Notons qu'elle sera confortée par deux approches complémentaires :

- ▶ Recherche des anomalies historiques de production des 80 champs captant AEP situés dans la nappe alluviale du Rhône.
- ▶ Détermination de la sensibilité de la nappe à des variations de niveau piézométrique, au regard de son épaisseur.

6. PEUT-ON DRESSER UNE TYPOLOGIE DES ETIAGES DU RHÔNE ?

L'analyse détaillée des sept années remarquables dans le chapitre 4, accompagnée de l'analyse globale de 14 années sèches ci-dessus (synthétisée dans le **Tableau 12**), nous amène à conclure à **une grande variabilité des étiages du Rhône** :

- ▶ **Variabilité de la période de l'année** impactée : quasiment toutes les périodes de l'année ont pu être impactées par un épisode de très bas débit du Rhône (voir paragraphe 5.3) ;
- ▶ **Variabilité des facteurs climatiques** (voir paragraphe 5.5) ;
- ▶ **Variabilité de la contribution de chaque affluent** (voir paragraphe 5.4) ;
- ▶ **Variabilité des durées, intensités et magnitudes** des épisodes de basses eaux (voir paragraphe 5.1).

Pour les 14 épisodes de basses eaux étudiés, **on retrouve cependant les caractéristiques communes suivantes** :

- ▶ De très bas débits ont été atteints le plus souvent **entre août et décembre**, et plus précisément :
 - Du Léman jusqu'à l'amont de Lyon, les étiages les plus sévères ont eu lieu majoritairement en automne et en hiver ;
 - De Lyon à la mer, les étiages les plus sévères ont eu lieu majoritairement à la fin de l'été et à l'automne ;
- ▶ **Le Rhône alpestre et la Saône** sont en net déficit lors de ces épisodes de basses eaux dans la quasi-totalité des cas ;
- ▶ **Les étiages sévères du Rhône sont souvent la combinaison d'étiages généralisés des grands affluents du Rhône**. Pour la plupart des épisodes d'étiages importants, tous les grands affluents ont connu des bas débits et tous les tronçons du Rhône ont été impactés, de manière plus ou moins intense.
- ▶ On retrouve, pour la plupart des épisodes de bas débits du Rhône étudiés, une situation d'étiage et de déficit pluviométrique assez généralisée sur les bassins du Rhône alpestre, de la Saône, de l'Isère, et de l'ensemble du Rhône aval. C'est la saisonnalité et l'intensité relative de ces déficits qui varient sensiblement d'une année sur l'autre.

Pour finir, il est nécessaire de rappeler que cette analyse a été menée sur les débits mesurés, influencés notamment par les usages préleveurs, la gestion du lac Léman et de l'ensemble des ouvrages hydroélectriques présents sur le bassin. La mission 2 de l'étude s'attachera à préciser l'influence des usages sur les débits du Rhône, et les épisodes d'étiages en particulier.

Tableau 12 : Pour chacune des 14 années sèches : identification des facteurs climatiques prépondérants, périodes de l'année impactées, principaux affluents déficitaires, et durées et magnitudes des épisodes.

Année de basses eaux	Facteur climatique prépondérant (sur les surfaces contributives des tronçons SDAGE)				Période de l'année												Principaux affluents déficitaires				Durée (indice)	Magnitude (indice)	Durée (jours) (Beaucaire)	Magnitude (Mm3) (Beaucaire)
	Composante Suisse	Précipitations (France)	Neige (France)	ETP (France)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	R. Alpestre (Suisse + Arve)	Saône - Ain	Isère	Aval - Durance				
1921					1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Oui	Oui	partiel	Oui	3	3	160	1 853
1947					1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	partiel	Oui	partiel		1	0	60	228
1949					1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	partiel	Oui	partiel		1	0	70	339
1962	Suisse	Lagnieu - Ternay			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	partiel	Oui	Oui	partiel	1	1	59	498	
1964	Suisse	Ensemble	(Valence)	(Ternay)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Oui	Oui	partiel		1	0	0	0	
1972	Suisse	Lagnieu - Ternay			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Oui	Oui	partiel		1	2	57	393	
1976	Suisse	Lagnieu - Viviers		Lagnieu - Valence	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Oui	Oui	Oui		1	1	92	1 023	
1978	Suisse	Ensemble	Valence		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Oui	Oui	Oui	Oui	1	1	58	501	
1985	Suisse	Ensemble	(Valence)	(Lagnieu Ternay)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	partiel	Oui	Oui	Oui	1	1	75	425	
1989	Suisse	Ensemble	Ensemble		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Oui	Oui	Oui	Oui	2	2	95	1 082	
2003		Ternay - Valence		Ternay - Valence	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Oui	Oui			0	0	0	0	
2005	Suisse	Ensemble	Températures Valence	(Ternay)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Oui	Oui	partiel		0	0	10	59	
2009	Suisse	Lagnieu - Viviers			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Oui	Oui	Oui		1	1	24	211	
2011	Suisse	Ternay -	Valence	Ensemble	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Oui	Oui	Oui		1	1	46	334	

NB : Ce tableau doit être lu avec prudence, il s'agit d'une analyse qualitative de l'impact des différents facteurs climatiques et hydrologiques sur les épisodes d'étiages du Rhône à partir des données hydrométriques, il est soumis à une part de subjectivité dans l'appréciation des différents facteurs.

7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Catalogne, Amélioration des méthodes de prédétermination des débits de référence d'étiage en sites peu ou pas jaugés, 2012

Giuntoli & Renard. Identification des impacts hydrologiques du changement climatique : vers un réseau de référence pour la surveillance des étiages. 2009-2011.

