



Modélisation de la montée vers un état critique de la situation de basses eaux sous forçages naturel et anthropique en région méditerranéenne

Ingrid Canovas

► To cite this version:

Ingrid Canovas. Modélisation de la montée vers un état critique de la situation de basses eaux sous forçages naturel et anthropique en région méditerranéenne. Etudes de l'environnement. Université d'Avignon, 2016. Français. NNT: 2016AVIG1166 . tel-01531552

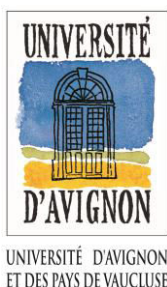
HAL Id: tel-01531552

<https://theses.hal.science/tel-01531552>

Submitted on 1 Jun 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



ACADÉMIE D'AIX-MARSEILLE
UNIVERSITÉ D'AVIGNON
ET DES PAYS DE VAUCLUSE

THÈSE

présentée pour obtenir le grade de Docteur en Sciences Humaines et Sociales
de l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse

SPÉCIALITÉ : Géographie

École doctorale 537 Culture et Patrimoine
UMR ESPACE 7300

Modélisation de la montée vers un état critique de la situation de
basses eaux sous forçages naturel et anthropique en région
méditerranéenne

Ingrid CANOVAS

soutenue publiquement le 12 décembre 2016 devant un jury composé de :

M. François LAURENT	Professeur des Universités Université du Maine, Le Mans - UMR 6590 ESO	<i>Rapporteur</i>
M. Pierre PECH	Professeur des Universités Université de Paris 1 Panthéon - Sorbonne - UMR 8591 LGP	<i>Rapporteur</i>
M. Pierre-Gil SALVADOR	Professeur des Universités Université de Lille - EA 4477 TVES	<i>Rapporteur</i>
Mme Claude COSANDEY	DR CNRS émérite Laboratoire de Géo. Phys. P. Birot, CNRS	<i>Examinatrice</i>
M. Vincent MORON	Professeur des Universités Université Aix-Marseille - CEREGE UM34 CNRS IRI	<i>Examineur</i>
M. Lionel GEORGES	Directeur SMAGE des Gardons Nîmes	<i>Invité</i>
Mme Sophie SAUVAGNARGUES	Professeur École des Mines d'Alès - LGEI	<i>Co-Directrice</i>
M. Philippe MARTIN	Professeur des Universités Université d'Avignon - UMR 7300 ESPACE	<i>Co-Directeur</i>



REMERCIEMENTS

Quand arrive l'heure d'adresser ses remerciements à l'ensemble des personnes qui ont vécu ou subi, de près ou de loin, cette épreuve particulière (et mystérieuse), c'est qu'un point final a été posé, la mission a été accomplie. Passés la panique, le stress, l'incertitude..., les émotions qui nous ont tenus en haleine jusqu'alors s'envolent progressivement et laissent place au soulagement, l'apaisement, la satisfaction de cet accomplissement, à la joie d'en avoir enfin terminé. Et puis, une évidence vient nous frapper : nous n'avons pas toujours pris le temps, ni trouvé les bons mots pour exprimer sa gratitude, sa reconnaissance, ou tout simplement su dire merci aux personnes qui nous ont entourés, supportés, encouragés durant tout ce temps.

Alors, le temps est venu de leur consacrer un petit moment, à eux aussi, car leur contribution dans cette aventure est réelle et inestimable. Cet exercice n'est toutefois pas possible sans prise de recul, sans établir le bilan de ces années, qui se sont étirées jusqu'à ce qui semblait être parfois l'infini.

Quatre années constituent une période suffisamment longue pour voir s'opérer de nombreux changements, et faire face à des ruptures plus ou moins importantes. C'est aussi le temps nécessaire pour faire de nouvelles rencontres (éphémères ou devenues pérennes) et approfondir certaines relations. Que ce soit sur le plan personnel ou professionnel, ces quatre années ont été d'une richesse incroyable, une mise à l'épreuve permanente, une perpétuelle remise en question, une succession de moments de doutes et de grande satisfaction, de désillusions et d'accomplissement, de tristesse et de joie et surtout, de construction personnelle, de découverte de soi et des autres, un apprentissage et une immersion dans un univers particulier, qui est celui de la recherche et de l'enseignement, auquel finalement on décide d'adhérer ou non.

A l'heure de ce bilan, il est impossible de nier que ma vie a bien changé et c'est avec davantage d'assurance que je peux affirmer que c'est la satisfaction et le bonheur qui m'animent aujourd'hui. Et si ce constat est autant positif, c'est incontestablement grâce à la synergie des personnalités rencontrées durant l'intégralité ou une partie de ces quatre années.

Pour qu'un système fonctionne correctement et assure sa fonction essentielle de manière optimale, il est en effet indispensable que chacun des éléments qui le composent joue leur rôle, et que l'environnement dans lequel il évolue soit des plus favorables.

Dans le cas présent, l'équilibre a été assuré par un ensemble complexe de personnes, présentes à tous les niveaux :

-
- **Le comité d'évaluation** : celui qui fixe les conditions de réalisation de la fonction du système.

Je tiens, en premier lieu, à remercier les membres du jury, qui ont accueilli ce projet de recherche avec une grande considération, un intérêt certain et beaucoup de gentillesse. Leur regard critique et leur investissement dans la relecture et l'évaluation méticuleuses de ce travail m'ont apporté une reconnaissance que j'étais loin d'espérer. Je les remercie également pour la sincérité de leurs encouragements qui m'a ainsi offert un regard nouveau sur mon horizon professionnel.

- **La direction** : l'entité maîtresse du système, responsable de son bon fonctionnement, le soutien technique et intellectuel, le guide qui cadre et maintient la trajectoire du système au sein de son domaine d'équilibre.

Je souhaite également remercier vivement mes plus proches collaborateurs, fidèles alliés dans ce travail, que je n'ai pas réussi à ébranler, malgré quelques moments difficiles. En ce sens, j'adresse toute ma gratitude à Philippe Martin, pour sa sagesse, son implication sans faille et la très grande qualité de ses conseils. Mais également à Sophie Sauvagnargues, mon pilier, qui m'a offert toute sa confiance et sa bienveillance, et a toujours mis un point d'honneur à ce que je prenne les rênes et conserve la maîtrise de ce travail.

- **L'équipe d'encadrement** : le groupe fondateur du système, un ensemble de compétences qui repousse les limites du domaine d'équilibre du système, afin qu'il puisse se déployer et s'ouvrir à de nouvelles perspectives sans basculer.

J'adresse mes chaleureux remerciements au groupe « Criticité », et plus particulièrement à Sandra P., Patricia C., Annick D., Jean-François D-L., Jean-Marc D. et Nadine G., pour leur contribution majeure à la réflexion qui supporte ce travail de recherche, leur soutien, leur gentillesse et leurs personnalités attachantes.

- **L'équipe d'animation** : les conditions extérieures qui assurent la qualité de l'environnement dans lequel évolue le système.

Un grand merci à tous les membres de l'ISR, avec qui j'ai eu la chance, durant près de six années maintenant, d'évoluer, d'apprendre et de partager, à titre professionnel mais aussi personnel : Pierre-Alain, Flo, Fred, Laurent, Pierre(s), Roro, Jérôme, Aurélia, Coco, Domi et tous les autres, autant de personnalités si différentes, qui, ensemble contribuent à un cadre de travail bienfaisant et une atmosphère légère, chaleureuse et conviviale.

Sans oublier, à Avignon, Nathalie, pour son accueil, sa disponibilité et sa joie de vivre, mais aussi Chloé, Julien et Jules, pour m'avoir intégré dans le cercle des doctorants de l'UMR Espace avec autant d'enthousiasme et de sincérité, et enfin Johnny pour m'avoir offert la possibilité de me découvrir des qualités pédagogiques en me confiant une partie de ses cours, que j'ai enseignés durant deux années.

-
- **Le groupe de soutien** : la source d'énergie du système, qui lui permet de rester dynamique en toute circonstance.

J'adresse mes remerciements les plus affectueux à tous mes amis et à toutes les personnes qui me sont (devenues) proches :

A mon super colocataire de bureau et ami Dimitri (le L110 vivra toujours !), à Noémie et Petit Samy. A ma Milou, que j'ai eu la joie de retrouver en milieu de parcours, et qui m'a accompagné jusqu'au bout avec toute sa fraîcheur et sa bonne humeur permanente. A Charlotte, ma plus fidèle amie, qui n'a cessé de me rappeler sa fierté et sa foi en moi : nous en avons parcouru du chemin... !

Enfin, cette liste serait loin d'être complète sans une tendre pensée pour le 47 boulevard de la Marne (à Steve et Banban), l'équipe et le staff de la SaintéLyon 2015 (code 4296 : Emilie(s) et Riton), sans oublier les fidèles du Saxo et ce grand passionné de papillons (oui, Ienien, c'est pour toi !).

- **La famille** : les constantes psychologiques, qui empêchent le système de se saborder ou de s'autodétruire.

Je remercie également mes parents, Poulettou, Mimi et Boris, ainsi que toute ma famille, pour leurs innombrables encouragements et leur tendre naïveté, puisque la réussite n'a toujours été pour eux que l'unique finalité possible de ce travail.

Enfin, je remercie Guillaume, partenaire de tous mes voyages (beaucoup passés, un peu présents mais énormément à venir), que je n'aurais probablement jamais rencontré sans cette thèse. Comme quoi, cette expérience a vraiment du bon... !

Consciente que j'ai très certainement omis quelques noms, et que la portée des mots ne pourra jamais égaler celle des égards, pensées et sentiments que je peux porter à chacun d'entre vous, je vous prie de croire en la très grande sincérité de ces quelques lignes qui vous sont exclusivement dédiées.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	3
Table des matières	7
Table des figures	13
Liste des Encadrés	23
Introduction	27
 PARTIE I DE LA CONCEPTUALISATION DES « BASSES EAUX » À LA DÉFINITION D'UN ÉTAT DE TENSION SUR LA RESSOURCE	 29
CHAPITRE 1 La complexe caractérisation des « basses eaux » : d'un phénomène naturel à une situation socialement construite	33
1.1 Un amalgame entre différents phénomènes hydroclimatiques à préciser	35
1.1.1 Les sécheresses, situations exceptionnelles de grande ampleur	35
1.1.2 Le tarissement, un modèle de vidange des aquifères	38
1.1.3 L'étiage ou la caractérisation des extrêmes hydrologiques	39
1.1.4 Les basses eaux, un phénomène hydrologique « flou »	41
1.2 La genèse des situations de déficit hydrologique : éléments structurants et forçages pesants	45
1.2.1 Les conditions naturelles de formation des bas débits	45
1.2.1.1 Le contexte climatique : recharge en eau des réservoirs	46
1.2.1.2 Les caractéristiques physiographiques : stockage et vidange des réserves	47
1.2.2 L'influence des pressions anthropiques sur le phénomène	48
1.2.2.1 Les pratiques et les usages de l'eau et des sols	48
1.2.2.2 Le mode de gestion de la ressource en eau	50
1.3 Repositionnement conceptuel des basses eaux	51
1.3.1 Des états hydrologiques fréquents à caractériser	52
1.3.2 Le moyen de penser les situations de « manque hydrologique »	53
 CHAPITRE 2 L'étude des basses eaux ou comment caractériser les situations de manque hy- drologique en région méditerranéenne	 55
2.1 L'aire méditerranéenne française à l'épreuve du changement climatique	56
2.1.1 Les spécificités climatiques	57
2.1.1.1 Variabilité des températures moyennes	57

2.1.1.2	Variabilité des précipitations moyennes	59
2.1.1.3	L'insolation moyenne	60
2.1.1.4	Le vent	60
2.1.2	Retour sur les épisodes historiques de sécheresse	61
2.1.3	Les évolutions attendues du régime climatique et ses conséquences sur la ressource en eau	63
2.1.3.1	Les modifications supposées des forçages climatiques	64
2.1.3.2	Les répercussions potentielles sur la nature et la société	65
2.2	La vulnérabilité des territoires méditerranéens	69
2.2.1	Une disparité naturelle dans la disponibilité des ressources en eau	70
2.2.1.1	Les formations alluviales le long des fleuves et des grandes rivières	70
2.2.1.2	Les bassins sédimentaires dans les plaines et sur le littoral	70
2.2.1.3	Les régions de plateaux calcaires, entre littoral et montagne	70
2.2.1.4	Les formations de socle des massifs anciens et les régions montagneuses de terrains sédimentaires plissés	71
2.2.2	Une inégale répartition et concentration des usages de l'eau	72
2.2.2.1	Les zones urbaines et littorales <i>vs.</i> eau potable, industrie et tourisme	73
2.2.2.2	Les plaines alluviales et les collines sèches <i>vs.</i> eau potable et agriculture	73
2.2.2.3	Les contreforts <i>vs.</i> eau potable et tourisme	75
2.2.2.4	Les zones karstiques et les gorges <i>vs.</i> tourisme	75
2.3	La nécessité d'une nouvelle approche pour appréhender les situations de manque d'eau	76
2.3.1	L'analyse locale : les indices et seuils hydrologiques	77
2.3.1.1	Les minima annuels	77
2.3.1.2	Les indices extraits de la courbe des débits classés	77
2.3.1.3	Les indices de débits à durée fixe	78
2.3.1.4	Les indices de durée et de déficit hydrologique	79
2.3.1.5	L'indice de débit de base	80
2.3.1.6	Le coefficient de tarissement	80
2.3.1.7	Les outils réglementaires pour la gestion quantitative de la ressource en eau	82
2.3.2	La caractérisation régionale : les indices et seuils de sécheresse	84
2.3.2.1	Les indices pluviométriques	84
2.3.2.2	Les indices climatiques	86
2.3.3	La démarche nationale : les indices de pénurie en eau	88
2.3.3.1	Disponibilités en eau et seuils de stress hydrique	89
2.3.3.2	Vulnérabilités physique, économique et environnementale	89
2.3.3.3	Sécurité hydrique ou la pénurie en eau comme phénomène social	90
2.3.4	L'apport de l'approche multiscalaire des basses eaux	92
2.3.4.1	Modification spatio-temporelle de la structure du phénomène	93
2.3.4.2	La question de la territorialisation des états de basses eaux	95
CHAPITRE 3 De la conceptualisation de la criticité des états de basses eaux à la définition d'un niveau de tension sur la ressource en eau		97
3.1	La criticité, un concept issu de la physique et des sciences de l'ingénieur	98
3.1.1	Réaction en chaîne	98
3.1.2	Changement d'état d'équilibre	99
3.1.2.1	Dans le domaine des mathématiques	99
3.1.2.2	Dans le domaine de la physique	100

3.1.2.3	Dans le domaine de l'écologie	101
3.1.3	Mesure du risque	102
3.2	La notion de criticité appliquée aux basses eaux	103
3.2.1	Criticité relative <i>vs.</i> criticité absolue	103
3.2.2	La combinaison d'états probabilités	104
3.2.3	Vers des seuils de criticité des basses eaux	105
3.3	Détermination de l'état de tension sur la ressource en eau	106
PARTIE II DU MODÈLE CONCEPTUEL À LA BASE DE DONNÉES « BASSES EAUX »		109
CHAPITRE 4	Des modèles conceptuels pour l'analyse multiscalaire des basses eaux méditerranéennes	113
4.1	Les modèles conceptuels spécifiques à une échelle spatiale donnée	114
4.1.1	Le modèle climatique englobant	116
4.1.2	Le modèle hydrologique synthétique	117
4.1.3	Le modèle anthropique, relatif à l'usage de l'eau (bassin d'usage)	119
4.2	Le modèle conceptuel global multiscalaire	122
4.2.1	Les variables essentielles retenues	122
4.2.1.1	Les variables d'offre	122
4.2.1.2	Les variables de demande	123
4.2.1.3	Les variables de perception	123
4.2.2	Le modèle synthétique multiscalaire	124
4.3	Les modalités associées au changement d'échelle d'analyse et à la résolution spatio-temporelle de l'information	126
4.3.1	Le nombre de variables essentielles à considérer	127
4.3.2	La résolution temporelle de l'information véhiculée	130
4.3.2.1	Le pas de temps des enregistrements	131
4.3.2.2	La profondeur historique des données	132
4.3.3	La résolution spatiale de l'information : les postes de référence	132
4.3.4	Le recours aux proxys	133
CHAPITRE 5	De la création de la base de données « basses eaux » à la construction du modèle territorial des Gardons	135
5.1	La création de la base de données pour l'étude des basses eaux sur le bassin des Gardons	136
5.1.1	Les unités territoriales existantes et les informations associées	136
5.1.1.1	Le zonage hydrographique	138
5.1.1.2	Le découpage réglementaire	139
5.1.1.3	Les limites administratives	139
5.1.1.4	Les entités hydrogéologiques	140
5.1.1.5	Les sites de mesure	140
5.1.2	Données nécessaires <i>vs.</i> données disponibles	141
5.1.2.1	Les paramètres retenus pour renseigner les variables essentielles	142
5.1.2.2	Critique de l'information disponible	143
5.1.3	Le besoin nécessaire d'une base de données coopérative	161
5.1.4	Structure de la base de données « basses eaux »	161
5.2	L'élaboration du modèle territorial du bassin versant des Gardons	165
5.2.1	Les modèles spécifiques aux sous-bassins des Gardons	166
5.2.1.1	Les sous-bassins en tête des Gardons amont	166