Lang & al., Le dispositif PRESAGES (PREvisions et Simulations pour l'Annonce et la Gestion des Etiages Sévères) : des outils pour évaluer et prévoir les étiages, 2006

Lang & al., Sévérité des étiages et indigence des précipitations : une relation évidente mais rarement simple - Exemple en régime pluvial océanique, 2011

Sauquet, Examen de la stationnarité des écoulements du Rhône en lien avec la variabilité climatique et les actions humaines, 2003

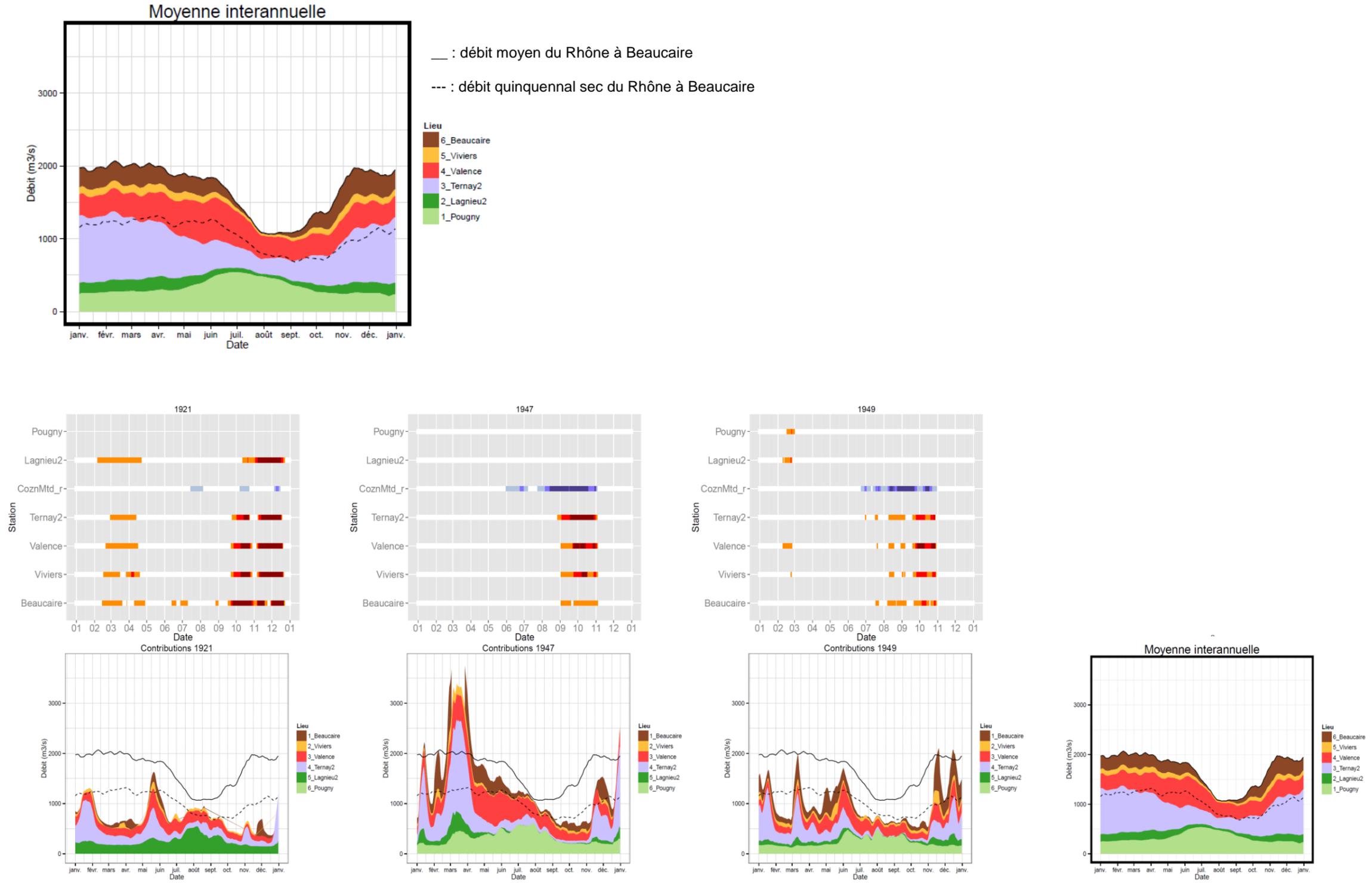
ANNEXES

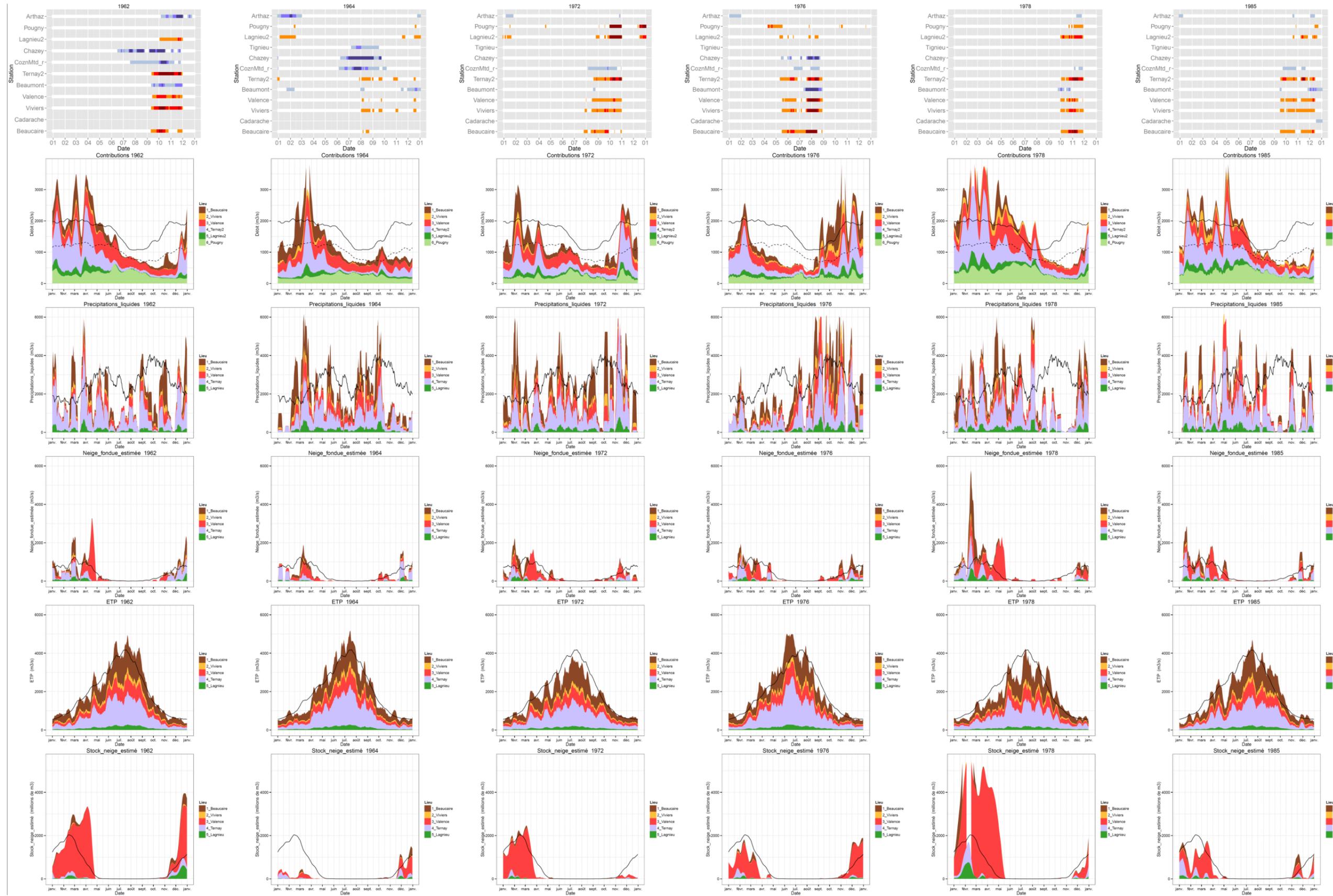
ANNEXE 1 : Indicateurs hydrologiques aux 13 points d'étude, calculés sur la période 1980-2011*

Indicateurs de régime moyen et d'étiage (m3/s)														
Cours d'eau	Station	codeBV	Module	Module / 10	Module / 20	QMNA moyen	QMNA5	QMNA2	VCN10 moyen	VCN10_2ans	VCN10_5ans	VCN3 moyen	VCN3_2ans	VCN3_5ans
Arve	Arthaz	V0222010	70	7	4	30	22	28	21	21	16	20	19	15
Rhône	Pougny	V1000010	343	34	17	204	167	200	153	148	119	126	121	96
Fier	Motz	V1264021	36	4	2	12	4	8	5	4	3	4	3	2
Guiers	Belmont	V1534021	19	2	1	5	3	4	3	3	2	3	2	1
Rhône	Lagnieu	V1630020	472	47	24	282	216	272	217	210	170	194	189	158
Bourbre	Tignieu	V1774010	7	1	0	3	2	3	3	2	2	2	2	2
Saône	Couzon au Mtd_or	U4710010	434	43	22	100	63	91	71	64	44	64	57	38
Rhône	Ternay	V3130020	1041	104	52	509	392	492	398	387	313	361	351	287
Isère	Beaumont	W3540010	328	33	16	203	164	198	164	161	135	143	140	117
Rhône	Valence	V4010010	1398	140	70	729	577	709	578	564	465	531	516	424
Rhône	Viviers	V4530010	1486	149	74	764	605	743	619	604	498	567	553	457
Durance	Cadarache	X3000010	153	15	8	74	51	70	54	48	32	44	38	24
Rhône	Beaucaire	V7200010	1678	168	84	843	680	823	686	670	553	622	606	499

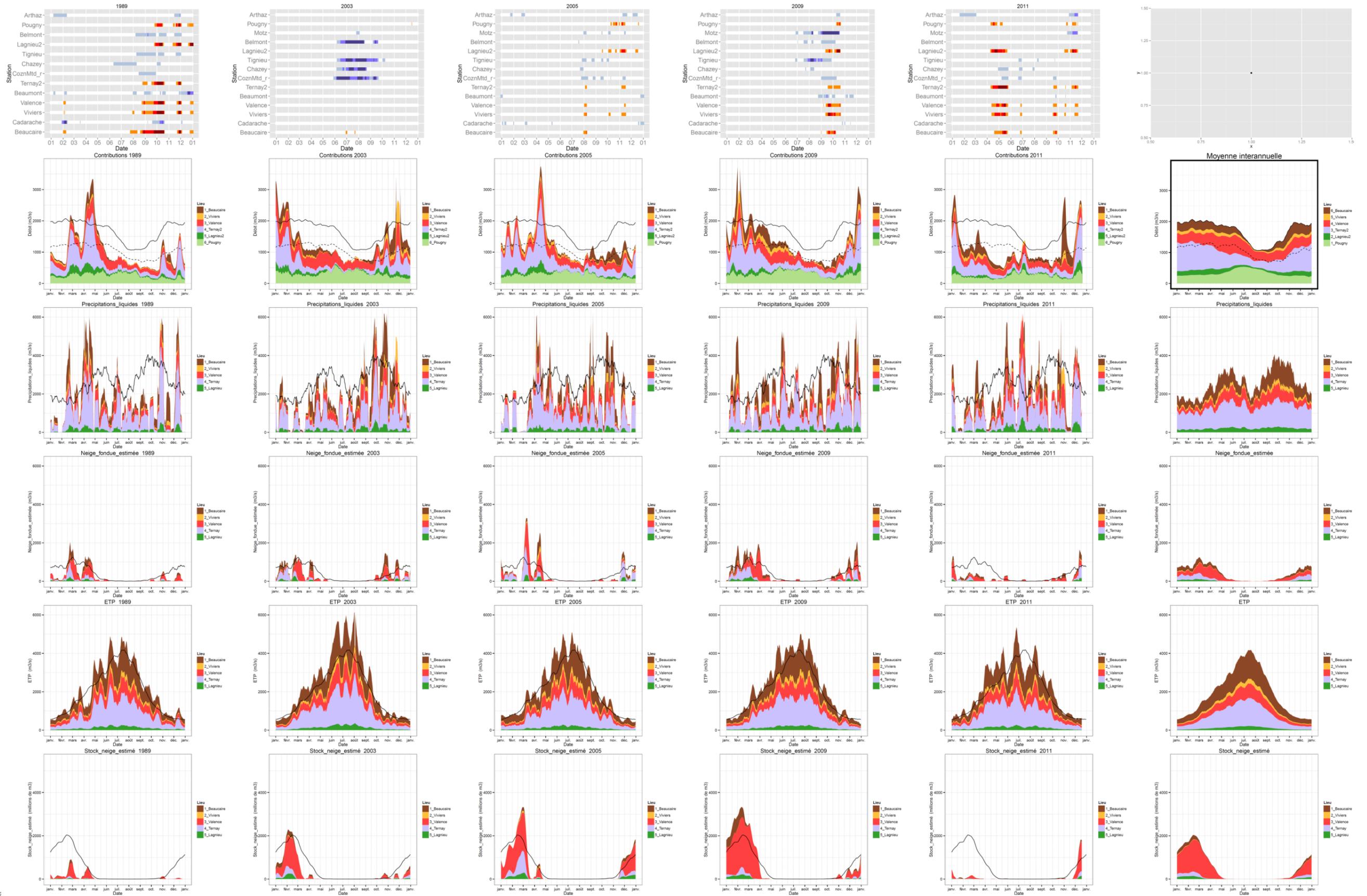
(*) Pour les 13 stations étudiées, on dispose de moins de 3% de lacunes sur les débits journaliers pour la période 1980-2011, à l'exception des stations de Belmont sur le Guiers et Motz sur le Fier, pour lesquelles les indicateurs sont calculés sur les périodes 1986-2011 et 1995-2011 respectivement.