5.2.1.2	Les bassins amont - centre	170
5.2.1.3	Les sous-bassins centre - aval	171
5.2.2	Le modèle relatif au bassin des Gardons	172
5.2.2.1	Le modèle simplifié du bassin des Gardons	172
5.2.2.2	Le modèle spatialisé du bassin des Gardons	172
PARTIE III À LA RECHERCHE D'INDICATEURS STATISTIQUES POUR LA DÉTERMINATION D'UN ÉTAT DE CRITICITÉ DES BASSES EAUX		177
CHAPITRE 6 Vers des indicateurs pour la définition de l'état du volume superficiel		181
6.1	Découpage des phases de récession et identification des dynamiques d'écoulement des débits	184
6.1.1	Définition de la phase de récession	185
6.1.2	Analyse graphique des dynamiques d'écoulement des débits en récession	185
6.2	Le modèle retenu pour la création de l'indicateur d'état du volume superficiel disponible	191
6.2.1	Définition de l'indice volumique journalier et présentation du modèle statistique associé	192
6.2.2	Analyse des séries de l'indice volumique et du modèle de puissance	194
6.2.2.1	Analyse comparative de l'allure des courbes des modèles puissance	194
6.2.2.2	Analyse comparative des dynamiques d'écoulement, des minima et des profils de récession	199
6.2.3	Analyse des caractéristiques de récession et des paramètres de loi du modèle de puissance de l'indice : structuration spatiale de l'écoulement superficiel ?	202
6.2.3.1	La durée des récessions	202
6.2.3.2	La pente du modèle puissance de l'indice volumique journalier	206
6.2.3.3	Les surfaces spécifiques	211
6.2.3.4	La distance à l'exutoire	214
6.3	Structure statistique de l'indicateur retenu et détermination des seuils de criticité	215
6.3.1	Détermination de la loi statistique pour l'ajustement de la distribution de l'indicateur	215
6.3.2	Discrétisation des états de criticité	218
6.4	Le Chrono-kindénogramme ou l'évolution temporelle de l'état de criticité de l'indicateur	220
CHAPITRE 7 Vers la création d'indicateurs pour la définition de l'état du volume souterrain		223
7.1	Identification des dynamiques de vidange des aquifères en récession	224
7.2	Analyse graphique des courbes de l'indicateur et des paramètres de loi du modèle associé	232
7.2.1	Les courbes de récession des indices piézométriques journaliers (IH _{Nj})	232
7.2.2	Les paramètres de loi du modèle puissance de l'indicateur en récession : une structuration hydrogéologique de l'écoulement souterrain ?	243
7.2.2.1	Pentes du modèle puissance de l'indice piézométrique journalier de récession	244
7.2.2.2	Les surfaces de récession	244
7.3	Structure statistique de l'indicateur retenu et détermination des seuils de criticité	248
7.3.1	Détermination de la loi statistique pour l'ajustement de la distribution de l'indicateur	248
7.3.2	Discrétisation des états de criticité	254

7.4	Le Chrono-kindénogramme ou l'évolution temporelle de l'état de criticité de l'indicateur	255
CHAPITRE 8 Vers la création d'indicateurs d'état du forçage climatique		259
8.1	Identification des dynamiques climatiques/atmosphériques	261
8.1.1	Analyse graphique des dynamiques générales des précipitations	261
8.1.2	Calcul des « durées sans pluie »	263
8.1.3	Dynamiques des précipitations - « durées sans pluies »	263
8.1.4	Dynamiques générales des précipitations utiles	264
8.1.4.1	Calcul de l'ETP à partir des températures	264
8.1.4.2	Comparaison des dynamiques des forçages climatiques - « durées sans pluie utile »	266
8.1.4.3	Comparaison des effectifs des classes de durées « sans pluie » et « sans pluie utile »	267
8.2	Les courbes des « durées sans pluie utile » en récession : vers une structuration spatiale de l'indicateur ?	269
8.3	Identification de la structure statistique de l'indicateur et détermination des seuils de criticité	272
8.3.1	Le modèle d'ajustement des périodes d'absence de pluie	272
8.3.2	Comparaison des ajustements des durées « sans pluie utile » (IP0)	274
8.3.2.1	Structuration des séries issues des chroniques complètes	274
8.3.2.2	Structuration des ajustements des séries issues des chroniques de récession	276
8.3.3	Discrétisation des états de criticité de l'information climatique	279
8.4	Le Chrono-kindénogramme ou l'évolution temporelle de l'état de criticité de l'indicateur	280
 PARTIE IV DE L'ANALYSE À LA SYNTHÈSE : VERS UN OUTIL OPÉRATIONNEL POUR LA DÉFINITION D'UN INDICE DE TENSION EN BASSES EAUX		 283
CHAPITRE 9 Validation des indicateurs par approches carto-graphiques de leurs états de criticité sur le bassin des Gardons		287
9.1	La dynamique spatiale des états de criticité de l'indice volumique journalier	289
9.1.1	La dynamique spatiale de l'indice volumique journalier issu des récessions	289
9.1.2	La dynamique spatiale de l'indice volumique journalier issu des cycles hydrologiques	295
9.2	État de criticité des indicateurs hydroclimatiques <i>vs.</i> niveau d'alerte	297
9.2.1	État du volume superficiel (Ivj) <i>vs.</i> état d'alerte hydrologique	298
9.2.1.1	L'indicateur issu des phases de récession	298
9.2.1.2	L'indicateur issu des cycles hydrologiques	302
9.2.2	État du volume souterrain (IHnj) <i>vs.</i> état d'alerte hydrologique	306
9.2.2.1	L'indicateur issu des phases de récession	306
9.2.2.2	L'indicateur issu des cycles hydrologiques	313
9.2.3	État du forçage climatique (IP0j) <i>vs.</i> état d'alerte hydrologique	321
9.2.3.1	L'indicateur issu des phases de récession	321
9.2.3.2	L'indicateur issu de la chronique complète	324
9.3	États exceptionnels des indicateurs : Analyse par dates « clé »	329
9.3.1	L'état du volume superficiel <i>vs.</i> état exceptionnel de l'indice climatique	330

9.3.2	L'état exceptionnel du volume superficiel <i>vs.</i> état de l'indice climatique . . .	332
9.3.2.1	Dates « clé » année 1970	334
9.3.2.2	Dates « clé » année 1991	334
9.3.2.3	Dates « clé » année 2000	334
9.3.3	L'état exceptionnel du volume superficiel <i>vs.</i> état du volume souterrain et de l'indice climatique	335
9.3.3.1	Dates « clé » année 2006	335
9.3.3.2	Dates « clé » année 2013	337
9.3.4	L'état exceptionnel des indices pluviométriques <i>vs.</i> l'état des volumes superficiels et souterrains	337
 CHAPITRE 10 Mise en œuvre opérationnelle de la méthode : modalités techniques et réglages méthodologiques		341
10.1	Les prérequis en matière d'informations	343
10.1.1	Le réseau d'observation des basses eaux	343
10.1.2	Les informations relatives aux pratiques et usages anthropiques de l'eau . . .	343
10.1.2.1	La qualité de l'eau	344
10.1.2.2	Les prélèvements en eau	344
10.1.3	La perception sociale	345
10.2	Détection et analyse de la phase précoce des basses eaux sur les Gardons : atlas multiscalaire des états de criticité	345
10.2.1	Approches graphiques : le chrono-Kindénogramme et le Kindénogramme Analytique (KA)	346
10.2.1.1	Le chrono-kindénogramme comme support d'aide à la veille hydroclimatique	347
10.2.2	Le Kindénogramme Analytique, outil d'analyse de la phase d'amorce et de l'évolution du phénomène de basses eaux	355
10.2.3	Approche spatiale : Atlas carto-graphique et analytique	359
10.3	Vers un outil opérationnel pour la définition d'un état de tension synthétique	359
10.3.1	Définition d'un indice de criticité synthétique (ICs)	363
10.3.1.1	Élaboration de l'indice d'Offre (IsO)	363
10.3.1.2	L'indice de Criticité synthétique (ICs)	367
10.3.2	Le Kindénogramme Synthétique (KS) pour la description du phénomène .	367
10.4	Automatisation et « transposabilité » de la méthode	368
 Conclusion		376
 Bibliographie		379

TABLE DES FIGURES

0.1	ORGANISATION DU MANUSCRIT : LES PRINCIPALES ÉTAPES MÉTHODOLOGIQUES POUR LA DÉFINITION D'UN ÉTAT DE TENSION SUR LA RESSOURCE EN EAU	28
1.1	LES DIFFÉRENTS TYPES DE SÉCHERESSE RECONNUS PAR LA COMMUNAUTÉ MÉTÉOROLOGIQUE (MODIFIÉ D'APRÈS WILHITE, 2006 ET LE NATIONAL DROUGHT MITIGATION CENTER, 2015)	37
1.2	DÉCOMPOSITIONS CONCEPTUELLES D'UN HYDROGRAMME : LES CONTRIBUTIONS À L'ÉCOULEMENT EN PHASE DE RÉCESSION ET DE TARISSEMENT	39
1.3	LE MODULE INTERANNUUEL, SEUIL DE DISCRIMINATION DES BASSES EAUX (MODIFIÉ D'APRÈS LANG DELUS, 2011)	42
1.4	SEUILS DE DISCRIMINATION DES ÉTATS HYDROLOGIQUES EXTRÊMES (MODIFIÉ D'APRÈS DRACUP ET <i>al.</i> , 1980)	44
1.5	LE CYCLE DE L'EAU À L'ÉCHELLE DU BASSIN VERSANT (MODIFIÉ D'APRÈS GUSTARD ET DEMUTH, 2008)	46
2.1	RÉPARTITION DES TEMPÉRATURES MINIMALES MOYENNES MENSUELLES (MODIFIÉ D'APRÈS MÉTÉO FRANCE, 2015)	58
2.2	RÉPARTITION DES TEMPÉRATURES MAXIMALES MOYENNES MENSUELLES (MODIFIÉ D'APRÈS MÉTÉO FRANCE, 2015)	58
2.3	TEMPÉRATURES MOYENNES SAISONNIÈRES ENTRE LA MER MÉDITERRANÉE ET LES CÉVENNES (MODIFIÉ D'APRÈS MÉTÉO FRANCE, 2015)	58
2.4	RÉPARTITION DES PRÉCIPITATIONS MOYENNES MENSUELLES (MODIFIÉ D'APRÈS MÉTÉO FRANCE, 2015)	59
2.5	CUMUL DES PRÉCIPITATIONS SAISONNIÈRES ENTRE LA MER MÉDITERRANÉE ET LES CÉVENNES (MODIFIÉ D'APRÈS MÉTÉO FRANCE, 2015)	59
2.6	ENSOLEILLEMENT MOYEN MENSUEL MESURÉ SUR DEUX STATIONS MER ET INTÉRIEUR DES TERRES (D'APRÈS MÉTÉO FRANCE, 2015)	60
2.7	LES ÉPISODES DE SÉCHERESSES RECENSÉS DANS LE MIDI ENTRE 675 ET 1840 (MODIFIÉ D'APRÈS FUSTER, 1845). LEUR DEGRÉ DE SÉVÉRITÉ, DÉFINI QUALITATIVEMENT, EST TRADUIT PAR UN NIVEAU COMPRIS ENTRE 1 ET 5, DE SORTE QUE : 1 – SÉCHERESSE ; 2 – GRANDE SÉCHERESSE ; 3 – TRÈS FORTE SÉCHERESSE ; 4 – SÉCHERESSE EXCEPTIONNELLE ET 5 – SÉCHERESSE EXTRÊME.	61
2.8	NOMBRE, FRÉQUENCE ET ANNÉES EXTRÊMES DES SÉCHERESSES EN LANGUEDOC ROUSSILLON 1500-2009 (MODIFIÉ D'APRÈS GARNIER, 2009)	62
2.9	LES SÉCHERESSES EN LANGUEDOC ROUSSILLON 1500-2009 (MODIFIÉ D'APRÈS GARNIER, 2009)	62
2.10	ORIGINE SAISONNIÈRE DES SÉCHERESSES EN LANGUEDOC ROUSSILLON 1500-2009 (MODIFIÉ D'APRÈS GARNIER, 2009)	63
2.11	LES CHANGEMENTS MENSUELS DES DÉBITS ENTRE LES PÉRIODES 2046-2065 ET 1970-1999 (BOE, 2007)	66

2.12	ÉVOLUTION DES PRÉCIPITATIONS MENSUELLES (EN %) DANS LES BASSINS CÔTIERS DU LANGUEDOC-ROUSSILLON ENTRE 1961-1990 ET 2071-2100 SOUS LE SCÉNARIO SRES A2 AVEC 8 MODÈLES CLIMATIQUES (LESPINAS, 2008)	67
2.13	ÉVOLUTION POTENTIELLE DE L'INDICE CLIMATO-TOURISTIQUE (ICT) DES DÉPARTEMENTS FRANÇAIS À L'HORIZON 2100 (MODIFIÉ D'APRÈS ORNEC, 2009)	69
2.14	LES CARACTÉRISTIQUES DES DIFFÉRENTES ENTITÉS HYDROGÉOLOGIQUES PRÉSENTES SUR LE BASSIN MÉDITERRANÉEN (SOURCE : BD LISA, 2015)	71
2.15	SCHÉMATISATION D'UN PAYSAGE KARSTIQUE (MODIFIÉ D'APRÈS M. BAKALOWICZ, 1999)	72
2.16	VARIATIONS ANNUELLES DE LA DENSITÉ DE POPULATION	74
2.17	LES INDICES STATISTIQUES ISSUS DE LA COURBE DES DÉBITS CLASSÉS (D'APRÈS LANG DELUS, 2011)	78
2.18	EXEMPLE D'UNE COURBE ENVELOPPE DE TARISSEMENT ET DE COURBES SÉQUENCES DE TARISSEMENT (LA MORTAGNE À AUTREY-SAINTE-HÉLÈNE) (D'APRÈS LANG ET GILLES, 2006)	81
2.19	DÉBITS CARACTÉRISTIQUES ET SÉVÉRITÉ DES ÉTIAGES (D'APRÈS LANG DELUS, 2011). .	84
2.20	VALEURS DE L'INDICE SPI ET CLASSES ET FRÉQUENCES ASSOCIÉES (MODIFIÉ D'APRÈS OMM, 2012)	86
2.21	LES CLASSES DE PALMER POUR CARACTÉRISER LES PÉRIODES HUMIDES ET SÈCHES (D'APRÈS PALMER, 1965)	88
3.1	MODÈLES MATHÉMATIQUES DE LA MORPHOGENÈSE ET IMAGINAIRE (MODIFIÉ D'APRÈS THOM)	100
3.2	LES DIFFÉRENTES RÉPONSES D'UN ÉCOSYSTÈME AUX PERTURBATIONS (MODIFIÉ D'APRÈS GORDON ET <i>al.</i> , 2008)	102
3.3	SCHÉMA CONCEPTUEL DU SYSTÈME « BASSES EAUX »	107
4.1	DU CONTEXTE À L'INDICE DE CRITICITÉ : DÉFINITIONS	115
4.2	DU CONTEXTE AU FACTEUR : DÉFINITIONS	116
4.3	STRUCTURE SCHÉMATIQUE DU SYSTÈME « BASSES EAUX » SELON LES SEULES INFLUENCES CLIMATIQUES.	118
4.4	SCHÉMA CONCEPTUEL DES RELATIONS ESSENTIELLES DANS UN HYDROSYSTÈME, À L'ÉCHELLE DU BASSIN VERSANT	119
4.5	SCHÉMA CONCEPTUEL DES RELATIONS ESSENTIELLES POUR LA DÉFINITION D'UN MODÈLE PROPRE À L'USAGE « LUDIQUE » DE L'EAU.	120
4.6	SCHÉMA CONCEPTUEL POUR LA DÉFINITION D'UN MODÈLE SPÉCIFIQUE À LA VIE AQUATIQUE.	121
4.7	DU FACTEUR D'INFLUENCE À LA VARIABLE ESSENTIELLE : DÉFINITIONS	122
4.8	SCHÉMA GÉNÉRIQUE D'ÉVALUATION D'UN ÉTAT DE BASSES EAUX	125
4.9	SCHÉMA SIMPLIFIÉ D'ÉVALUATION D'UN ÉTAT DE CRITICITÉ DE BASSES EAUX	126
5.1	DE LA VARIABLE AU PARAMÈTRE : DÉFINITIONS	138
5.2	LE MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN : STRUCTURE MORPHOLOGIQUE CONTRASTÉE DU BASSIN DES GARDONS	138
5.3	DÉTERMINATION DES SEUILS DE VIGILANCE, D'ALERTE ET DE CRISE À LA STATION HYDROMÉTRIQUE DE SAINT JEAN À CORBÈS (SOURCE : ANNEXE 5 DE L'ARRÊTÉ-CADRE SÉCHERESSE DU GARD — ARRÊTÉ PRÉFECTORAL DU 8 JUILLET 2013)	139
5.4	EMBOÎTEMENT POSSIBLE DES ÉCHELLES SUR LE BASSIN DES GARDONS, POUR UNE ANALYSE DU TERRITOIRE COMMUNAL	141