Annexe 2 : Hydrologie et climatologie des 14 années sèches du Rhône étudiées





p:\bril\chazot\800420_etiages_rhone\100_brl_etude_etiages_rhone_aermc_rendu_final\rapports\phase2\800420_ph2_a_m1_principal_finb.docx / Valerie Mathieu



Annexe 3 : Zoom sur les étiages de quelques grands affluents

Dans cette partie, on présente un zoom sur les étiages de trois affluents du Rhône : la Saône, l'Isère et l'Arve. Les stations de référence de l'étude (Couzon sur la Saône, Beaumont sur l'Isère et Arthaz sur l'Arve) sont utilisées pour cette étude.

NB : l'Ain, dont le module est de 124 m³/s, n'est pas étudié en détail dans le présent rapport (pas de station de référence définie), mais il a fait l'objet d'une étude volumes prélevables.

Le tableau ci-après rappelle quelques ordres de grandeur des débits moyens aux 7 stations SDAGE de l'étude.

Tableau 13: Débits moyens annuels et du mois d'août de quelques affluents du Rhône, calculés sur la période 1980-2011*.

Nom des affluents	Module interannuel		Débits d'août	
	Module (m ³ /s)	Part du module du Rhône à Beaucaire (%)	Débit moyen (m ³ /s)	Part du débit moyen du Rhône à Beaucaire (%)
Arve	70	4	78	8
Fier	36	2	14	2
Guiers	19	1	8	1
Bourbre	7	0	3	0
Saône	434	26	134	14
Isère	328	20	252	26
Durance	153	9	96	10

(*) Excepté pour le Fier : 1995-2011 ; et le Guiers : 1986-2011

Suite au travail d'identification des épisodes d'étiage sur le bassin du Rhône présenté au chapitre 3, nous avons sélectionné 4 années sèches pour l'étude des basses eaux de l'Arve, la Saône et l'Isère :

- ▶ **1962** où les trois cours d'eau sont en situation d'étiage ;
- ▶ **1989, 2003 et 2009** où uniquement la Saône et l'Isère sont en situation de basses eaux.

Dans ce chapitre, on présentera :

- ▶ **les régimes hydrologiques** des trois affluents considérés dans un premier temps ;
- ▶ **l'analyse de ces années sèches pour les trois affluents**, avec une prise en compte des données météorologiques. Pour la description des étiages, les pourcentages présentés correspondent au rapport entre l'année étudiée et la moyenne interannuelle de la variable étudiée.

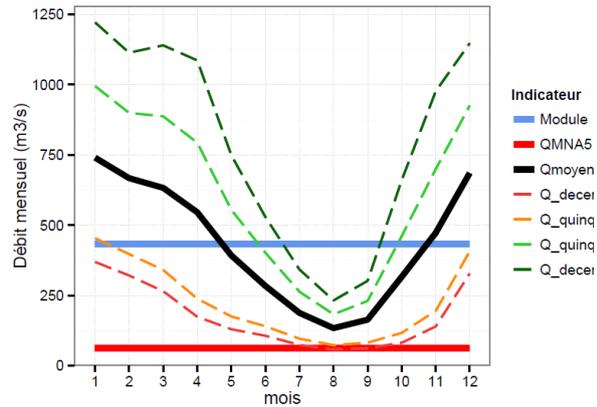
LA SAÔNE

La Saône se jette dans le Rhône à l'entrée de l'agglomération lyonnaise et ses débits sont mesurés à la station hydrologique de Couzon-au-Mont-d'Or (Cf. Figure 1 : Carte des surfaces contributives aux points SDAGE du Rhône). La superficie du bassin versant en ce point avoisine les 29 000 km².

La **Saône** est caractérisée par un régime pluvial avec de **hautes eaux en hiver et de basses eaux en été**. Son **module** est de **434 m³/s, soit 26% des débits à Beaucaire** ce qui en fait l'un des affluents les plus contributeurs aux débits du Rhône. Son débit spécifique est de 15 l/s/km².

Tableau 14 : Rappel des débits caractéristiques de la Saône, période 1980-2011

Module interannuel	Module (m³/s)	434
	Part du module du Rhône à Beaucaire (%)	26
Débits d'août	Débit moyen (m³/s)	134
	Part du débit moyen du Rhône à Beaucaire (%)	14
Indicateurs d'étiage	QMNA5 (m³/s)	63
	VCN10_2 (m³/s)	64
	VCN10_5 (m³/s)	44
	VCN10_10 (m³/s)	36



Les figures ci-après représentent les valeurs moyennes mensuelles des débits, précipitations, ETP, et estimation de neige liquide sur le bassin de la Saône à Couzon, pour les 4 années d'étiage, et pour la moyenne interannuelle.

Figure 41 : Débits mensuels de la Saône (m³/s) et sous passement du VCN10_2ans.