5.5	LOCALISATION DES POSTES DE MESURE EN SERVICE, SUSCEPTIBLES DE RENSEIGNER L'INFORMATION CLIMATIQUE SUR LE BASSIN DES GARDONS	151
5.6	COMPARAISON DE L'ÉVOLUTION DES VOLUMES ANNUELS PRÉLEVÉS SUR LE BASSIN DES GARDONS, DE LA POPULATION ET DES SURFACES AGRICOLES (SOURCES : RECENSEMENT AGRICOLE 2010, AGRESTE ET COLLECTIVITÉS LOCALES.GOUV.FR)	154
5.7	EXEMPLE D'UNE REQUÊTE DANS LA BASE DE DONNÉES « BASSES EAUX »	164
5.8	SOUS-BASSINS DÉLIMITÉS PAR LES POINTS NODAUX RETENUS POUR LE CALCUL DES VOLUMES PRÉLEVABLES (SOURCE : SMAGE, 2016))	165
5.9	DU PARAMÈTRE À L'INDICATEUR : DÉFINITIONS	179
6.1	LES POSTES DE MESURE RETENUS POUR L'ÉLABORATION DES INDICATEURS DE L'ÉTAT DE LA RESSOURCE SUPERFICIELLE	184
6.2	LE LINÉAIRE DU GARDON DE SAUMANE À NERS	186
6.3	LES ANNÉES RENSEIGNÉES AUX POSTES LIMNIMÉTRIQUES RETENUS	190
6.4	REPRÉSENTATIONS GRAPHIQUES DE LA DYNAMIQUE D'ÉCOULEMENT DES DÉBITS AU POSTE DE SAUMANE DURANT LA RÉCESSION DE 1984	193
6.5	ÉVOLUTION DES VALEURS DE L'INDICE EN FONCTION DU TEMPS POUR DES VARIATIONS DU DÉBIT IDENTIQUES	198
6.6	ÉVOLUTION DES VALEURS DE L'INDICE EN FONCTION DU TEMPS POUR DES VARIATIONS DU DÉBIT DE CRUE	198
6.7	COMPARAISON DES PROFILS DE RÉCESSION ET DES ALLURES DES COURBES DE L'INDICE VOLUMIQUE JOURNALIER EN TROIS POINTS DU RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE	199
6.8	LES DATES DE DÉBUT DE RÉCESSION SUR LES 20 ANNÉES LES MIEUX REPRÉSENTÉES	203
6.9	LES DURÉES DE RÉCESSION SUR LES 20 ANNÉES LES MIEUX REPRÉSENTÉES	205
6.10	REPRÉSENTATION SIMPLIFIÉE DES TROIS PRINCIPAUX LINÉAIRES AMONT DU GARDON	205
6.11	LES PENTES DE RÉCESSION DU MODÈLE DE PUISSANCE DE L'INDICE VOLUMIQUE JOURNALIER SUR LES 20 ANNÉES LES MIEUX REPRÉSENTÉES	209
6.12	COMPARAISON ENTRE LES VALEURS MOYENNES DES PARAMÈTRES DE RÉCESSION ET LA DISTANCE DES POSTES À L'EXUTOIRE	214
6.13	EFFECTIF PAR CLASSE DES IVJ AU POSTE D'ANDUZE – 19 RÉCESSIONS	218
6.14	RÉPARTITION DES VALEURS JOURNALIÈRES DE L'INDICATEUR DANS LES ÉTATS DE CRITICITÉ SELON LES CLASSES DE SEUILS – EXEMPLE AU POSTE D'ANDUZE – RÉCESSION 2012	219
6.15	RÉPARTITION DES VALEURS JOURNALIÈRES DE L'INDICATEUR DANS LES ÉTATS DE CRITICITÉ SELON LES CLASSES DE SEUILS – EXEMPLE AU POSTE D'ANDUZE – 19 RÉCESSIONS	219
7.1	MILIEU DES ENTITÉS HYDROGÉOLOGIQUES ET POSTES DE MESURE ASSOCIÉS	224
7.2	LOCALISATION DES POSTES PIÉZOMÉTRIQUES RETENUS POUR L'ANALYSE DES DYNAMIQUES DE VIDANGE DES PRINCIPALES ENTITÉS HYDROGÉOLOGIQUES	226
7.3	LES ANNÉES LACUNAIRES DES CHRONIQUES AUX POSTES PIÉZOMÉTRIQUES RETENUS	227
7.4	STRUCTURATION PAR PALIERS DE LA DÉCROISSANCE DES HAUTEURS PIÉZOMÉTRIQUES	233
7.5	RAPPEL SUR LE MILIEU DES ENTITÉS HYDROGÉOLOGIQUES ET DES POSTES DE MESURE ASSOCIÉS	236
7.6	DÉTERMINATION DES COURBES-ENVELOPPE DU MODÈLE DE VIDANGE DE L'AQUIFÈRE À MASSILLARGUES-ATTUECH	248
7.7	EFFECTIF PAR CLASSE DES IHNJ AU POSTE DE CARDET – 10 RÉCESSIONS	249
7.8	AJUSTEMENTS DES SÉRIES DE VALEURS DES INDICES (ANAMORPHOSE), EXEMPLE AU POSTE DE COMPS – 11 RÉCESSIONS	254

7.9	RÉPARTITION DES VALEURS JOURNALIÈRES DE L'INDICATEUR DANS LES ÉTATS DE CRITICITÉ SELON LES CLASSES DE SEUILS - EXEMPLE AU POSTE DE CARDET - RÉCESSION 2013	254
7.10	RÉPARTITION DES VALEURS JOURNALIÈRES DANS LES ÉTATS DE CRITICITÉ SELON LES CLASSES DE SEUILS - EXEMPLE AU POSTE DE CARDET - 11 RÉCESSIONS	254
8.1	LOCALISATION DES POSTES PLUVIOMÉTRIQUES RETENUS	263
8.2	CHRONIQUES DES JOURS SANS PLUIE DES QUATRE POSTES RETENUS - EXEMPLE ANNÉE CALENDRAIRE 1985	264
8.3	LES POSTES DE MESURE DES PRÉCIPITATIONS ASSOCIÉS AUX STATIONS DE MESURE DES DÉBITS POUR LE CALCUL DES PÉRIODES « SANS PLUIE UTILE »	266
8.4	CHRONIQUES DES JOURS « SANS PLUIE UTILE » DES QUATRE POSTES RETENUS - EXEMPLE ANNÉE CALENDRAIRE 1985	266
8.5	AJUSTEMENT DES EFFECTIFS DES DURÉES SANS PLUIE AU MODÈLE « NORMALISÉ » DE PARETO	267
8.6	VALEUR DE LA PENTE DU MODÈLE D'AJUSTEMENT DE LA DISTRIBUTION DES PÉRIODES « SANS PLUIE » ET « SANS PLUIE UTILE » DE CHAQUE PLUVIOMÈTRE - BASE CHRONIQUE .	269
8.7	VALEUR DES PARAMÈTRES D'AJUSTEMENT DE LA DISTRIBUTION DES DURÉES « SANS PLUIE UTILE » DE CHAQUE PLUVIOMÈTRE - COMPARAISON SUR LES PÉRIODES 1955-1995 ET 1955 - 2012 - BASE CHRONIQUE	276
8.8	RÉPARTITION DES VALEURS DE L'INDICATEUR DANS LES ÉTATS DE CRITICITÉ SELON LES CLASSES DE SEUILS — EXEMPLE AU POSTE D'UZÈS — CHRONIQUE ET RÉCESSION	280
8.9	LE CHRONO-KINDÉNOGRAMME OU L'ÉVOLUTION TEMPORELLE DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DE L'INDICE DE FORÇAGE CLIMATIQUE AU POSTE D'UZÈS — BASE CHRONIQUE ET RÉCESSION	280
8.10	DE L'INDICATEUR À L'INDICE SYNTHÉTIQUE : DÉFINITIONS	285
8.11	DE L'INDICE SYNTHÉTIQUE À L'INDICE DE CRITICITÉ : DÉFINITIONS	286
9.1	LES PRINCIPAUX LINÉAIRES RÉFÉRENCÉS SUR LE BASSE DES GARDONS	292
9.2	MODALITÉS COLORIMÉTRIQUES POUR LA REPRÉSENTATION SPATIALISÉE DE L'ÉTAT DES IVj	293
9.3	VARIABILITÉ JOURNALIÈRE AU COURS DE LA RÉCESSION 2011 DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DE L'IVj AU POSTE D'ALÈS, DÉFINI SUR LE DÉCOUPAGE DES PHASES DE RÉCESSION	302
9.4	VARIABILITÉ JOURNALIÈRE AU COURS DE LA RÉCESSION 2011 DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DE L'IVj AU POSTE D'ALÈS, DÉFINI SUR LE DÉCOUPAGE DES CYCLES HYDROLOGIQUES . .	304
9.5	RÉPARTITION DES POSTES PIÉZOMÉTRIQUES AU SEIN DU DÉCOUPAGE DES ZONES D'ALERTE RÉGLEMENTAIRES	307
9.6	MODALITÉS COLORIMÉTRIQUES POUR LA REPRÉSENTATION SPATIALISÉE DE L'ÉTAT DES IHnj	312
9.7	MODALITÉS COLORIMÉTRIQUES POUR LA REPRÉSENTATION SPATIALISÉE DE L'ÉTAT DE L'IPo	324
10.1	DE LA DÉFINITION DES SEUILS À L'ANALYSE CHRONOLOGIQUE ET COMBINÉE DES ÉTATS DE CRITICITÉ	346
10.2	REPRÉSENTATIONS POSSIBLES DES ÉTATS DE CRITICITÉ SUR LE KINDÉNOGRAMME ANALYTIQUE (KA)	357
10.3	LE KINDÉNOGRAMME ANALYTIQUE SPÉCIFIQUE AU SOUS-BASSIN D'ANDUZE - POINT DE SITUATION DÉTAILLÉE DES ÉTATS DE CRITICITÉ AU 31 MAI 2012	358
10.4	ÉTAPES MÉTHODOLOGIQUES POUR LA CONSTRUCTION DE L'INDICE DE CRITICITÉ (ICs) .	364

10.5	DÉFINITION DES SEUILS DE L'INDICE D'OFFRE À PARTIR DES SEUILS DE CRITICITÉ DES INDICATEURS	366
10.6	ÉTAPES MÉTHODOLOGIQUES POUR LA DÉFINITION D'UN INDICE DE TENSION SUR LA RES-SOURCE	368
10.7	LES ÉTAPES DE MISE EN ŒUVRE DE L'OUTIL : UNE NÉCESSAIRE AUTOMATISATION DE LA MÉTHODE	369

LISTE DES ENCADRÉS

- E0.1. EVOLUTION DU NOMBRE DE VARIABLES AVEC LE CHANGEMENT D'ÉCHELLE D'OBSERVATION – EXEMPLE SUR TROIS NIVEAUX AVEC QUELQUES VARIABLES ÉLÉMENTAIRES
- E0.2. EVOLUTION DU NOMBRE DE VARIABLES AVEC LE CHANGEMENT D'ÉCHELLE D'OBSERVATION – EXEMPLE SUR TROIS NIVEAUX AVEC QUELQUES VARIABLES ÉLÉMENTAIRES
- E1. LES DÉCOUPAGES TERRITORIAUX EXISTANTS
- E2. BASES DE DONNÉES POUR LA CONSTRUCTION DU MODÈLE « BASSES EAUX »
- E3. LES STATIONS LIMNIMÉTRIQUES DISPONIBLES SUR LE BASSIN DES GARDONS
- E4. LES STATIONS PIÉZOMÉTRIQUES DISPONIBLES SUR LE BASSIN DES GARDONS
- E5. LES POSTES PLUVIOMÉTRIQUES DISPONIBLES SUR LE BASSIN DES GARDONS
- E6. LES OUVRAGES DE PRÉLÈVEMENT EN SERVICE SUR LE BASSIN DES GARDONS
- E7. SUIVI DU TAUX DE REMPLISSAGE DES BARRAGES SUR LE BASSIN DES GARDONS
- E8. MESURE DE LA QUALITÉ CHIMIQUE ET BIOLOGIQUE DE L'EAU SUPERFICIELLE SUR LE BASSIN DES GARDONS
- E9. MESURE DE LA QUALITÉ CHIMIQUE ET DE LA POLLUTION DE L'EAU SOUTERRAINE SUR LE BASSIN DES GARDONS
- E10. MESURE DE LA QUALITÉ DE L'EAU DE BAINADE SUR LE BASSIN DES GARDONS
- E11. ORGANISATION DE LA BASE DONNÉES « BASSES EAUX » SUR LE BASSIN DES GARDONS
- E12.1. LES MODÈLES « BASSES EAUX » À L'ÉCHELLE DES SOUS-BASSINS HYDROGRAPHIQUES
- E12.2. LES MODÈLES « BASSES EAUX » À L'ÉCHELLE DES SOUS-BASSINS HYDROGRAPHIQUES
- E12.3. LES MODÈLES « BASSES EAUX » À L'ÉCHELLE DES SOUS-BASSINS HYDROGRAPHIQUES
- E13. REPRÉSENTATIONS SIMPLIFIÉE ET SPATIALISÉE DU MODÈLE SPÉCIFIQUE AU BASSIN DES GARDONS
- E14.1. CONSTRUCTION D'UN INDICE DE DÉBIT JOURNALIER – EXEMPLE À LA STATION LIMNIMÉTRIQUE D'ANDUZE – BASE RÉCESSION
- E14.2. CONSTRUCTION D'UN INDICE DE DÉBIT JOURNALIER – EXEMPLE À LA STATION LIMNIMÉTRIQUE D'ANDUZE – BASE CYCLE HYDROLOGIQUE
- E14.3. CONSTRUCTION D'UN INDICE DE DÉBIT ANNUEL – EXEMPLE À LA STATION LIMNIMÉTRIQUE D'ANDUZE – BASE CYCLE HYDROLOGIQUE
- E15.1. EXEMPLES DE DYNAMIQUES D'ÉCOULEMENT DES DÉBITS EN PHASE DE RÉCESSION À LA STATION LIMNIMÉTRIQUE DE SAUMANE – V7135030
- E15.2. EXEMPLES DE DYNAMIQUES D'ÉCOULEMENT DES DÉBITS EN PHASE DE RÉCESSION À LA STATION LIMNIMÉTRIQUE D'ANDUZE – V7144010

- E15.3. EXEMPLES DE DYNAMIQUES D'ÉCOULEMENT DES DÉBITS EN PHASE DE RÉCESSION À LA STATION LIMNIMÉTRIQUE DE NERS-BOUCOIRAN
- E16.1. EXEMPLES DE DYNAMIQUES DE L'INDICE VOLUMIQUE EN PHASE DE RÉCESSION À LA STATION LIMNIMÉTRIQUE DE SAUMANE – V7135030
- E15.2. EXEMPLES DE DYNAMIQUES DE L'INDICE VOLUMIQUE EN PHASE DE RÉCESSION À LA STATION LIMNIMÉTRIQUE D'ANDUZE – V7144010
- E15.3. EXEMPLES DE DYNAMIQUES DE L'INDICE VOLUMIQUE EN PHASE DE RÉCESSION À LA STATION LIMNIMÉTRIQUE DE NERS-BOUCOIRAN
- E17.1. ANALYSE DES DYNAMIQUES (INTER-) ANNUELLES DE L'INDICE VOLUMIQUE JOURNALIER À CHAQUE POSTE DE MESURE DE DÉBIT – BASE RÉCESSION
- E17.2. ANALYSE DES DYNAMIQUES (INTER-) ANNUELLES DE L'INDICE VOLUMIQUE JOURNALIER À CHAQUE POSTE DE MESURE DE DÉBIT – BASE RÉCESSION
- E18.1. COMPARAISON DES PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES RÉCESSIONS AUX DIFFÉRENTES STATIONS LIMNIMÉTRIQUES DU BASSIN DES GARDONS
- E18.2. COMPARAISON DES PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES RÉCESSIONS AUX DIFFÉRENTES STATIONS LIMNIMÉTRIQUES DU BASSIN DES GARDONS
- E19.1. ANALYSE SPATIALE DES CARACTÉRISTIQUES DE RÉCESSION SUR LE BASSIN DES GARDONS
- E19.2. ANALYSE SPATIALE DES CARACTÉRISTIQUES DE RÉCESSION SUR LE BASSIN DES GARDONS
- E19.3. ANALYSE SPATIALE DES CARACTÉRISTIQUES DE RÉCESSION SUR LE BASSIN DES GARDONS
- E20.1. AJUSTEMENT STATISTIQUE DES VALEURS DE L'INDICE VOLUMIQUE JOURNALIER À CHAQUE POSTE DE MESURE DE DÉBIT – BASE RÉCESSION
- E20.2. AJUSTEMENT STATISTIQUE DES VALEURS DE L'INDICE VOLUMIQUE JOURNALIER À CHAQUE POSTE DE MESURE DE DÉBIT – BASE RÉCESSION
- E21. LE CHRONO-KINDÉNOGRAMME OU L'ÉVOLUTION TEMPORELLE DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DE L'INDICE VOLUMIQUE AU POSTE D'ANDUZE – BASE RÉCESSION
- E22.1. CONSTRUCTION D'UN INDICE PIÉZOMÉTRIQUE JOURNALIER – EXEMPLE DE LA NAPPE ALLUVIALE À MASSILLARGUES-ATTUECH – BASE RÉCESSION
- E22.2. CONSTRUCTION D'UN INDICE PIÉZOMÉTRIQUE JOURNALIER – EXEMPLE DE LA NAPPE ALLUVIALE À MASSILLARGUES-ATTUECH – BASE CYCLE HYDROLOGIQUE
- E22.3. CONSTRUCTION D'UN INDICE PIÉZOMÉTRIQUE ANNUEL – EXEMPLE DE LA NAPPE ALLUVIALE À MASSILLARGUES-ATTUECH
- E23.1. EXEMPLES D'ÉVOLUTIONS DES NIVEAUX PIÉZOMÉTRIQUES EN PHASE DE RÉCESSION AU POSTE DE MASSILLARGUES-ATTUECH – 09381X0096/MAIRIE
- E23.2. EXEMPLES D'ÉVOLUTIONS DES NIVEAUX PIÉZOMÉTRIQUES EN PHASE DE RÉCESSION AU POSTE DE CARDET – 09382X0052/C
- E23.3. EXEMPLES D'ÉVOLUTIONS DES NIVEAUX PIÉZOMÉTRIQUES EN PHASE DE RÉCESSION AU POSTE DE SAINT GENIÈS DE MALGOIRÈS – 09387X0059/F5
- E23.4. EXEMPLES D'ÉVOLUTIONS DES NIVEAUX PIÉZOMÉTRIQUES EN PHASE DE RÉCESSION AU POSTE DE SAINTE ANASTASIE – 09395X0065/NICOLA
- E24.1. EXEMPLES DE DYNAMIQUES DES INDICES PIÉZOMÉTRIQUES EN PHASE DE RÉCESSION AU

POSTE DE MASSILLARGUES-ATTUECH – 09381X0096/MAIRIE

E24.2. EXEMPLES DE DYNAMIQUES DES INDICES PIÉZOMÉTRIQUES EN PHASE DE RÉCESSION AU POSTE DE CARDET – 09382X0052/c

E24.3. EXEMPLES DE DYNAMIQUES DES INDICES PIÉZOMÉTRIQUES EN PHASE DE RÉCESSION AU POSTE DE SAINT GENIÈS DE MALGOIRÈS – 09387X0059/F5

E24.4. EXEMPLES DE DYNAMIQUES DES INDICES PIÉZOMÉTRIQUES EN PHASE DE RÉCESSION AU POSTE DE SAINTE ANASTASIE – 09395X0065/NICOLA

E25.1. ANALYSE DES DYNAMIQUES (INTER-)ANNUELLES DE L'INDICE PIÉZOMÉTRIQUE JOURNALIER À CHAQUE POSTE DE MESURE PIÉZOMÉTRIQUE – BASE RÉCESSION

E25.2. ANALYSE DES DYNAMIQUES (INTER-)ANNUELLES DE L'INDICE PIÉZOMÉTRIQUE JOURNALIER À CHAQUE POSTE DE MESURE PIÉZOMÉTRIQUE – BASE RÉCESSION

E25.3. ANALYSE DES DYNAMIQUES (INTER-)ANNUELLES DE L'INDICE PIÉZOMÉTRIQUE JOURNALIER À CHAQUE POSTE DE MESURE PIÉZOMÉTRIQUE – BASE RÉCESSION

E25.4. ANALYSE DES DYNAMIQUES (INTER-)ANNUELLES DE L'INDICE PIÉZOMÉTRIQUE JOURNALIER À CHAQUE POSTE DE MESURE PIÉZOMÉTRIQUE – BASE RÉCESSION

E25.5. ANALYSE DES DYNAMIQUES (INTER-)ANNUELLES DE L'INDICE PIÉZOMÉTRIQUE JOURNALIER À CHAQUE POSTE DE MESURE PIÉZOMÉTRIQUE – BASE RÉCESSION

E25.6. ANALYSE DES DYNAMIQUES (INTER-)ANNUELLES DE L'INDICE PIÉZOMÉTRIQUE JOURNALIER À CHAQUE POSTE DE MESURE PIÉZOMÉTRIQUE – BASE RÉCESSION

E26.1. COMPARAISON DES PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES RÉCESSIONS SUR LES DIFFÉRENTES ENTITÉS HYDROGÉOLOGIQUES DU BASSIN VERSANT DES GARDONS

E26.2. COMPARAISON DES PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES RÉCESSIONS SUR LES DIFFÉRENTES ENTITÉS HYDROGÉOLOGIQUES DU BASSIN VERSANT DES GARDONS

E27.1. DÉFINITION DES SEUILS DE CRITICITÉ DE L'INDICE PIÉZOMÉTRIQUE JOURNALIER À CHAQUE POSTE DE MESURE DE HAUTEUR PIÉZOMÉTRIQUE – BASE RÉCESSION

E27.2. DÉFINITION DES SEUILS DE CRITICITÉ DE L'INDICE PIÉZOMÉTRIQUE JOURNALIER À CHAQUE POSTE DE MESURE DE HAUTEUR PIÉZOMÉTRIQUE – BASE RÉCESSION

E27.3. DÉFINITION DES SEUILS DE CRITICITÉ DE L'INDICE PIÉZOMÉTRIQUE JOURNALIER À CHAQUE POSTE DE MESURE DE HAUTEUR PIÉZOMÉTRIQUE – BASE RÉCESSION

E27.4. DÉFINITION DES SEUILS DE CRITICITÉ DE L'INDICE PIÉZOMÉTRIQUE JOURNALIER À CHAQUE POSTE DE MESURE DE HAUTEUR PIÉZOMÉTRIQUE – BASE RÉCESSION

E28. LE CHRONO-KINDÉNOGRAMME OU L'ÉVOLUTION TEMPORELLE DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DE L'INDICE PIÉZOMÉTRIQUE AU POSTE DE CARDET – BASE RÉCESSION

E29 CONSTRUCTION D'UN INDICATEUR DE FORÇAGE CLIMATIQUE JOURNALIER – EXEMPLE AU POSTE PLUVIOMÉTRIQUE DE VALLERAUGUE

E30. COMPARAISON DES EFFECTIFS DE DURÉES « SANS PLUIE » BRUTES ET UTILES À CHAQUE POSTE DE MESURE DES PRÉCIPITATIONS – BASE CHRONIQUE

E31.1 ANALYSE SPATIALE DE LA PENTE DU MODÈLE DE PARETO DES PÉRIODES « SANS PLUIE UTILE » SUR LE BASSIN DES GARDONS

E31.2 ANALYSE SPATIALE DE LA PENTE DU MODÈLE D'AJUSTEMENT DES PÉRIODES « SANS PLUIE

UTILE » SUR LE BASSIN DES GARDONS

E32.1. AJUSTEMENT DES SÉRIES DE DURÉES « SANS PLUIE UTILE » À CHAQUE POSTE PLUVIOMÉTRIQUE – BASE CHRONIQUE

E33.1. SPATIALISATION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DE L'INDICE VOLUMIQUE JOURNALIER AU COURS DE LA PÉRIODE ESTIVALE DE 2011 – BASE RÉCESSION

E33.2. SPATIALISATION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DE L'INDICE VOLUMIQUE JOURNALIER AU COURS DE LA PÉRIODE ESTIVALE DE 2011 – BASE CYCLE HYDROLOGIQUE

E34.1. ETATS DE CRITICITÉ DES INDICATEURS ENTRE LE 14/06/2011 ET LE 15/10/2011 – BASE RÉCESSION – (1/4)

E34.1. ETATS DE CRITICITÉ DES INDICATEURS ENTRE LE 14/06/2011 ET LE 15/10/2011 – BASE RÉCESSION – (2/4)

E34.1. ETATS DE CRITICITÉ DES INDICATEURS ENTRE LE 14/06/2011 ET LE 15/10/2011 – BASE RÉCESSION – (3/4)

E34.1. ETATS DE CRITICITÉ DES INDICATEURS ENTRE LE 14/06/2011 ET LE 15/10/2011 – BASE RÉCESSION – (4/4)

E34.2. ETATS DE CRITICITÉ DES INDICATEURS ENTRE LE 14/06/2011 ET LE 15/10/2011 – BASE CYCLE HYDROLOGIQUE – (1/4)

E34.2. ETATS DE CRITICITÉ DES INDICATEURS ENTRE LE 14/06/2011 ET LE 15/10/2011 – BASE CYCLE HYDROLOGIQUE – (2/4)

E34.2. ETATS DE CRITICITÉ DES INDICATEURS ENTRE LE 14/06/2011 ET LE 15/10/2011 – BASE CYCLE HYDROLOGIQUE – (3/4)

E34.2. ETATS DE CRITICITÉ DES INDICATEURS ENTRE LE 14/06/2011 ET LE 15/10/2011 – BASE CYCLE HYDROLOGIQUE – (4/4)

E35.1. SPATIALISATION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DES INDICATEURS ENTRE LE 14/06/2011 ET LE 15/10/2011 – BASE RÉCESSION – (1/4)

E35.1. SPATIALISATION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DES INDICATEURS ENTRE LE 14/06/2011 ET LE 15/10/2011 – BASE RÉCESSION – (2/4)

E35.1. SPATIALISATION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DES INDICATEURS ENTRE LE 14/06/2011 ET LE 15/10/2011 – BASE RÉCESSION – (3/4)

E35.1. SPATIALISATION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DES INDICATEURS ENTRE LE 14/06/2011 ET LE 15/10/2011 – BASE RÉCESSION – (4/4)

E35.2. SPATIALISATION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DES INDICATEURS ENTRE LE 14/06/2011 ET LE 15/10/2011 – BASE CYCLE HYDROLOGIQUE – (1/4)

E35.2. SPATIALISATION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DES INDICATEURS ENTRE LE 14/06/2011 ET LE 15/10/2011 – BASE CYCLE HYDROLOGIQUE – (2/4)

E35.2. SPATIALISATION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DES INDICATEURS ENTRE LE 14/06/2011 ET LE 15/10/2011 – BASE CYCLE HYDROLOGIQUE – (3/4)

E35.2. SPATIALISATION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DES INDICATEURS ENTRE LE 14/06/2011 ET LE 15/10/2011 – BASE CYCLE HYDROLOGIQUE – (4/4)

E36.1. SPATIALISATION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DES INDICATEURS – DATES CLÉ EXCEPTIONNELLES

- BASE CYCLE HYDROLOGIQUE
- E_{36.2}. SPATIALISATION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DES INDICATEURS – DATES CLÉ EXCEPTIONNELLES
- BASE CYCLE HYDROLOGIQUE
- E_{36.3}. SPATIALISATION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DES INDICATEURS – DATES CLÉ EXCEPTIONNELLES
- BASE CYCLE HYDROLOGIQUE
- E_{36.4}. SPATIALISATION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DES INDICATEURS – DATES CLÉ EXCEPTIONNELLES
- BASE CYCLE HYDROLOGIQUE
- E_{37.1}. STABILISATION DES SÉRIES DES INDICATEURS POUR LEUR MISE EN ŒUVRE OPÉRATIONNELLE
- BASE CYCLE HYDROLOGIQUE
- E_{37.2}. STABILISATION DES SÉRIES DES INDICATEURS POUR LEUR MISE EN ŒUVRE OPÉRATIONNELLE
- BASE CYCLE HYDROLOGIQUE
- E_{38.1}. DÉFINITION DES PÉRIODES « SANS PLUIE UTILE » PERTINENTES POUR LA MISE EN ŒUVRE OPÉRATIONNELLE DE L'IPoj – BASE CHRONIQUE À ALÈS
- E_{38.2}. DÉFINITION DES PÉRIODES « SANS PLUIE UTILE » PERTINENTES POUR LA MISE EN ŒUVRE OPÉRATIONNELLE DE L'IPoj – BASE CHRONIQUE À UZÈS
- E₃₉. MISE EN ŒUVRE OPÉRATIONNELLE DE LA VEILLE DU PHÉNOMÈNE DE BASSES EAUX – LE CHRONO-KINDÉNOGRAMME DES ÉTATS PRÉCOCES – ANNÉE 2012
- E₄₀. DÉFINITION DE L'INDICE D'OFFRE (IsO) À PARTIR DE QUATRE SCÉNARIOS AU 1ER JUILLET 2012 – BASE CYCLE HYDROLOGIQUE
- A₁. SPATIALISATION DES ÉTATS DE CRITICITÉ À L'ÉCHELLE DU BASSIN ET DU SOUS-BASSIN – EXEMPLES DES GARDONS ET DU SOUS-BASSIN D'ANDUZE AU 31 MAI 2012
- A_{2.1}. SPATIALISATION DES ÉTATS DE CRITICITÉ SUR LES SOUS-BASSINS AU 31 MAI 2012
- A_{2.2}. SPATIALISATION DES ÉTATS DE CRITICITÉ SUR LES SOUS-BASSINS AU 31 MAI 2012
- P₁. PROCESSUS DE MODÉLISATION HEURISTIQUE DE LA CRITICITÉ DES BASSES EAUX DES TERRITOIRES MÉDITERRANÉENS

INTRODUCTION GÉNÉRALE

En régions méditerranéennes, la question de la ressource en eau se pose presque chaque année, notamment en été. De nombreux bassins, ne bénéficiant que de réserves locales (*i.e.* pas d'apports allogènes naturels notables), sont régulièrement en situation de grande vulnérabilité dès que les conditions climatiques sont légèrement défavorables (*e.g.* très faibles précipitations, température élevée) et que les besoins en eau sont en hausse (*e.g.* demandes environnementale, agricole, domestique, touristique).

Si cette situation peut, dans certains cas, être corrigée par des ouvrages hydrauliques (*e.g.* barrages, retenues collinaires) et des transferts entre bassins (le transfert interdistrict Loire Bretagne/Rhône-Méditerranée pour le soutien d'étiage de l'Ardèche, par exemple), cela n'est pas toujours possible, pour des raisons de coût et plus récemment d'acceptabilité de ces infrastructures qui pourraient être construites (Ruf, 2015).

Aussi, au regard des évolutions tendanciennes liées à l'accroissement de la population sur ces territoires (*i.e.* soldes naturel et migratoire positifs), aux changements de mode de vie (*e.g.* hygiène, eau ludique) et à l'évolution climatique dépendant du réchauffement observé depuis environ un siècle (GIEC, 2013), le niveau de tension sur la ressource est susceptible de s'élever et la fréquence des très basses eaux de s'accroître. Il semble donc primordial, pour ces territoires, et pour demain, de s'intéresser à cette question, laquelle peut se traduire par un risque de « manque d'eau » en période de basses eaux.

À l'heure actuelle, le phénomène de basses eaux ne soulève pas de préoccupations particulières, à l'inverse de la plupart des manifestations hydrologiques extrêmes ponctuelles (*e.g.* crues, étiages). Si ces dernières font l'objet de nombreuses études permettant de les caractériser et donc, dans une certaine mesure, de les anticiper, les phénomènes « continus » et par définition plus « modérés », souffrent quant à eux d'un manque d'études et de considérations (Hingray *et al.*, 2009).

Or l'entrée en situation de basses eaux, bien qu'étant parfaitement naturelle, n'en est pas moins le moment où peut s'enclencher une évolution pouvant conduire à une situation extrême (*e.g.* une forte sécheresse anthropique). Il apparaît par conséquent nécessaire de réfléchir à la façon dont se construit progressivement ce risque, à partir d'un ou de plusieurs niveaux d'observation. Suivre cette construction du risque nécessite le recours à une démarche heuristique, capable de déboucher sur la construction d'outils numériques (*i.e.* indicateurs analytiques et indices synthétiques). Pour ce faire, la réflexion porte ici sur une approche basée sur une modélisation probabiliste d'un certain nombre de variables (selon la taille des espaces considérés), qui décrivent tant la disponibilité en eau

que la demande locale (environnementale et sociale), selon des résolutions temporelles relativement courtes.

Par ailleurs, en situation de tension sur la ressource, les services de l'État produisent des évaluations, à partir d'informations souvent extrêmement limitées (*e.g.* problèmes de qualité, de quantité, de distribution spatiale et de résolution temporelle de l'information disponible), qui conduisent à des prises de décisions, lesquelles se traduisent souvent sous la forme d'interdictions ou de limitations d'usages. Il est donc possible d'envisager une estimation de ces prises de positions administratives à partir d'une évaluation probabiliste de la tension existant théoriquement à chaque instant et en chaque lieu. Cela introduit, par conséquent, une dimension réflexive pouvant influencer certains modes de gestion des territoires.

Tout ceci conduit finalement à réfléchir à des combinaisons de probabilités et donc, préalablement, à des modalités fréquentielles de description de variables (Meylan *et al.*, 2008). L'approche proposée ne s'inscrit donc pas dans la lignée classique des études sur la ressource en eau, qui se basent généralement sur des logiques de flux ($\text{x m}^3.\text{s}^{-1}$ disponibles) ou de volumes (un cube d'un volume x disponible par personne et par an) qui sont généralement déployées à petite échelle (au sens géographique), c'est-à-dire sur de grands territoires (États-nation ou bassins versants majeurs). Au vu de son échelle, cette démarche, fondamentalement basée sur l'idée de résilience (Holling, 1973), ne peut que manquer de précision, et débouche naturellement sur une typologie classant ces larges territoires en fonction de leur disponibilité en eau, de leurs capacités techniques, etc.

La logique proposée ici est totalement inverse. Elle part du territoire, de la situation à grande échelle, c'est-à-dire très locale, et elle essaye de la caractériser. En d'autres termes, l'objectif n'est pas de décrire les grands cadres d'une géopolitique possible, mais de voir au plus près des usagers de l'eau :

- (1) Quelle pourrait être la situation au regard de la ressource en eau, du point de vue de la quantité, de sa qualité, etc. ;
- (2) Comment suivre une évolution favorable ou défavorable de cette ressource ;
- (3) Si les décisions prises par les autorités et les gestionnaires de la ressource sont pleinement justifiées.

Le postulat qui supporte cette réflexion admet que les populations auront à subir, dans un futur plus ou moins proche, des situations de tension, voire de crise. C'est pourquoi, il apparaît fondamental qu'elles comprennent comment la ressource qu'elles mobilisent localement évolue au cours du temps, pour être alors en mesure de mieux accepter les décisions d'aménagement et d'économie qui pourraient être prises sur le moyen - long terme (par anticipation), et les interdictions ou les limitations qui pourraient être imposées lors de phases aiguës. Il convient donc de pouvoir informer localement les populations, ce qui conduit nécessairement à les faire participer à la réflexion sur la ressource et à les intégrer dans le processus de construction du risque de tension sur l'eau.

Sur ces bases, une telle approche peut être menée à différents niveaux d'observation : depuis la caractérisation de situations locales, qui, mises bout-à-bout, détermineraient un état de tension plus global.

Dans ce travail, une description du processus de modélisation pouvant être envisagé pour atteindre de tels objectifs est proposée (Figure 0.1) et la démarche progressivement conçue est mise en œuvre sur le bassin versant des Gardons.

Pour cela, une première partie est préalablement dédiée à la conceptualisation de l'idée de basses eaux (CHAPITRE 1). Après une revue des méthodes et outils existants pour décrire les situations de manque d'eau et une mise en lumière de leurs limites respectives pour appréhender le phénomène en domaine méditerranéen, les bases d'une nouvelle démarche, probabiliste et exploratoire, sont exposées (CHAPITRE 2). Au terme de ce volet « conceptuel », la notion de criticité appliquée aux basses eaux est précisée et un modèle théorique multiscalaire pour la définition d'un état de criticité des basses eaux est élaboré (CHAPITRE 3).

Dans un deuxième temps, une attention particulière est portée sur les variables susceptibles de renseigner au mieux l'état des basses eaux, à partir desquelles des modèles conceptuels territoriaux (*i.e.* spécifiques à une échelle spatiale et/ou à un usage) sont élaborés (CHAPITRE 4). Les bases de données existantes et disponibles en libre accès, sont ensuite parcourues et, après une analyse critique (*e.g.* résolution spatiale et temporelle, lacunes), les informations potentiellement pertinentes pour décrire les variables retenues sont compilées au sein d'une base de données spécifique (CHAPITRE 5).

Dans un troisième temps, une étude du risque est conduite, par le biais d'une approche statistique, sur trois variables essentielles (le débit, le niveau piézométrique et les précipitations), caractéristiques des territoires méditerranéens (CHAPITRES 6 à 8). À l'issue de cette étape, des indicateurs hydro-climatiques synthétiques sont élaborés afin de définir un état de basses eaux (les dimensions qualitative et de perception ne sont pas approfondies dans ce travail).