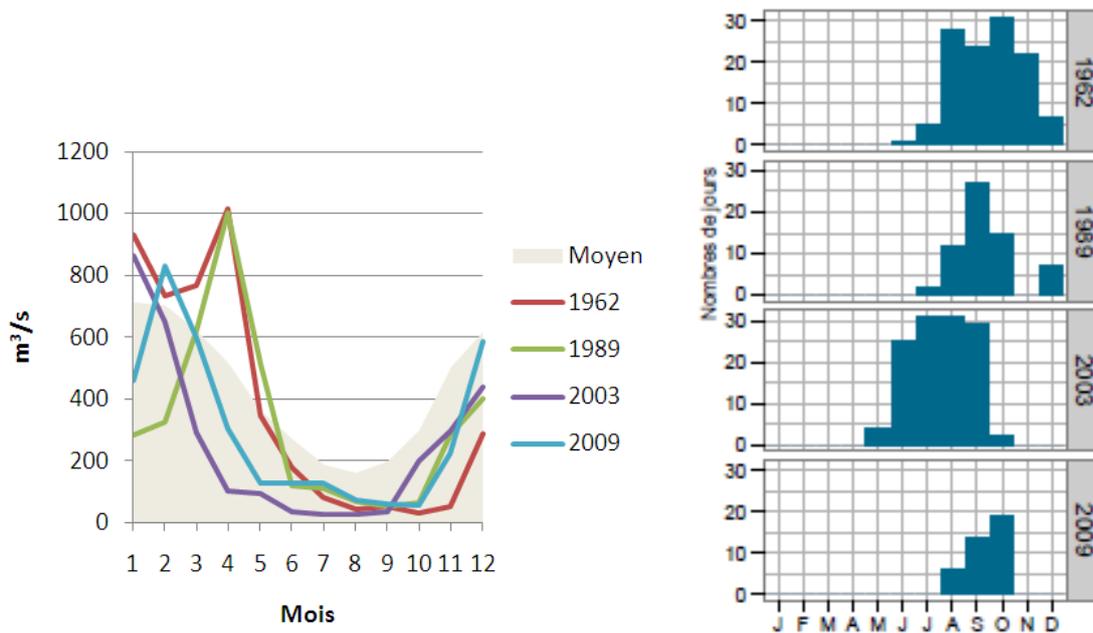
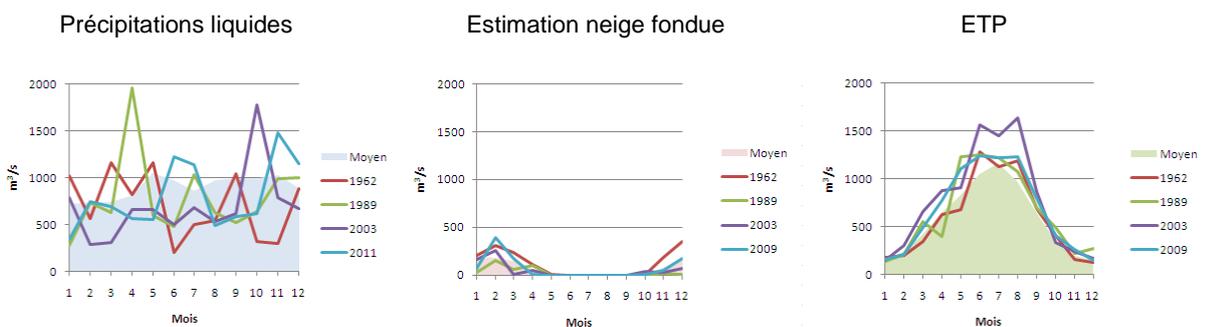


Figure 42 : Moyennes mensuelles des précipitations, ETP et estimation de la neige fondue sur le bassin de la Saône à Couzon.



- ▶ L'année **1962 est marquée par de basses eaux d'août à novembre**, que l'on peut associer à de faibles apports pluviométriques et une ETP plus haute que la moyenne.
- ▶ L'année 1989 connaît bas débits de juillet à octobre principalement.
- ▶ L'année **2003 est marquée par de très bas débits de mai à septembre, avec un sous passage du VCN10_2 pendant quasiment 4 mois (de juin à septembre). Ces basses eaux peuvent s'expliquer par les faibles apports pluviométriques et une ETP exceptionnellement élevée.**
- ▶ L'année 2009 connaît un étiage prononcé de mai à octobre

L'ISÈRE

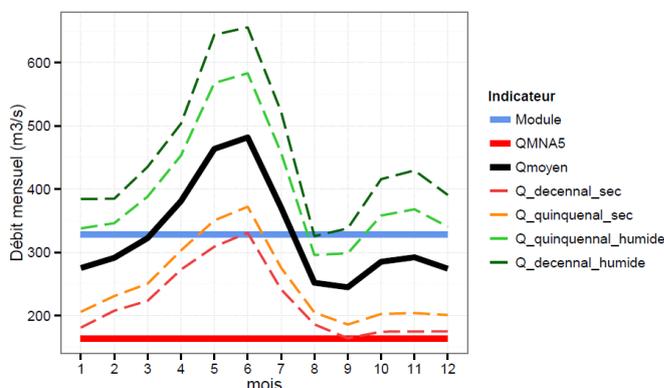
L'Isère est un affluent en rive gauche du Rhône, qui prend sa source au glacier des sources de l'Isère en Savoie, et qui se jette dans le Rhône au nord de Valence. Ses débits sont mesurés à la station hydrométrique de Beaumont (Cf. Figure 1) et la superficie du bassin versant en ce point avoisine les 11 750 km².

L'Isère présente un **régime pluvio-nival** avec de **hautes eaux en automne-hiver liées aux précipitations** et un débit se renforçant au **printemps** lors de la **fonte des neiges** (Cf. **Erreur ! source du renvoi introuvable.**). Son **module** est de **330 m³/s**, soit 20% des débits à Beaucaire. Son **débit spécifique** est de **28 l/s/km²**.

En outre, on rappelle que les débits de l'Isère sont influencés de manière significative par les ouvrages hydroélectriques de stockage présents dans les vallées alpines, qui stockent de l'eau pendant la période de fonte et la déstockent l'hiver. Cela est détaillé dans le rapport de phase 2. Les débits présentés ci-dessous sont les débits mesurés et donc influencés par ces ouvrages.

Tableau 15 : Rappel des débits caractéristiques de l'Isère, période 1956-2011

Module interannuel	Module (m ³ /s)	328
	Part du module du Rhône à Beaucaire (%)	20
Débits d'août	Débit moyen (m ³ /s)	252
	Part du débit moyen du Rhône à Beaucaire (%)	26
Indicateurs d'étiage	QMNA5 (m ³ /s)	164
	VCN10_2 (m ³ /s)	161
	VCN10_5 (m ³ /s)	135
	VCN10_10 (m ³ /s)	124



Les figures ci-après représentent les valeurs moyennes mensuelles des débits, précipitations, ETP, et estimation de neige liquide sur le bassin de l'Isère à Beaumont, pour les 4 années étudiées, et pour la moyenne interannuelle.