Enfin, dans une dernière partie, et à la suite d'une série d'étapes de validation basée sur des connaissances expertes du territoire et sur les évaluations des autorités publiques (CHAPITRE 9), ces derniers sont mis en relation, de sorte à obtenir un indice synthétique traduisant l'état quantitatif de l'Offre en eau (CHAPITRE 10).

Pour compléter la réflexion, les contraintes méthodologiques sont également soulevées (*e.g.* identification des « bonnes » variables, mesure et information disponible, caractère gaussien ou non des distributions) et les modalités nécessaires pour une mise en œuvre opérationnelle de la méthode globale sont explicitées. Ces dernières concernent plus particulièrement les ajustements méthodologiques et les aspects techniques requis pour la construction de l'indice de criticité (ICs) et la définition du niveau de tension du territoire concerné.

Toutefois, au terme de cette étude, l'ébauche d'outils carto-graphiques (cartographiques et graphiques) pour la détection et le suivi de la situation, à différentes échelles est déjà proposée.

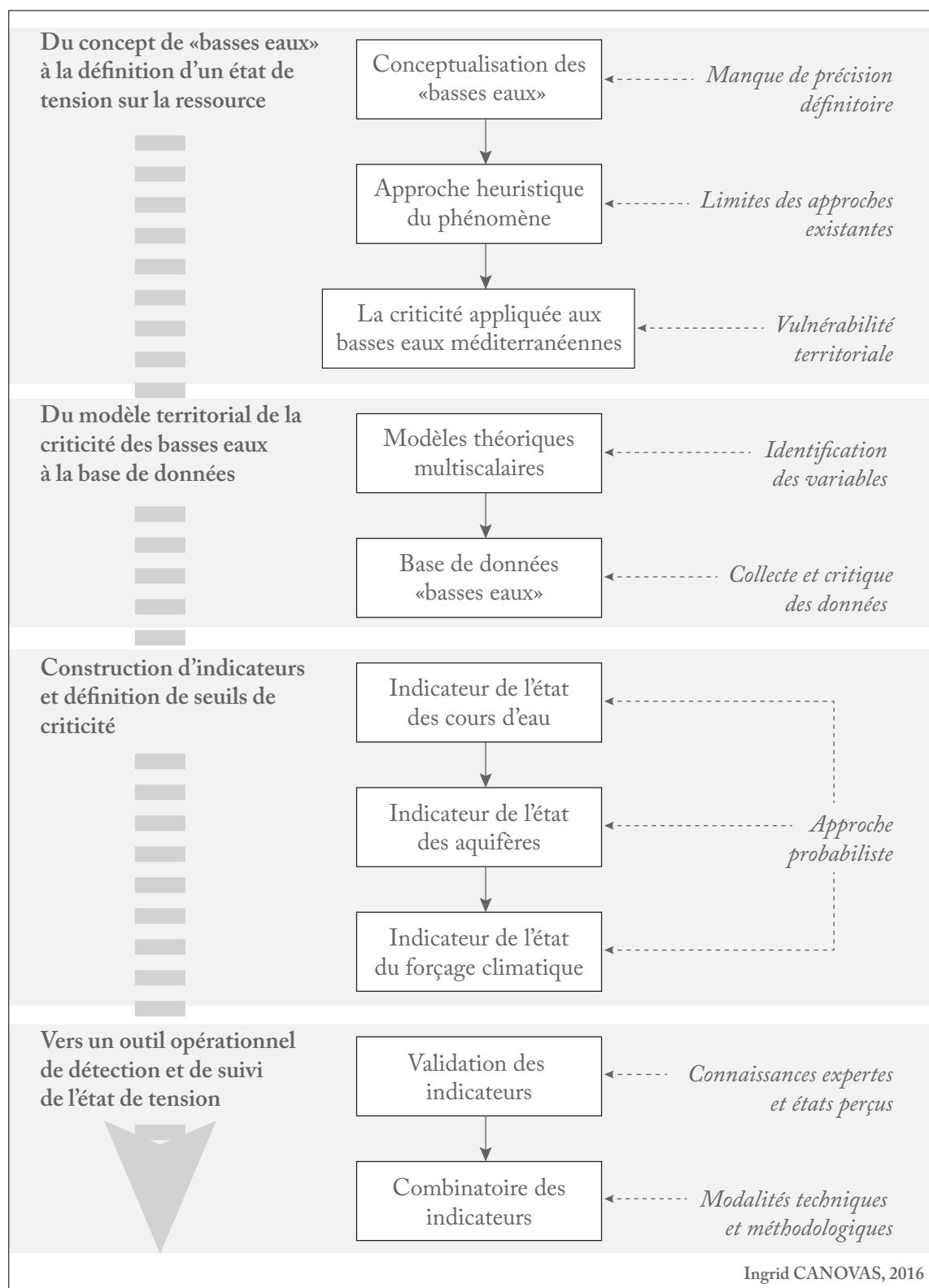


FIGURE 0.1 : ORGANISATION DU MANUSCRIT : LES PRINCIPALES ÉTAPES MÉTHODOLOGIQUES POUR LA DÉFINITION D'UN ÉTAT DE TENSION SUR LA RESSOURCE EN EAU

Première partie

DE LA CONCEPTUALISATION DES « BASSES EAUX » À LA DÉFINITION D'UN ÉTAT DE TENSION SUR LA RESSOURCE

Préalablement au développement d'une méthode destinée à l'analyse des états de basses eaux, pour la prévision de situations de tension, il est nécessaire d'en préciser les cadres conceptuels. Pour cela, après une revue des définitions associées aux différents phénomènes avec lesquels elles sont souvent confondues, et suite à l'identification des facteurs contribuant à leur genèse, un positionnement conceptuel autour des basses eaux est en premier lieu proposé.

En effet, si ce phénomène s'appréhende hydrologiquement comme la mesure de la somme des apports corrigée de la variation des stocks qui donne lieu à des débits inférieurs au module interannuel, il ne peut être envisagé, d'un point de vue plus global, sans intégrer l'ensemble des besoins et des usages de l'eau. Par conséquent, cette conception introduit à la fois la question de la qualité et celle des dynamiques spatiales et temporelles, et rejoint donc l'idée de sécheresse anthropique (*i.e.* le manque d'eau pour satisfaire certains usages). Ainsi, en concevant une situation de tension comme un manque hydrologique, c'est-à-dire un état dans lequel le débit est inférieur à la somme des demandes naturelles et anthropiques, quels que soient le lieu et le moment, il est alors possible d'établir une gradation des niveaux de tension.

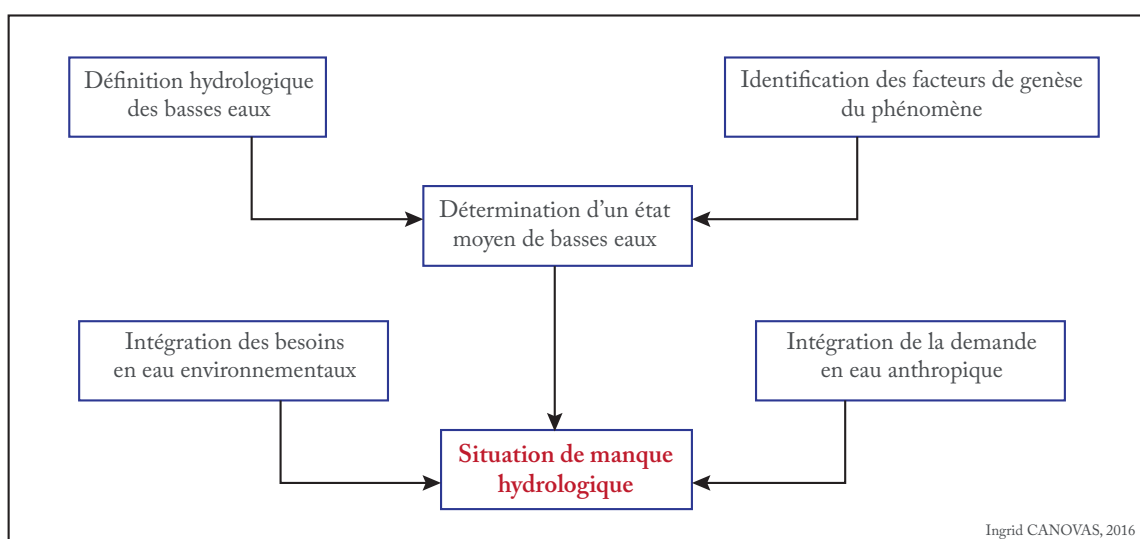
Après une étude des approches existantes pour caractériser des situations de manque d'eau, et la mise en avant de leurs limites respectives, la modélisation du risque de manque d'eau de qualité propre aux usages sur les territoires méditerranéens est proposée.

Elle peut être envisagée de manière classique, en combinant l'occurrence (*i.e.* manifestation plus ou moins rare) d'un aléa dont l'intensité est inversement proportionnelle à la fréquence, et à la vulnérabilité des enjeux (*i.e.* ce qui peut être endommagé ou détruit). Cependant, il est également possible de s'interroger sur la façon dont le risque se construit (*e.g.* physique vs anthropique ; succession des étapes, retentissement d'un facteur sur les autres), sur la façon dont l'évolution (des éléments structuraux, forçages extérieurs, etc.) conduit ou non à s'approcher d'une situation critique ou en fonction de laquelle, l'état du système producteur du risque peut, lui-même, être modifié. Cela renvoie à tout ce qui peut être fait, ou advenir, à partir de l'accroissement de connaissances sur ce que constitue l'avènement d'une situation critique : équilibre dynamique, aspect technique, réglementaire, politique, etc.

La notion de criticité, empruntée à la physique et aux sciences de l'ingénieur (Mortureux, 2002), a donc naturellement été préférée ici, à celle du risque. Appliquée aux basses eaux, elle se réfère alors à un concept qui remet la question des tensions anthropiques et naturelles au centre du débat sur l'aménagement durable des territoires, afin de prévenir les manques, les insatisfactions et donc les crises.

Sur ce postulat, il convient alors de spécifier les modalités de calcul des états de criticité, entendus ici comme les états individuels probabilisés de l'offre et de la demande en eau, et d'intégrer la dimension réflexive, relative à la perception sociale de la situation. Ce positionnement de recherche aboutit finalement à un schéma théorique du système « basses eaux », à partir duquel la méthode d'évaluation sera, dans un autre temps, déroulée.

LA COMPLEXE CARACTÉRISATION DES « BASSES EAUX » : D'UN PHÉNOMÈNE NATUREL À UNE SITUATION SOCIALEMENT CONSTRUITE



1.1	Un amalgame entre différents phénomènes hydroclimatiques à préciser	35
1.1.1	Les sécheresses, situations exceptionnelles de grande ampleur	35
1.1.2	Le tarissement, un modèle de vidange des aquifères	38
1.1.3	L'étiage ou la caractérisation des extrêmes hydrologiques	39
1.1.4	Les basses eaux, un phénomène hydrologique « flou »	41
1.2	La genèse des situations de déficit hydrologique : éléments structurants et forçages pesants	45
1.2.1	Les conditions naturelles de formation des bas débits	45
1.2.2	L'influence des pressions anthropiques sur le phénomène	48
1.3	Repositionnement conceptuel des basses eaux	51
1.3.1	Des états hydrologiques fréquents à caractériser	52
1.3.2	Le moyen de penser les situations de « manque hydrologique »	53

Contrairement aux étiages et aux épisodes de sécheresse, au cours desquels la disponibilité en eau est amoindrie dans le premier cas, ou déficitaire dans l'autre, les périodes de basses eaux ne suscitent pas d'intérêt particulier. En effet, ce phénomène « continu » et par définition « modéré » n'est par conséquent pas jugé problématique ni même dangereux, ce qui peut expliquer un manque de considération. C'est d'ailleurs probablement pour cette raison qu'aucun cadre de réflexion n'a été jusqu'à présent développé autour de cette notion. Mais cela se justifie-t-il pour autant dans tous les cas ?

En effet, les récents épisodes de sécheresse qui ont sévi en France (2003), en Europe (2011) et qui perdurent encore aujourd'hui au-delà de notre continent, comme en témoigne la situation de la Californie (Griffin et Anchukaitis, 2014), victime d'une sécheresse persistante depuis plus de quatre années, ont éveillé les préoccupations autour de la question de la disponibilité en eau, qui devrait devenir bien plus critique dans le contexte opérant de changement climatique. Les basses eaux sont donc largement concernées par ce débat puisque des situations de tension sont d'autant plus susceptibles d'apparaître ou, à défaut, de s'amplifier durant ces périodes relativement sensibles. Les basses eaux sont donc le cadre générique et l'arrière-plan historique des tensions hydrologiques et des problèmes de sécheresse.

Pour bien mettre en lumière l'intérêt de développer une approche visant à évaluer le risque de pénurie en eau autour du phénomène de basses eaux, il est donc nécessaire, dans un premier temps, d'en préciser la définition. Cela revient à replacer conceptuellement les autres phénomènes hydrologiques et hydroclimatiques avec lesquels elles sont, par abus de langage, généralement associées ou confondues. Ces amalgames peuvent être partiellement justifiés par leur emboîtement, tant dans l'espace que dans le temps, mais également par les processus et les forçages qui interviennent dans leur genèse.

1.1 Un amalgame entre différents phénomènes hydroclimatiques à préciser

Dans la littérature scientifique, la raréfaction de la ressource est majoritairement abordée en termes (1) de sécheresse, qu'elle soit considérée comme facteur ou bien l'état observable d'un déficit hydrologique, (2) de tarissement, processus durant lequel on observe une diminution continue des écoulements de surface et du niveau des nappes, ou (3) d'étiage, soit la période de l'année durant laquelle les débits sont les plus faibles.

Si aucun de ces phénomènes (excepté le tarissement) ne bénéficie d'une définition communément admise, ils intègrent ou coïncident, en totalité ou en partie, avec la période de basses eaux. Il semble donc primordial, au préalable, d'en poser les bases conceptuelles, qui serviront de cadre structurel pour la suite de ce travail. Cela suggère alors de s'interroger sur ce que sont les basses eaux, mais aussi, dans le cas présent, sur ce qu'elles ne sont pas. Pour ce faire, il s'est avéré judicieux de prendre appui, dans un premier temps, sur les définitions des différents phénomènes hydrologiques et hydroclimatiques proposées par la communauté scientifique.

1.1.1 Les sécheresses, situations exceptionnelles de grande ampleur

La sécheresse recouvre un concept très vaste, comme en témoigne le nombre important de définitions, chacune spécifique à un auteur, au contexte géographique, ou encore au type de secteur affecté. Toutefois, deux grandes classifications semblent rassembler la plus grande majorité des positionnements théoriques existants.

Lambert (1996) propose une hiérarchie des différentes sécheresses, basée sur l'évolution chronologique du phénomène global. En effet, selon l'auteur, toutes les sécheresses « *dépendent les unes des autres, dans un certain ordre, puisque l'une précède et commande l'autre ou les autres* ». Suivant sa logique, tout épisode de sécheresse s'initie par une sécheresse **atmosphérique**, c'est-à-dire lorsque l'atmosphère prélève plus d'eau qu'elle n'en apporte. Lorsque cette dernière se manifeste de manière très forte et/ou prolongée, le sol commence à se dessécher et la réserve utile à s'épuiser, faisant apparaître un état de sécheresse **pédologique**. Dans la mesure où cette situation persiste, les ruisseaux, particulièrement à l'amont des bassins versants, et les sources entrent en phase de tarissement jusqu'à, dans certains cas, atteindre un état d'assec. L'état de sécheresse devient **hydrologique ou potamologique**. Enfin, si la sécheresse atmosphérique perdure et aggrave les deux suivantes, les nappes sont particulièrement basses et le dernier stade du phénomène, qualifié de sécheresse **phréatique** est alors atteint. Cette classification peut être complétée par un dernier type de sécheresse particulièrement important, la sécheresse **hydraulique**, qui se traduit par un épuisement des réserves artificielles. À ce stade ultime, les besoins humains ne peuvent plus être satisfaits : c'est « *la pénurie [...] le problème de l'eau dans toute son acuité* » (Lambert *et al.*, 1990). Cela étant, chaque niveau de sécheresse doit être envisagé localement (puisque l'eau se transporte difficilement) et en fonction des besoins, ce qui conduit à bien différencier ce phénomène de l'aridité.

Suivant une démarche similaire, la communauté météorologique internationale¹ reconnaît quatre autres types de sécheresses qui se succèdent, quant à elles, en réponse à la persistance dans le temps de la situation de déficit et à l'augmentation progressive des impacts et des conflits sociaux (Wilhite, 2005). Par conséquent, chaque définition tient compte de facteurs différents :

- La sécheresse **météorologique** est appréciée en fonction de l'écart à la normale des précipitations et renvoie à la notion de déficit ou de « *manque* ».
- La sécheresse **agricole** est définie par la disponibilité en eau des sols (*e.g.* la réserve utile ou l'humidité des sols) pour subvenir aux besoins des cultures.
- La sécheresse **hydrologique** est estimée en termes d'écart du niveau des réserves superficielles et souterraines en eau par rapport à une situation moyenne (définie sur un territoire donné par le module).
- La dimension **socio-économique** inclut, en plus des facteurs spécifiques aux trois précédents types de sécheresse, l'activité humaine. Elle résulte par conséquent des forçages qui affectent aussi bien l'offre que la demande.

Pour compléter le cadre conceptuel de la sécheresse, il serait opportun d'intégrer la dimension environnementale et d'afficher l'ensemble des besoins en eau (FIGURE 1.1).

Malgré la centaine de définitions, qui peuvent s'imbriquer dans l'une ou l'autre de ces deux typologies, elles s'accordent néanmoins toutes sur certaines caractéristiques majeures du phénomène. En premier lieu, toutes les sécheresses ont pour origine l'indigence du climat, soit un **déficit pluvio-métrique** (Wilhite et Glantz, 1985) qui se traduit par un manque d'eau pour satisfaire les besoins d'une activité ou d'un groupe (Heim Jr, 2002). C'est la raison pour laquelle il ne faut pas confondre ce phénomène avec l'aridité, qui, d'une part, n'introduit pas la dimension humaine et, par ailleurs, est une caractéristique permanente, mais variable, du climat des régions pour lesquelles la faiblesse ou rareté des précipitations est une norme (Wilhite, 1994, 2012).

Cette notion de déficit introduit une deuxième caractéristique propre au phénomène de sécheresse : sa **spécificité régionale**. Dans la mesure où la sécheresse correspond à une **aberration temporaire** ou, en d'autres termes, à un écart par rapport à des conditions climatiques considérées comme normales, elle varie donc d'une région climatique à une autre, soit au regard de la variabilité du système sur lequel elle domine. Cela étant, un épisode de sécheresse ne se limite pas nécessairement à un bassin régional. En effet, la surface affectée varie au cours du déploiement du phénomène, « *son épiceutre se déplace et son expansion spatiale s'étend et se contracte* » (Wilhite, 2005). C'est pourquoi « *la superficie notable (au moins 20 000 – 100 000 km²)* » (Rodier, 1981) de la sécheresse, pouvant ainsi prendre une ampleur nationale, voire internationale, constitue aussi une caractéristique propre à ce phénomène. Il est à noter cependant que, bien que très englobant, un épisode de sécheresse se manifeste avec un degré différent selon les territoires et leurs caractéristiques naturelles et sociétales.

1. NOAA, WMO, The National Drought Mitigation Center, etc.

1.1. Un amalgame entre différents phénomènes hydroclimatiques à préciser

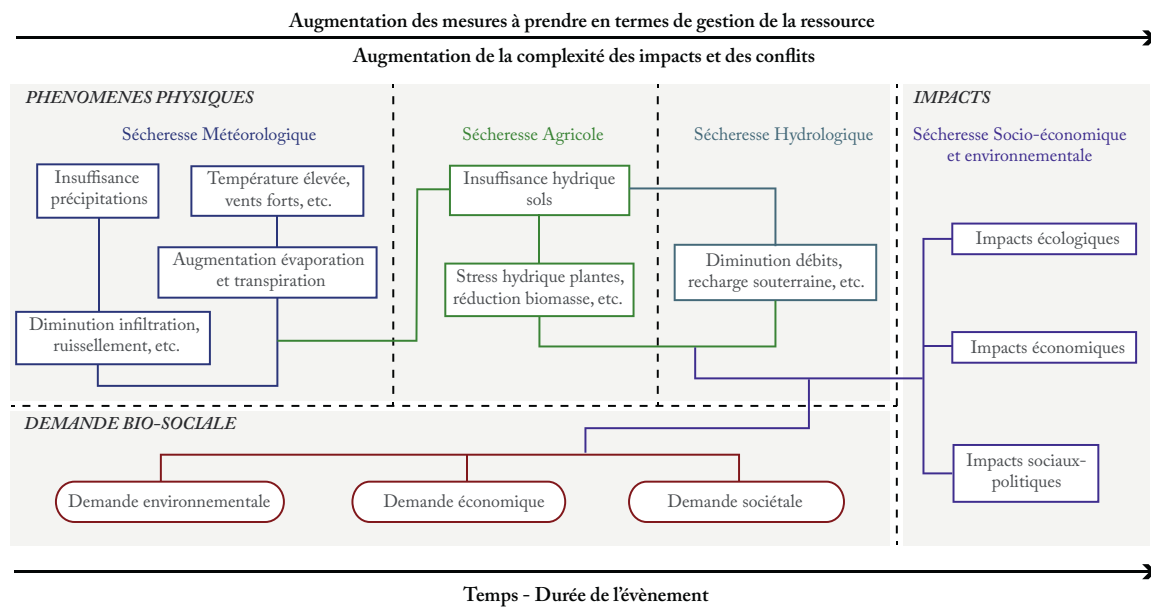


FIGURE 1.1 : LES DIFFÉRENTS TYPES DE SÉCHERESSE RECONNUS PAR LA COMMUNAUTÉ MÉTÉOROLOGIQUE (MODIFIÉ D'APRÈS WILHITE, 2006 ET LE NATIONAL DROUGHT MITIGATION CENTER, 2015)

Un autre aspect inhérent à la sécheresse et indissociable du premier évoqué est relatif à la **durée du déficit**, qui s'étend généralement sur « *une période suffisamment prolongée de temps anormalement sec* » (World Meteorological Organization, 1992 in Heim Jr, 2002) soit « *plusieurs semaines, plusieurs mois, plusieurs années* » (Rodier, 1981). Aussi, pour voir apparaître un état de sécheresse, il faut observer un minimum de jours sans précipitations, soit un état déficitaire peu fréquent, relatif à une durée normale calculée sur au moins deux décennies. Cette condition permet ainsi d'apprécier le phénomène par rapport à un climat plus local. De plus, un épisode de sécheresse s'étend généralement sur une saison voire davantage et inclue par conséquent les périodes de basses eaux. Toutefois, un événement saisonnier continu de basses eaux ne constitue pas nécessairement une sécheresse (Smakhtin, 2001).

Cependant, les spécificités relatives à la durée ne se limitent pas à la manifestation du phénomène, mais s'étendent aussi à sa formation. En effet, la genèse d'un épisode de sécheresse suit une **dynamique lente**, puisqu'elle résulte des effets cumulés dans le temps. De la même manière, un tel événement ne s'interrompt pas de manière brutale (du jour au lendemain). Au contraire, **l'effet inertiel** d'une longue période de sécheresse peut très bien se traduire par un retour aux normales pluviométriques sans pour autant que la situation soit synonyme de sortie d'état de sécheresse. Le temps nécessaire pour remplir les aquifères, par exemple, et observer de nouveau les débits habituels peut être plus ou moins long, et dépend pour l'essentiel des propriétés du système et du niveau de déficit qui le caractérise à ce moment-là.

Enfin, contrairement aux idées reçues, la sécheresse est une configuration normale et plus ou moins récurrente du climat, qui apparaît dans toutes les aires, tant de hautes que de basses précipitations (Wilhite et Glantz, 1985 ; Wilhite, 2005). Elle est donc à considérer comme un **état relatif** plutôt qu'absolu. Néanmoins, la sécheresse demeure avant tout un phénomène exceptionnel,

caractéristique qui se justifie à la fois par sa fréquence plus rare que celle d'autres manifestations hydrologiques (*e.g.* les étiages), sa durée relativement longue, son étendue géographique significative, ou encore son impact direct et indirect sur l'homme et l'environnement.

Cet état de fait renvoie à une dernière propriété majeure du phénomène : la sécheresse est spécifique au type d'activité économique ou au type de ressource affectée par le déficit hydrologique. C'est d'ailleurs sur l'ensemble de ces bases que sont élaborés les indices et les seuils visant à rendre compte des états de sécheresse (voir *infra* 2.3.2).

1.1.2 Le tarissement, un modèle de vidange des aquifères

L'amenuisement des réserves en eau des bassins hydrographiques ne doit pas systématiquement être apprécié comme une conséquence directe d'un épisode de sécheresse, tel qu'il a été défini précédemment. Toute rivière connaît effectivement, au cours de son cycle annuel, une phase durant laquelle les débits diminuent progressivement, en l'absence d'apports pluviométriques suffisants pour contribuer à l'écoulement superficiel. Cette dernière, dite de récession, correspond à la période au cours de laquelle les cours d'eau sont exclusivement alimentés par les eaux issues de la **vidange des stocks** superficiels (*e.g.* lacs, glaciers) et souterrains (*e.g.* aquifères profonds, nappes perchées temporaires). Son analyse porte principalement sur la forme de la courbe de récession ou plus spécifiquement sur la courbe de tarissement, qui équivaut à la contribution unique des réserves souterraines, et est caractérisée par le débit de base.

À partir de la courbe de récession, les trois composantes ou origines des contributions à l'écoulement du cours d'eau peuvent ainsi être décrites (FIGURE 1.2) :

- Le ruissellement de surface et de subsurface (*quick flow* ou *overland flow*) est spécifié par la première partie de l'hydrogramme, sur laquelle s'observe une diminution rapide des débits entraînée par la décrue du ruissellement direct et amplifiée par l'évaporation ;
- Les apports de subsurface plus profonde (*throughflow* ou *interflow*) sont explicités sur la deuxième partie de la courbe qui montre un ralentissement de la diminution des débits, correspondant au ressuyage des sols ;
- La vidange des réserves souterraines (*outflow* ou *base flow*), qui s'initie au point d'inflexion de la courbe de récession, correspond au tarissement des sources et concourt à la stabilisation des débits, en présence d'aquifères pouvant assurer le soutien d'étiage.

Ce dernier processus de vidange est décrit mathématiquement par plusieurs équations dont le **modèle exponentiel** est le plus répandu (Bernier, 1964). Le paramètre α de ce type de modèle est le coefficient de tarissement (voir *infra* 2.3.1.6), qui renseigne les propriétés de vidange des réservoirs souterrains présents sur le bassin.

L'étude du tarissement permet ainsi d'apprécier la capacité de l'aquifère à soutenir les débits en période sèche. En effet, les bassins dominés par les deux premiers types de contributions sont classés comme « bassins éclair ». Dans cette configuration, la réponse aux précipitations s'effectue en

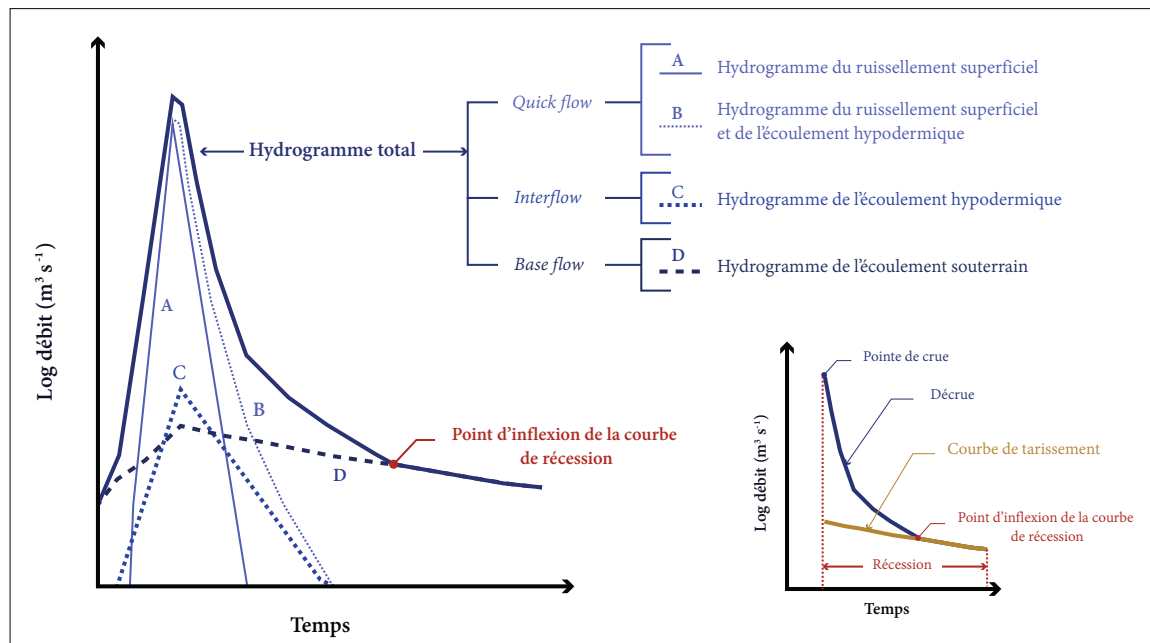


FIGURE 1.2 : DÉCOMPOSITIONS CONCEPTUELLES D'UN HYDROGRAMME : LES CONTRIBUTIONS À L'ÉCOULEMENT EN PHASE DE RÉCESSION ET DE TARISSEMENT

quelques heures voire quelques jours. En revanche, la vidange de l'aquifère profond répond lentement avec un délai de plusieurs jours, mois, voire années. Les bassins alimentés majoritairement par les réserves souterraines sont par conséquent classés en réponse lente, avec un débit de base généralement élevé. Ils sont alors en mesure de soutenir les débits des cours d'eau pendant les périodes sans précipitations.

La récession et, parfois, le tarissement constituent des processus hydrologiques qui se répètent lors des cycles dès le dernier épisode pluvieux significatif et qui s'achèvent au jour de l'étiage *stricto sensu*. La dynamique de tarissement est donc théoriquement propre au bassin considéré, mais peut être cependant variable sur le linéaire d'un même cours d'eau.

En effet, des hétérogénéités structurelles peuvent être observées, notamment sur des bassins relativement étendus, qu'elles soient en lien avec des changements au niveau de la géologie (*e.g.* zone karstique, zone alluviale), de la topographie, ou encore des pressions anthropiques locales (*e.g.* zone agricole, aire urbaine). Le tarissement observé en un point donné intègre en effet le prélèvement anthropique, que ce dernier soit réalisé par pompage des nappes ou par prise directe dans la rivière.

1.1.3 L'étiage ou la caractérisation des extrêmes hydrologiques

Un niveau marqué de basses eaux peut être la conséquence d'une sécheresse hydrologique, mais à l'inverse de celle-ci, il n'est pas considéré comme un événement exceptionnel. Dans le langage commun, cette situation est souvent associée à l'étiage. Cet amalgame se retrouve aussi très fréquemment dans la littérature scientifique, puisque, selon les auteurs, l'étiage peut faire référence à un faible volume d'eau ou de débit, à une période de l'année ou encore à une durée, et s'observe généralement à l'échelle locale.

Au sens strict du terme, l'étiage correspond au jour durant lequel le débit minimal du cycle est atteint. Composante du régime hydrologique des rivières, il se manifeste, d'une part, presque chaque année, le plus souvent **au cours de la même saison** (Smakhtin, 2001), et permet le **découpage du cycle hydrologique**, qui s'achève à l'atteinte du débit d'étiage strict.

L'usage de ce terme s'est progressivement étendu et généralisé aux (très) bas débits, introduisant de fait des nuances autour du phénomène, qui recouvre aujourd'hui une notion aux multiples aspects. L'étiage, au sens vernaculaire ou *lato sensu* (*ls*), ne renvoie donc plus à un concept aussi précis que celui de l'étiage *stricto sensu* (*ss*). Toutefois, la majorité des définitions qui lui sont désormais allouées s'accordent sur son **caractère indigent** (Lang, 2007 ; Lang Delus, 2011). Cette notion de déficience se rapporte principalement au débit ou au volume d'eau (in)disponible, que ce soit en termes de « *maigres très prononcés* » (Frécaut, 1975), ou encore de « *débit exceptionnellement faible d'un cours d'eau* » (Dacharry, 1996), pour ne citer que quelques exemples. Pour d'autres auteurs, l'étiage est une manifestation hydrologique **extrême** (au sens statistique), puisqu'il correspond au « *niveau annuel le plus bas atteint par un cours d'eau en un point donné* » (Roche, 1986).

Cette dernière définition révèle deux dimensions supplémentaires propres au phénomène, en le plaçant dans un nouveau cadre à la fois spatial et temporel. Dans la majorité des cas, les cycles hydrologiques sont cloisonnés au sein d'une année. Selon cette configuration, l'étiage peut donc recouvrir un caractère annuel, donc fréquent. Pour autant, cet état de fait n'est pas systématiquement vérifié, notamment en domaine méditerranéen, où la durée de certains cycles est souvent supérieure à 365 jours.

Au-delà de l'aspect temporel, la période d'étiage (*ls*) ou de très maigres prononcés s'inscrit également dans l'espace, puisqu'elle est observable **localement**. En effet, bien qu'à l'échelle d'un bassin hydrographique, la dynamique d'écoulement entre l'amont et l'aval soit relativement « *homogène* », dans la mesure où les différentes phases hydrologiques (*e.g.* montée en crue, récession) se manifestent au cours des mêmes périodes, avec un décalage temporel de quelques heures à quelques jours entre l'amont et l'aval, il n'est pas rare d'observer des situations d'étiage (*ls*) plus précoces ou plus tardives d'un point à l'autre d'un même bassin hydrographique. Cela peut s'expliquer, comme pour le tarissement, par la disparité des facteurs physiographiques et anthropiques, à l'origine des pressions exercées directement ou indirectement sur l'écoulement en période sèche (voir *infra* 1.2). C'est la raison pour laquelle la plupart des études sur les très bas débits sont généralement menées sur plusieurs stations de mesure des débits d'un même cours d'eau, voire sur une station unique, dite de référence, supposée alors représenter l'état global de l'ensemble du linéaire du cours d'eau considéré sur un bassin aux caractéristiques homogènes, mais rarement au-delà.

Enfin, parmi les définitions proposées dans la littérature, certaines relèvent une particularité supplémentaire, propre à sa durée. Bien que « *variable* » (Frécaut, 1975) d'une année sur l'autre, l'étiage (*ls*) s'étend d'ordinaire sur une période courte « *de quelques jours à quelques semaines* » (Abi-Zeid et Bobée, 1999). Cette spécificité est, en outre, systématiquement prise en compte dans l'étude des maigres prononcés, surtout lorsqu'il s'agit d'en évaluer la sévérité. Il semble effectivement juste de

penser qu'une situation de très bas débits sur quelques jours sera moins préjudiciable qu'une situation de bas débits sur une période prolongée (Lang, 2007).

Malgré les nombreuses conceptions (confuses et contradictoires, *e.g. lato sensu* et *stricto sensu*) existantes autour du phénomène d'étiage, très peu d'entre elles rendent compte des facteurs et des processus intervenant dans sa genèse, ces derniers étant supposés synthétisés ou intégrés dans la (les) valeur(s) de débit enregistrée(s) au cours de l'intervalle de temps considéré. Pourtant, si l'étiage (*ls* ou *ss*) constitue un phénomène pouvant apparaître spontanément, sa formation est, au contraire, relativement lente, sans toutefois être comparable au temps long nécessaire à la génération d'un épisode de sécheresse. Cela suppose donc l'action de facteurs et de pressions (naturelles et anthropiques) qu'il semble important de prendre en compte.