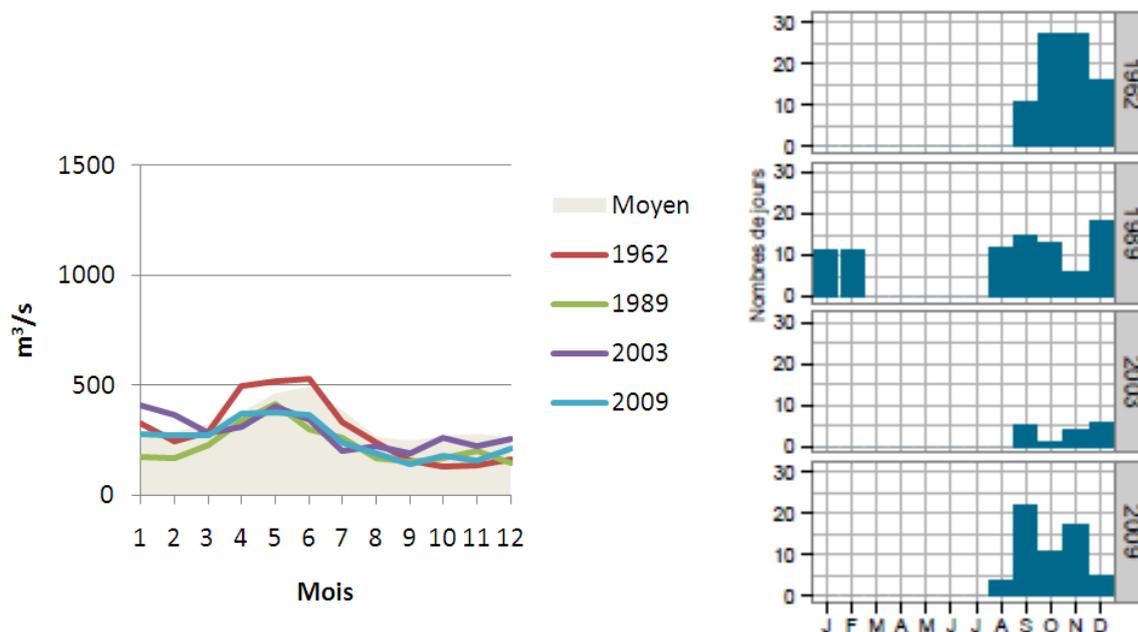
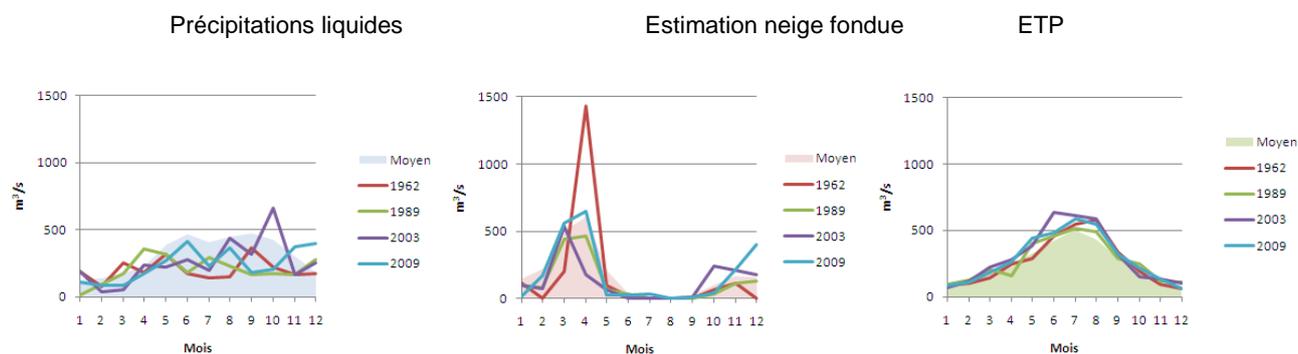
Figure 43 : Débits mensuels de l'Isère (m³/s) et sous-passement du VCN10_2ans.

Figure 44 : Moyennes mensuelles des précipitations, ETP et estimation de la neige fondue sur le bassin de l'Isère à Beaumont



- L'année 1962 est marquée par un étiage prononcé de septembre à décembre, associé à de faibles apports pluviométriques.
- L'année 1989 est marquée par de basses eaux d'août à décembre.
- En 2009, l'Isère connaît de bas débits de septembre à novembre principalement.

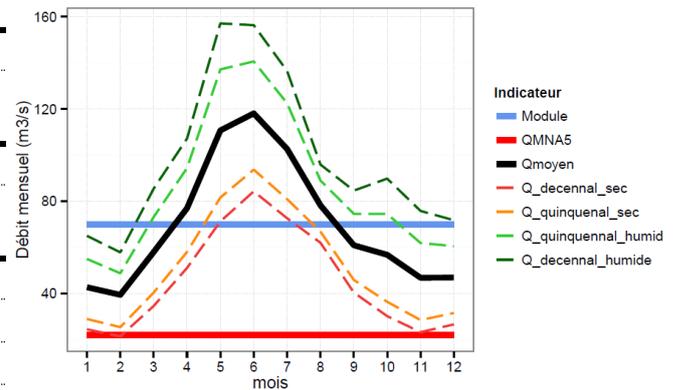
L'ARVE

L'Arve est un affluent en rive gauche du haut Rhône français, qui se jette juste après Pougny, et qui prend sa source dans le massif du Mont-Blanc. Ses débits sont mesurés à la station hydrométrique d'Arthaz et la superficie du bassin versant en ce point avoisine les 2000 km².

L'Arve présente un **régime glaciaire** avec de **basses eaux en hiver** et un **débit très important en été** résultant de la **fonte des neiges** (Cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Son **module** est de **70 m³/s**, et son **débit spécifique** est de **35 l/s/km²**.

Tableau 16 : Rappel des débits caractéristiques de l'Arve, période 1980-2011

Module interannuel	Module (m³/s)	70
	Part du module du Rhône à Beaucaire (%)	4
Débits d'août	Débit moyen (m³/s)	78
	Part du débit moyen du Rhône à Beaucaire (%)	8
Indicateurs d'étiage	QMNA5 (m³/s)	22
	VCN10_2 (m³/s)	21
	VCN10_5 (m³/s)	16
	VCN10_10 (m³/s)	15



Les figures ci-après représentent les valeurs moyennes mensuelles des débits, précipitations, ETP, et estimation de neige liquide sur le bassin de l'Arve à Arthaz, pour les 4 années étudiées, et pour la moyenne interannuelle.

Figure 45 : Débits mensuels de l'Arve (m³/s) et sous passément du VCN10_2ans.

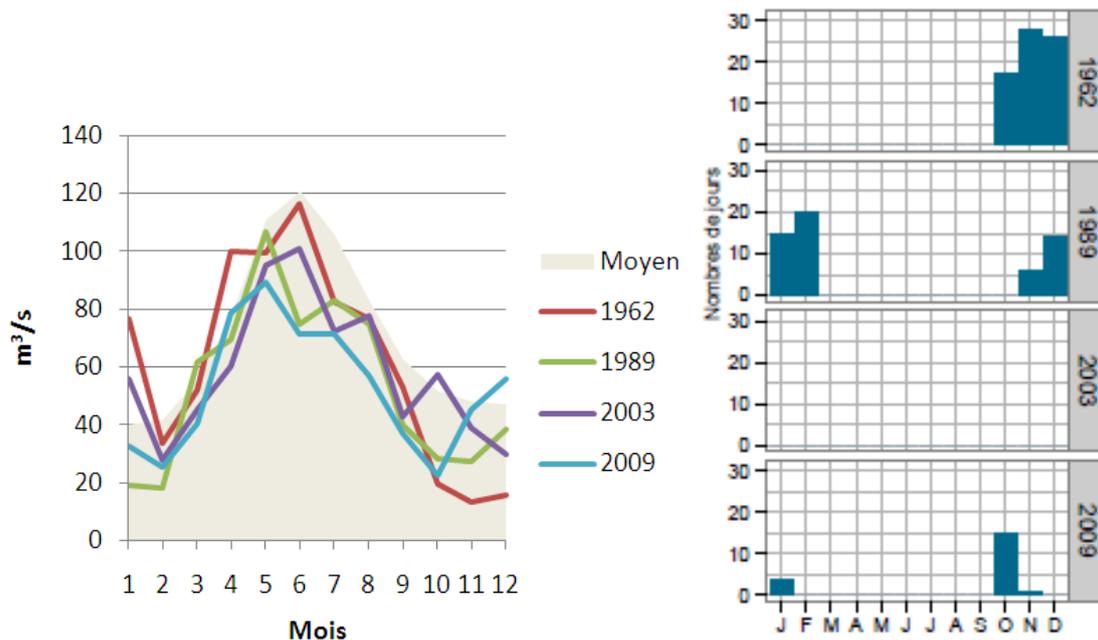
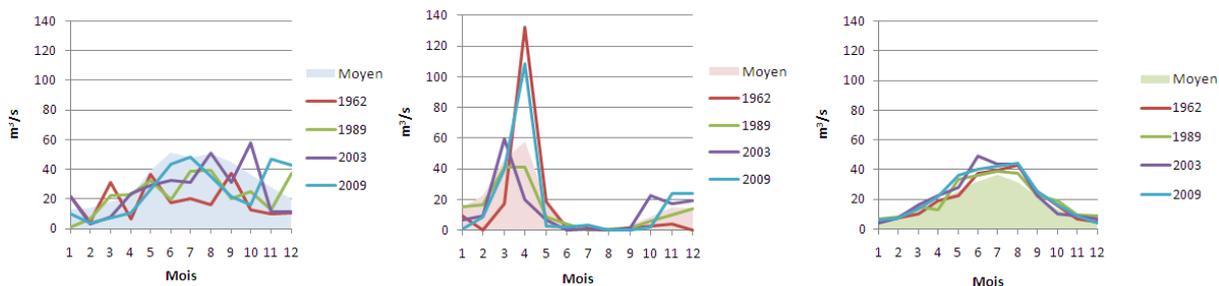


Figure 46 : Moyennes mensuelles des précipitations, ETP et estimation de la neige fondue sur le bassin de l'Arve à Arthaz



Parmi les 4 années présentées, seul l'étiage de 1962 est qualifié d'étiage sévère pour l'Arve. L'épisode d'étiage se produit d'octobre à décembre, est peut être associé à de faibles apports pluviométriques et neigeux.

Comme pour les tronçons du Rhône précédemment étudiés au niveau des points SDAGE, il est **difficile d'attribuer les étiages à une variable en particulier**. Les épisodes de basses eaux des affluents peuvent être la résultante **tant d'un déficit pluviométrique, que d'un manque de neige fondue, d'une augmentation de l'ETP**, ou d'une combinaison de ces facteurs.