Aujourd'hui, bien qu'il englobe les débits les plus faibles de l'année, et caractérise de fait les extrêmes hydrologiques déficitaires, le phénomène d'étiage est essentiellement apprécié au regard de l'objectif de l'étude et de l'impact étudié. C'est pourquoi, comme pour les épisodes de sécheresse, les indices visant à appréhender et prévoir les très bas débits sont élaborés à partir des principales grandeurs qui les caractérisent, soient, les concernant, le débit, la durée et la sévérité. Elles ne renvoient dès lors plus à un état hydrologique absolu, mais apparaissent au contraire comme un niveau à apprécier par **rapport à un seuil** à choisir (voir *infra* 2.3.1).

1.1.4 Les basses eaux, un phénomène hydrologique « flou »

Dans la littérature, les basses eaux s'opposent naturellement aux hautes eaux. Pourtant, cette notion demeure très floue et dépend essentiellement de la durée de la saison sèche et de la nature du problème traité (Roche, 1963).

Toutefois, les rares éléments de définition attribués à ce phénomène permettent de mettre en lumière quelques caractéristiques génériques. Tout d'abord, comme l'étiage et le tarissement, les basses eaux font référence à une **manifestation hydrologique annuelle**, et sont plus particulièrement rattachées à une saison « *saison habituelle des basses eaux* » (Frécaut, 1975), « *basses eaux saisonnières* » (Dacharry, 1996). Elles constituent de fait un **phénomène saisonnier**, cloisonné au sein de la période durant laquelle les apports pluviométriques sont insuffisants pour contribuer à l'écoulement « *basses eaux de la saison sèche* » (Roche, 1963). De ce point de vue, elles coïncideraient donc avec la phase de tarissement et peuvent ainsi être observées une à deux fois par an, en période estivale et/ou hivernale, selon les régions climatiques. C'est le cas notamment du domaine montagnard. En hiver, les précipitations sous forme de neige s'accumulent sur la surface gelée du sol, et forment ainsi un stock non utilisable pour assurer la recharge immédiate des sols et des aquifères et alimenter les cours d'eau².

La spécificité saisonnière des basses eaux induit deux autres particularités, dont la première est relative à son échelle spatiale d'observation. Réduire le phénomène à une saison revient alors à considérer que son champ d'expansion est borné à l'aire climatique. L'autre particularité repose sur sa

2. Le présent travail se limite toutefois aux phénomènes observés aux latitudes moyennes ou chaudes. Ainsi les configurations au sein desquelles le froid joue un rôle essentiel ne seront pas abordées ici.

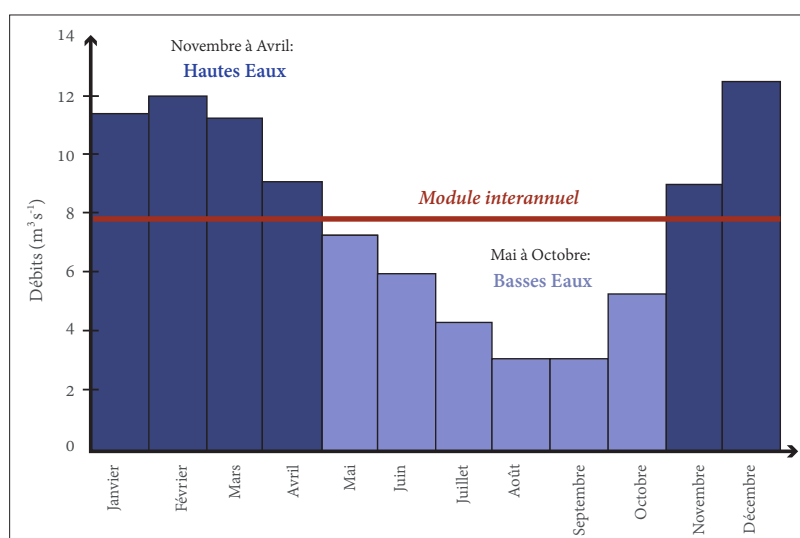


FIGURE 1.3 : LE MODULE INTERANNUAL, SEUIL DE DISCRIMINATION DES BASSES EAUX (MODIFIÉ D'APRÈS LANG DELUS, 2011)

fréquence. Étant donné qu'elles surviennent annuellement, elles se réfèrent par définition à un **évènement récurrent**, et, par conséquent, désignent un état hydrologique habituel, voire banal, « *basses eaux ordinaires* » (Frécaut, 1975), et normal ou **modéré** « *basses eaux moyennes* » (Rocheport, 1969 in Lang Delus, 2011).

Aussi, les basses eaux concordent formellement avec la période durant laquelle le débit est inférieur au **module interannuel** (Lang Delus, 2011), valeur seuil calculée sur au minimum deux décennies d'enregistrements journaliers de débits, laquelle est communément employée pour fixer de manière simple la limite entre les hautes eaux et les basses eaux (FIGURE 1.3).

La pénurie des théories existantes autour des basses eaux permet assez difficilement de bien les distinguer des phénomènes décrits précédemment. Aussi, peut-on envisager de mener la réflexion autrement, en s'efforçant de déterminer ce que ne sont pas les basses eaux, afin de pouvoir en préciser, par la suite, le cadre conceptuel.

En premier lieu, bien qu'elles apparaissent généralement durant la période sèche (estivale et/ou hivernale), les basses eaux ne peuvent être restreintes à une saison.

À titre d'exemple, dans le domaine méditerranéen, l'entrée en basses eaux peut s'effectuer de manière précoce, c'est-à-dire au début du printemps.

De la même manière, le phénomène peut perdurer certaines années jusqu'à la fin de l'automne. Ceci étant, les basses eaux incluent forcément la période sèche, donc par extension le tarissement, sans toutefois que la concordance soit univoque. En effet, si la phase de tarissement est parfaitement délimitée temporellement par la saison sèche (période durant laquelle les précipitations ne contribuent pas à l'écoulement), les basses eaux méditerranéennes peuvent, quant à elles, s'étendre au-delà de cette même période et intégrer des petites crues et des récessions. C'est pourquoi, si l'on s'en tient à la définition des basses eaux comme étant l'ensemble des débits inférieurs au module,

le franchissement à la baisse sous ce seuil peut être observé avant la date d'entrée en phase de tarissement, et la situation peut aussi perdurer plusieurs jours après que le débit d'étiage strict ait été atteint, c'est-à-dire après le retour des précipitations.

La période de basses eaux inclut donc également, mais sans s'y limiter, la période d'étiage *lato sensu* « *de durée [...] plus brève que les basses eaux* » (Frécaut, 1975), qui correspond à « *une baisse de niveau plus considérable que celle qui caractérise les basses eaux* » (Rochefort, 1969 in Lang Delus, 2011), et qui, de fait, en est « *l'exacerbation* » (Dacharry, 1996).

Par ailleurs, les basses eaux annuelles ne sont pas synonymes de sécheresse, exceptionnelle en raison de sa fréquence plus rare, bien qu'un épisode de sécheresse inclue les basses eaux et englobe un tarissement et un étiage parfois très marqués. Il est également à noter que le caractère récurrent qui entre dans leur définition générique introduit la notion de fréquence, laquelle peut donc être, selon le niveau considéré, très rare. Par conséquent, des situations exceptionnelles de basses eaux sont aussi susceptibles d'être observées certaines années.

Cette notion de basses eaux est donc très englobante, mais convient assez bien à l'idée que la montée vers une situation d'insuffisance en eau peut s'enclencher bien avant le tarissement et rien ne dit que la fin de la situation de crise intervienne avec la première pluie notable qui cristallise la fin d'un cycle. Les difficultés d'approvisionnement en eau peuvent en effet perdurer quelque temps, selon l'inertie des hydrosystèmes.

Conclusion — Chaque phénomène fait appel à diverses notions. Dans ce travail, les définitions suivantes seront retenues :

- L'étiage, plus communément étendu aux plus faibles débits observés sur une année hydrologique, correspond strictement au débit le plus faible de l'année (*ss*), en un point donné.
- L'aridité est un phénomène purement physique. Il est défini par un déficit des conditions atmosphériques, situation normale dans les zones arides. Il existe toutefois une variabilité de l'aridité, qui peut être plus ou moins prononcée selon les années et les lieux.
- La sécheresse s'apparente à une situation d'aridité qui se manifeste cependant dans les zones non arides. Elle équivaut donc à un état de déficit atmosphérique exceptionnel, et spatialement étendu. Par ailleurs, la sécheresse introduit la dimension humaine (inexistante dans l'aridité), et de surcroît, s'évalue au regard de l'impact qu'elle engendre.
- Le tarissement se rapporte à la dernière phase du processus de récession (*i.e.* la diminution des débits en l'absence de précipitations suffisantes pour contribuer à l'écoulement) et équivaut au débit de base. Il correspond exclusivement à la vidange des réservoirs souterrains au cours de la période sèche et se traduit, la plupart du temps, par une décroissance exponentielle des débits.
- Les basses eaux représentent, d'un point de vue strictement hydrologique, la gamme des débits inférieurs au module interannuel. Elles constituent des situations hydrologiques annuelles relativement normales ou fréquentes. Elles intègrent donc partiellement ou en partie le tarissement et l'étiage, mais sont toutefois susceptibles d'apparaître de manière plus ou moins mar-

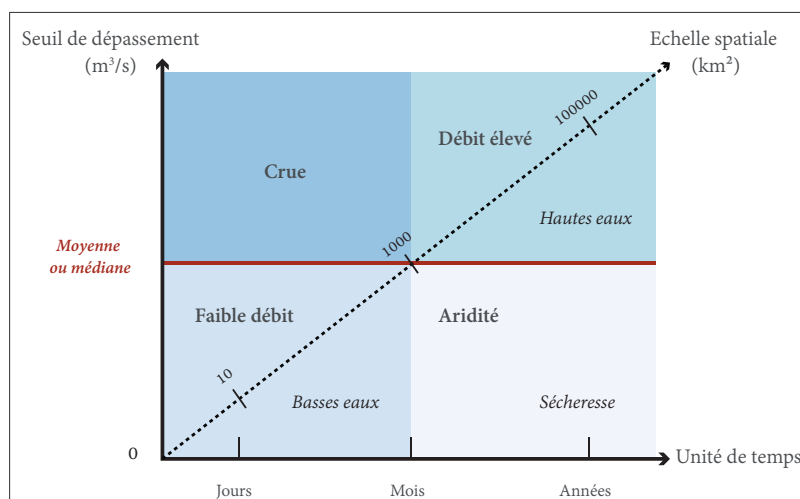


FIGURE 1.4 : SEUILS DE DISCRIMINATION DES ÉTATS HYDROLOGIQUES EXTRÊMES (MODIFIÉ D'APRÈS DRACUP ET *al.*, 1980)

quée en réponse au niveau de déficit atmosphérique (*i.e.* de l'état de sécheresse atmosphérique ou des conditions d'aridité).

L'emboîtement des phénomènes présentés ne doit toutefois pas masquer leur caractère singulier, et ce, bien qu'ils reflètent tous un état de raréfaction voire de déficit hydrologique impactant les usages de l'eau. Dans ce sens, Dracup et *al.*, (1980) proposent une discrimination simple des états hydrologiques par des seuils de durée et de débit, à laquelle il semblerait judicieux d'intégrer l'échelle spatiale d'observation (FIGURE 1.4).

Enfin, il est à noter que la description des phénomènes n'intègre que partiellement, voire nullement, les facteurs qui contrôlent leur genèse, ni même les forçages responsables de leur état de sévérité. Or, il semble essentiel de les inclure dans l'équation théorique visant à évaluer l'état de la ressource en eau à un moment et en un lieu donné. Par ailleurs, outre dans le cas des sécheresses, la demande anthropique et les besoins environnementaux sont absents des études, les états définis n'étant que physiques ou structurels. De telles démarches, sans être pour autant dénuées d'intérêt, ne s'avèrent que peu adaptées (ou incomplètes), lorsque l'on s'attache à anticiper des situations de tension ou de crise. La quantification ou l'estimation d'un niveau de déficit de la ressource en eau n'a de sens que dans la mesure où il existe des enjeux, pour lesquels ce manque pourrait être préjudiciable. Cela rejoint la notion de risque, défini de manière générique comme la combinaison d'un aléa (phénomène naturel ou technologique potentiellement dangereux) et de la vulnérabilité (des enjeux – économiques, politiques, humains, etc.) (D'Ercole et Pigeon, 1999 ; Pigeon, 2002 ; Léone et Vinet, 2006 ; Dauphiné et Provitolo, 2007, 2013).

Au vu de l'ensemble de ces éléments, le phénomène de basses eaux nécessite donc :

- (1) Une analyse plus fine, dont un bornage quantitatif approprié, notamment en limite supérieure. Le choix du module est-il vraiment approprié ? En effet, puisqu'il est calculé sur la base d'enregistrements qui incluent aussi bien les crues remarquables que les étiages sévères,

on peut, à juste titre, douter de sa pertinence pour définir des états moyens de basses eaux en domaine méditerranéen. La prise en compte des crues exceptionnelles (*e.g.* celle de 2002 dans le département du Gard), qui relèvent fortement la valeur moyenne des débits, conduit nécessairement à une surestimation du potentiel hydrologique de ces bassins.

- (2) Une conceptualisation plus précise, reposant à la fois sur un cadrage spatial et temporel, mais également en lien avec l'ensemble des processus naturels impliqués dans sa formation, autant que les forçages extérieurs (*i.e.* climatiques et anthropiques) pouvant l'impacter et entraîner, de fait, l'émergence de situations de manque d'eau.
- (3) L'intégration de la dimension humaine pour la mesure de ses états de sévérité.

1.2 La genèse des situations de déficit hydrologique : éléments structurants et forçages pesants

La question qui se pose à présent est de comprendre comment, de manière toute à fait théorique dans un premier temps, une situation de déficit hydrologique est susceptible d'apparaître. La réflexion s'oriente dès lors vers la connaissance des facteurs qui exercent les principaux contrôles sur l'état des réserves en eau.

Si l'origine principale de la diminution des écoulements (superficiels et souterrains) est d'ordre atmosphérique, comme cela a été souligné précédemment dans les définitions des sécheresses et du tarissement, les forçages climatiques ne peuvent toutefois justifier à eux seuls la faiblesse des débits. En effet, la description du processus de récession (voir *supra* 1.1.2) a mis en évidence que le régime hydrologique en période de faibles pluies est principalement maintenu par la vidange des sols et des réservoirs superficiels et souterrains. Cela suggère par conséquent que le niveau (de déficit) hydrologique dépend aussi bien de l'état de remplissage des nappes en fin de saison des pluies que de la capacité de ces dernières à restituer l'eau emmagasinée. En d'autres termes, les caractéristiques physiographiques (*e.g.* la lithologie, la morphologie, la pédologie) des bassins, par le biais des contrôles qu'elles exercent sur les processus de recharge et de vidange des différents réservoirs (s'il y en a), sont autant d'éléments d'importance dont il faut tenir compte.

Ce dernier postulat convient donc aux bassins sur lesquels les écoulements sont relativement peu perturbés (*i.e.* pour lesquels les conditions naturelles prédominent), mais s'applique également aux territoires anthropisés, lesquels sont par ailleurs soumis à des forçages supplémentaires. Il n'est effectivement plus à démontrer que, dans ces bassins de vie, les modifications engendrées tant par l'activité, les aménagements et les besoins humains que par le mode de gestion des territoires ont des conséquences à la fois directes et indirectes sur le régime des cours d'eau, par ailleurs bien plus sévères en période de bas débits.

1.2.1 Les conditions naturelles de formation des bas débits

Les débits des cours d'eau fluctuent naturellement toute l'année, et tout au long de leur parcours depuis leur source jusqu'à l'exutoire. Ces variations sont conditionnées à la fois par le contexte clima-

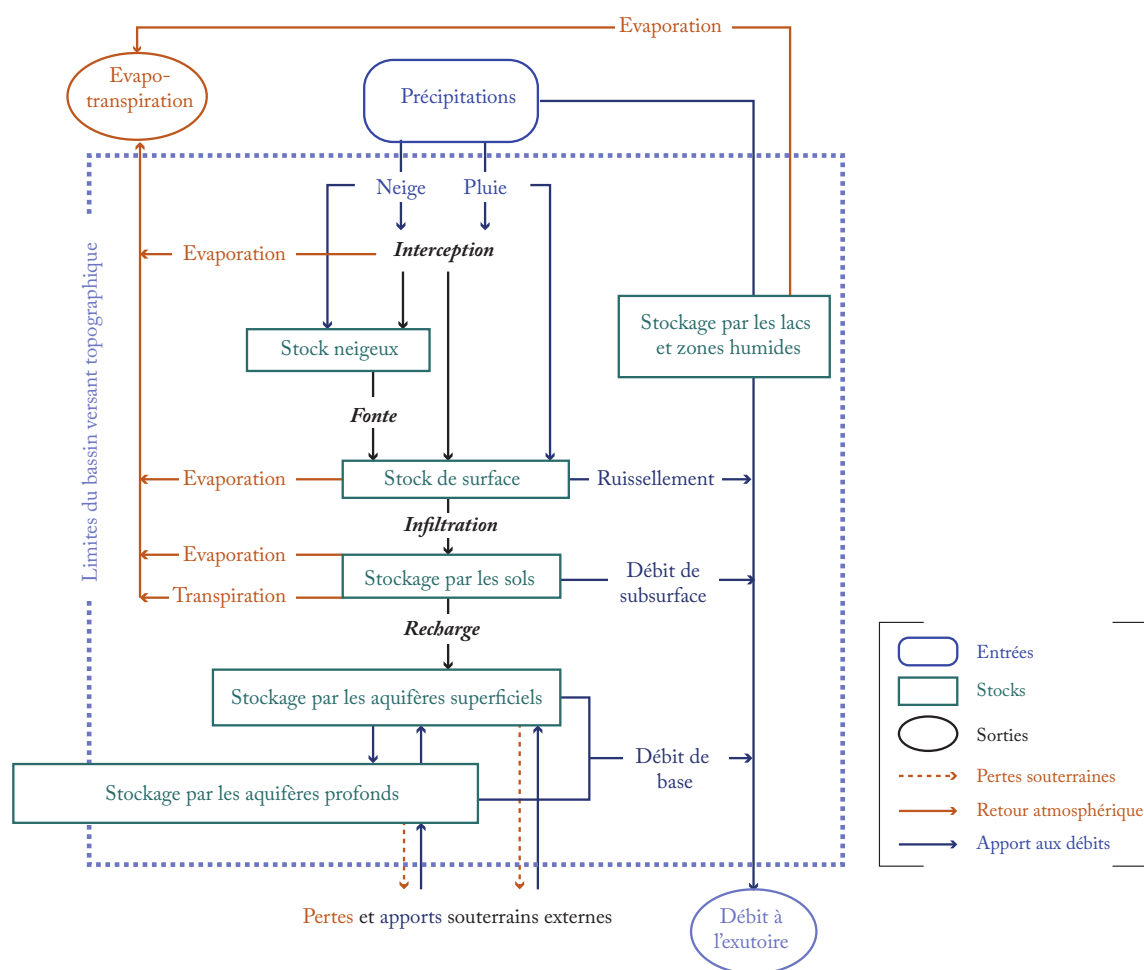


FIGURE 1.5 : LE CYCLE DE L'EAU À L'ÉCHELLE DU BASSIN VERSANT (MODIFIÉ D'APRÈS GUSTARD ET DEMUTH, 2008)

tique, à l'origine de la recharge des réservoirs, et par les conditions géophysiques des bassins versants (Frécaut, 1979), qui conditionnent leur capacité à absorber et stocker l'eau durant les évènements pluvieux pour la relâcher ensuite sous forme de bas débits (Smakhtin, 2001) (FIGURE 1.5).