Annexe 4 : Tests de rupture des séries hydrométriques du Rhône

Figure 47 : Tests de Pettitt sur les débits annuels

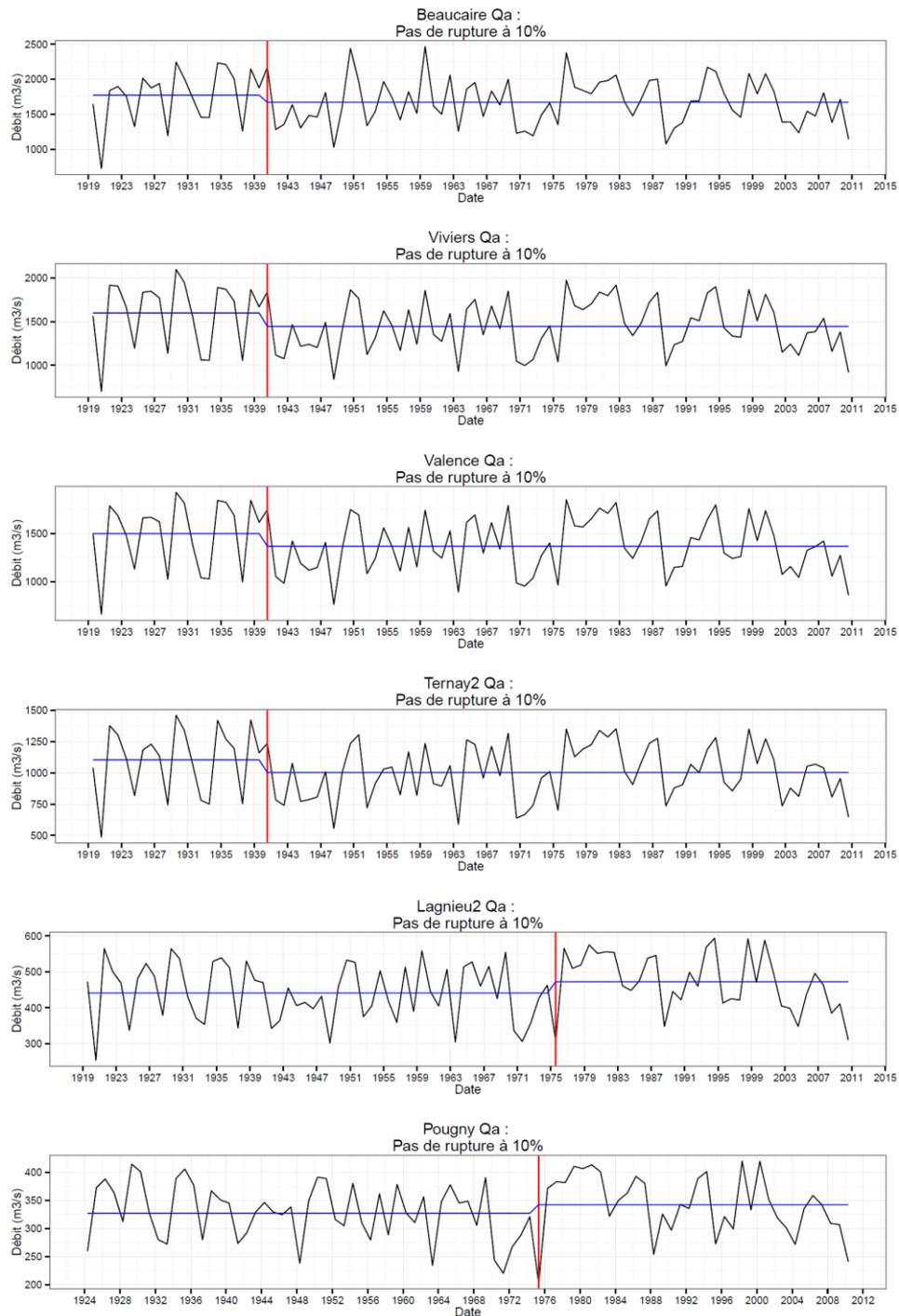


Figure 48 : Tests de Pettitt sur les débits du mois d'août

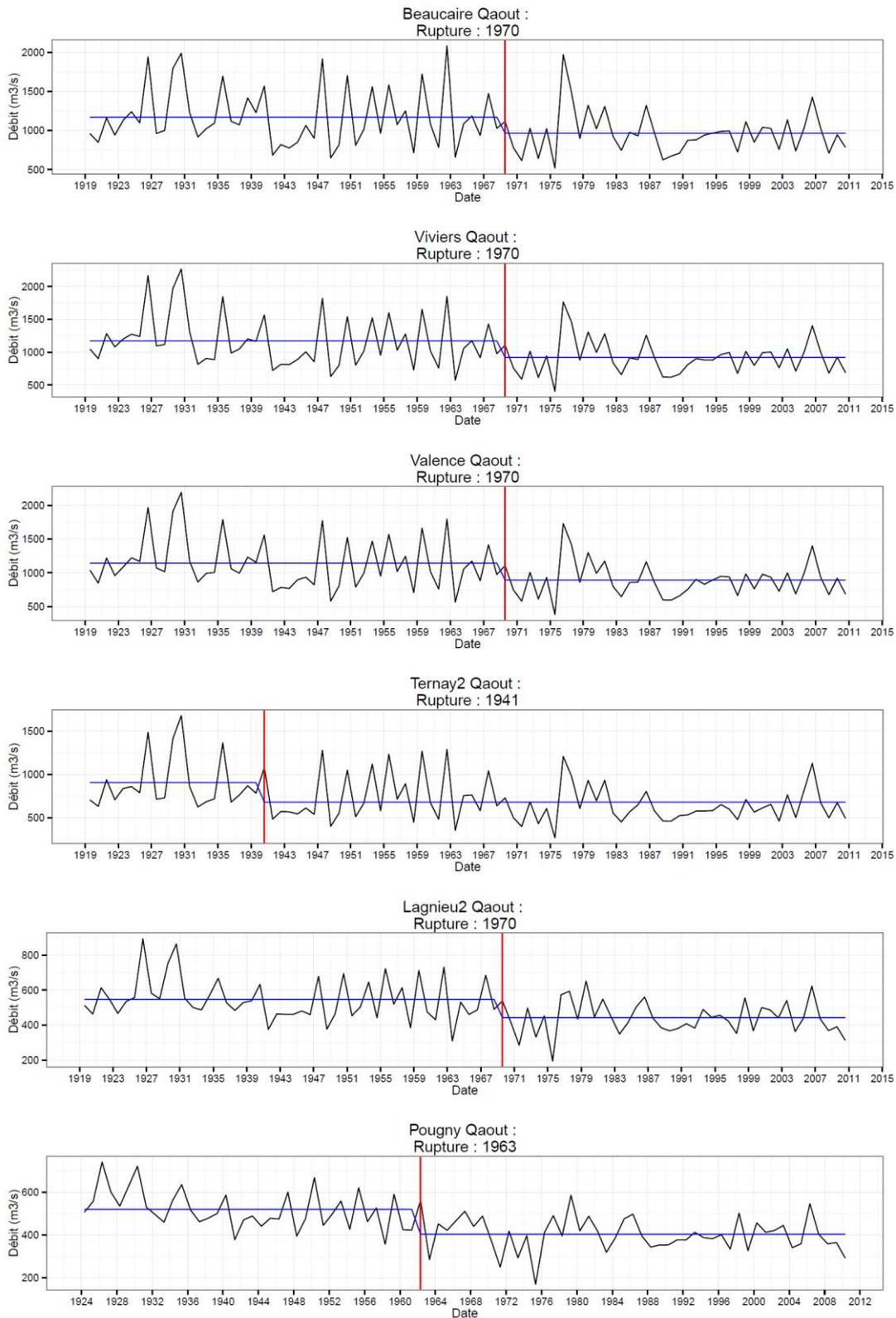


Figure 49 : Tests de Pettitt sur les QMNA