1.2.1.1 Le contexte climatique : recharge en eau des réservoirs

Le fonctionnement de l'atmosphère détermine la magnitude et la variation de la température, des précipitations et du potentiel d'évaporation durant une année. Toutefois, il varie dans l'espace, notamment avec l'altitude, la longitude, la latitude, etc., mais aussi dans le temps, à des échelles interannuelle, décennale, et même centennale. C'est pourquoi, lorsqu'il y a un changement au sein du système atmosphérique, il y a nécessairement un changement au sein du régime des cours d'eau (Gustard et Demuth, 2008).

Lorsque de ce changement résulte une diminution des précipitations accompagnée d'une augmentation des températures, une période sèche est observée, pouvant, à terme, se transformer en épisode de sécheresse. Par conséquent, les niveaux des réserves en eau s'amenuisent.

Pour assurer la pérennité des écoulements durant cette période particulièrement sensible, il est

donc indispensable que les réservoirs superficiels (*e.g.* lacs, mares) et souterrains (*e.g.* nappes, aquifères) aient été rechargés de manière saisonnière, c'est-à-dire, dans le cas des bassins méditerranéens, majoritairement en automne et en hiver et, certes dans une moindre mesure, mais tout aussi essentielle, au printemps. Cela implique donc une bonne **répartition spatio-temporelle des précipitations**, et ce **en quantité suffisante**, puisque les conditions de recharge déterminent à la fois la précocité de la période de basses eaux (donc des phases de tarissement et de l'étiage), et leur sévérité. En effet, l'état hydrologique d'un cours d'eau peut se trouver aggravé en l'absence d'apports en eau durant la période estivale pouvant « compenser », le cas échéant, le déficit pluviométrique antérieur.

À cela, s'ajoute l'action d'autres facteurs atmosphériques susceptibles, par effets cumulés, d'amplifier le phénomène. Le niveau d'ensoleillement (corrigé de l'effet de la couverture nuageuse – masses d'air chaudes), ou la hausse des températures, par exemple, entraînent l'augmentation des taux d'évaporation des sols et des réserves superficielles en eau, d'une part, et d'évapotranspiration de la végétation de la ripisylve et du bassin, d'autre part. Le vent à l'effet desséchant est également un paramètre ayant un impact non négligeable sur les débits durant la période sèche. Dans le cas de rivières ou de fleuves allogènes (*e.g.* le Rhône ou le Nil), l'alimentation par une aire climatique différente (*e.g.* de montagne, de hauts plateaux humides) joue un rôle estival dans les basses eaux.

1.2.1.2 Les caractéristiques physiographiques : stockage et vidange des réserves

Pour assurer la pérennité de l'écoulement superficiel en l'absence de précipitations, il faut par ailleurs que les propriétés hydrauliques des aquifères le permettent. En effet, tandis que les conditions atmosphériques peuvent conduire à un excédent en eau durant une saison et à une insuffisance durant une autre, les processus à l'échelle du bassin versant déterminent comment ces surplus et ces déficits se propagent progressivement au travers de la végétation, du sol et du sous-sol, puis jusqu'au cours d'eau. Les facteurs qui influent sur ces processus peuvent être mis en évidence en se reportant sur chacune des trois composantes de la courbe de récession.

Lors de la première phase, l'alimentation des débits des cours d'eau provient en grande partie du ruissellement de surface, lui-même directement lié à l'intensité de la dernière pluie et à la **capacité d'infiltration** des sols. Cette dernière est fortement conditionnée par la **nature des sols** (*e.g.* sa texture), mais aussi par l'**occupation des sols**, la présence de végétation augmentant significativement la porosité des sols, réduisant le phénomène de battance et augmentant de fait sa perméabilité (Le Bissonnais et Gascuel-Odoux, 1998). C'est la raison pour laquelle, le ruissellement a donc tendance à apparaître sur des surfaces rapidement saturées ou imperméables (urbanisées ou non végétalisées), sur des terrains pentus, argileux ou encore sur des sols où la roche est affleurante (Cosandey *et al.*, 1990, 2005).

Au cours de la phase suivante, la principale contribution à l'écoulement provient des réserves superficielles (*e.g.* lacs, mares) et de subsurface, et s'observe généralement sur des sols perméables (*i.e.* sableux), pour lesquels le taux d'infiltration est plus important. Lorsque les apports pluviométriques sont inférieurs à l'**infiltrabilité**, l'eau est d'abord stockée dans les micro-dépressions du sol,

pour se déplacer ensuite latéralement vers le cours d'eau, le long de la **couche perméable plus profonde**. Si toutefois les précipitations sont excédentaires, la couche superficielle se sature et une partie de la contribution se fait aussi par ruissellement direct.

Enfin, lorsque les deux précédentes sources d'approvisionnement sont épuisées, et en l'absence de nouvel apport pluviométrique, le réservoir souterrain demeure l'unique contribution à l'écoulement superficiel, et ce, dans l'absolu, jusqu'à l'épuisement du stock. Lorsque le sol se remplit, le taux d'humidité augmente et l'eau peut alors s'infiltrer verticalement vers l'aquifère pour recharger le réservoir souterrain. L'eau peut aussi participer à la recharge directe de l'aquifère, soit sans remplir complètement les couches superficielles, notamment en **présence de fractures** (*e.g.* les terrains karstiques). Le processus de vidange vers le cours d'eau est quant à lui gouverné principalement par l'inclinaison de la nappe (donc en lien avec la **topographie** du bassin) et la transmissivité de l'aquifère (qui peut être évaluée par le produit de l'**épaisseur** saturée et de la **conductivité hydraulique**), cette dernière propriété étant étroitement liée à la **géologie** et à la **morphologie**.

L'état de la ressource en période sèche dépend ainsi des cheminements possibles de l'eau, et par conséquent des caractéristiques « naturelles » des bassins hydrographiques, dont les facteurs principaux sont la géologie, la pédologie et la couverture végétale du bassin. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle les indices basés sur les débits d'étiage sont généralement hautement corrélés aux propriétés des sols et à la géologie (Gustard et Gross, 1989 ; Lacey et Grayson, 1998) ainsi qu'à la présence ou à l'absence de zones humides ou encore de lacs sur un bassin (Smakhtin, 2001).

1.2.2 L'influence des pressions anthropiques sur le phénomène

La diminution des débits des cours d'eau et des niveaux des réservoirs souterrains n'est pas exclusivement imputable au contexte climatique et aux caractéristiques physiographiques des bassins, notamment si ces derniers sont anthropisés. En effet, il n'est pas rare de constater que sur des territoires naturellement homogènes, autrement dit, qui présentent des particularités physiques identiques (*i.e.* de même substratum) et soumis à des influences climatiques similaires (*i.e.* au régime pluviométrique comparable), des disparités existent en termes de disponibilité en eau, essentiellement durant les périodes sèches. Ceci est en partie dû à une présence humaine, dont la répartition, les activités et les modes de gestion ont des répercussions considérables sur la ressource.

1.2.2.1 Les pratiques et les usages de l'eau et des sols

Entre toutes les actions anthropiques ayant un impact direct sur les volumes en eau disponibles, les prélèvements pour satisfaire les usages (domestique, agricole ou industriel) constituent celles qui affectent les débits de manière la plus significative. En effet, si les prélèvements superficiels réduisent considérablement les débits, les prélèvements souterrains affectent, quant à eux, le niveau des surfaces phréatiques et ainsi le potentiel de réémergence dans le cours d'eau. De plus, dans certains cas, ils sont susceptibles d'induire une recharge de l'aquifère par la rivière elle-même. Ce lien de cause à effet est d'autant plus marqué que c'est généralement en période sèche, alors que les débits sont les plus faibles, que les besoins, donc les prélèvements, augmentent.

Ceci étant, au regard de la consommation en eau, les usages domestiques et industriels ne sont impactant que dans une mesure très relative, puisqu'ils nécessitent des prises d'eau importantes, sans toutefois en consommer l'intégralité. Une grande partie de l'eau soutirée des réserves souterraines et/ou superficielles retourne ainsi dans le milieu, mais en différé, et pas systématiquement dans le réservoir de soutirage, et surtout dans un état de qualité généralement dégradé (Cosandey et Robinson, 2000). C'est la concentration massive des populations et des industries qui augmente la pression exercée sur la ressource, surtout si cette densité humaine est localisée sur des territoires fragiles, dont les réserves sont naturellement peu abondantes.

En revanche, de toutes les activités humaines (hormis l'usage de l'eau destiné au refroidissement des centrales thermiques), l'irrigation est de loin la plus consommatrice en eau et, paradoxalement, celle qui restitue la plus grande part des prélèvements au milieu. Sur la totalité de l'eau prélevée à destination de l'agriculture irriguée, la moitié est évaporée. Le restant est soit consommé, soit restitué au milieu (*i.e.* contribution au drainage de subsurface), mais avec un décalage dans le temps non connu (Roche *et al.*, 2012). Les proportions sont néanmoins variables selon les besoins et les pratiques culturales. Quelle que soit la technique utilisée, l'irrigation augmente l'évaporation et l'évapotranspiration, limite les écoulements et participe ainsi au déficit hydrologique, même si c'est de manière temporaire. De plus, et comme les rejets domestiques et industriels, l'eau agricole restituée au milieu naturel est responsable de la dégradation de la qualité des eaux.

Certaines actions anthropiques agissent aussi de manière indirecte sur la situation hydrologique d'un territoire. C'est le cas notamment des modifications de l'occupation du sol qui altèrent les caractéristiques d'infiltration et/ou d'évaporation, impactant alors les quantités d'eau accumulées dans les réservoirs durant les événements pluvieux, et par conséquent, les quantités pouvant être libérées pour alimenter les cours d'eau en période sèche.

Les changements de la couverture végétale peuvent également entraîner une modification à la baisse ou à la hausse des niveaux d'évapotranspiration, selon qu'il s'agit respectivement de défrichage ou de plantation. L'évolution de ces taux est amplifiée par d'autres facteurs, relatifs au type et à la densité de végétation substituée, ôtée ou intégrée, et à la nouvelle pratique culturale à laquelle elle est soumise.

Le bilan hydrique résultant des actions de reboisement et/ou de reforestation est clairement identifié (Cosandey, 1995 ; Cosandey et Robinson, 2000). Si l'augmentation du peuplement d'arbres accroît la quantité d'eau évapotranspirée (*i.e.* pertes évaporatoires), elle contribue toutefois à la protection des sols, sur lesquels une meilleure infiltrabilité est généralement observée, facilitant ainsi la recharge en eau souterraine.

Comme cela a été mentionné, l'agriculture est une activité très gourmande en eau. Toutefois, son impact sur la réserve hydrique n'est pas uniquement lié aux besoins en eau des plantes cultivées, sinon à la modification des propriétés des sols relative aux pratiques culturales. Les sols agricoles sont d'une part soumis au compactage dû au passage répété d'engins et à l'érosion engendrée par l'absence de protection végétale durant la première partie du cycle de croissance de la culture en place. La combinaison de ces deux facteurs favorise sensiblement le phénomène de ruissellement, au

détriment de l'infiltration par les sols. En conséquence, en période humide, la recharge des réserves souterraines en eau est amoindrie. De plus, suivant le cycle de croissance et le type de culture en place, les besoins en eau varient de manière notable. De manière générale, ces derniers augmentent durant la période où les précipitations sont les plus faibles et les événements pluvieux les moins fréquents. Ainsi, l'ouverture de parcelles à l'agriculture, au détriment des prairies permanentes ou des forêts, peut entraîner une baisse de la recharge en eau durant la période humide et une augmentation des prélèvements en période sèche. Tout ceci concourt de manière générale à l'aggravation de la situation des basses eaux.

Enfin, l'augmentation de la population entraîne inévitablement le développement de structures urbaines. La conséquence directe du phénomène d'urbanisation est l'imperméabilisation presque totale des sols, qui entraîne à son tour une diminution de l'infiltration et, par extension, de la recharge des aquifères. À cela s'ajoute une augmentation des prélèvements pour répondre aux nouveaux besoins en eau domestiques. À terme, l'urbanisation est responsable de l'affaiblissement des débits de base des cours d'eau.

1.2.2.2 Le mode de gestion de la ressource en eau

La façon dont les sociétés gèrent leur milieu modifie parfois considérablement les fonctionnements hydrologiques des rivières. La gestion d'un territoire ou d'une ressource peut se traduire techniquement (physiquement), par des aménagements, et politiquement (institutionnellement), par des lois et des documents de planification.

En ce qui concerne les aménagements hydrologiques, les barrages sont certainement les plus importants. Leur rôle est de retenir temporairement l'eau et de la restituer à différentes périodes de l'année dans le but de satisfaire les différents usages (*e.g.* irrigation, refroidissement des centrales, alimentation en eau domestique et industrielle) et besoins en eau (*e.g.* assainissement, navigation, écrêtement des crues, loisirs nautiques, sauvegarde des milieux aquatiques). En règle générale, chaque ouvrage possède au minimum deux fonctions. Selon la finalité première du barrage, les conséquences s'exprimeront soit au niveau de la répartition des écoulements (rythmes) soit au niveau du volume total annuel (Cosandey et Robinson, 2000).

Le développement des réseaux de transferts interbassins pour l'importation directe de l'eau depuis l'extérieur du bassin hydrologique, ou encore la construction de canaux d'irrigation comme conduits naturels d'alimentation en eau ont des impacts non négligeables sur les débits des cours d'eau. Si le premier type d'aménagement permet de limiter les prélèvements opérés sur une ressource fragile, et, à terme, de maintenir les niveaux d'écoulement superficiel en période de manque d'eau, le deuxième a l'effet inverse et peut entraîner de lourdes conséquences sur le régime du cours d'eau. En effet, en détournant une partie du volume écoulé, ils entraînent une diminution des débits, privant ainsi les populations situées en aval de ces ouvrages d'une partie de la ressource. Le déséquilibre généré est d'autant plus marqué que l'eau est souvent restituée en quantité moindre au milieu, au travers des rejets et des pertes naturelles, loin des points depuis lesquels elle a été captée.

Par ailleurs, la ressource en eau est un bien commun, dont personne n'a la propriété. Pour cela, et en complément de l'action des aménagements réalisés afin maximiser l'accès à l'eau des différents usagers, elle fait l'objet de nombreuses études, notamment de suivis (qualitatif et quantitatif). Les sites de baignade font l'objet d'un contrôle sanitaire durant la saison estivale, certains linéaires de cours d'eau sont instrumentalisés pour mesurer les niveaux d'écoulement, etc. Un des outils réglementaires utilisés pour, au mieux anticiper, sinon limiter le niveau de sévérité de la situation hydrologique estivale est l'arrêté-cadre départemental ou l'application du décret sécheresse. Ainsi, au cours d'une année sèche, les préfets sont amenés à appliquer des arrêtés d'usages de l'eau, dont les mesures prises s'échelonnent sur trois niveaux (information, restriction, interdiction) et portent sur tous les usages (domestique, agricole, industriel) (Barbier *et al.*, 2007).

Enfin, la volonté politique en matière de préservation de la ressource se traduit aussi par les investissements faits par les collectivités pour l'amélioration de la qualité des eaux rejetées (mise aux normes des stations d'épuration, par exemple) ou pour le maintien des niveaux de débits en période sèche (*e.g.* amélioration des réseaux de distribution, débits réservés, soutien d'étiage).

Conclusion — Les bas débits, dans certains territoires, ne sont plus uniquement le résultat de processus naturels et physiques. Dans les zones anthropisées, ils sont également conditionnés par les modifications engendrées aussi bien par l'activité, les aménagements et les besoins humains que par le mode de gestion du territoire.

Par ailleurs, l'impact anthropique sur le bilan hydrologique ne se traduit pas seulement par des variations quantitatives de la ressource en eau. Les différentes sources de pollution introduites dans le milieu par le biais des rejets (agricoles, industriels et domestiques) altèrent aussi sensiblement la qualité de l'eau. En période de basses eaux, les concentrations en éléments polluants sont plus importantes, puisque le potentiel de dilution diminue avec la baisse des débits, rendant la ressource impropre à la consommation et de fait moins disponible pour satisfaire les besoins humains et environnementaux.

En conséquence, la caractérisation des basses eaux ne peut s'effectuer de manière exclusivement physique (hydrologique), mais se doit d'intégrer le contexte sociétal (pressions anthropiques) et être de fait appréhendées en termes de disponibilité en eau à la fois quantitative et qualitative pour satisfaire des usages particuliers, et, au mieux, tous les usages souhaités.

1.3 Repositionnement conceptuel des basses eaux

D'un point de vue strictement hydrologique, les basses eaux correspondent à une manifestation annuelle et relative à un seuil de débit, fixé par la valeur du module interannuel. Toutefois, en considérant les facteurs de genèse du phénomène, elles deviennent le témoin observable de l'état de la ressource en eau « consommable », quel que soit le besoin (naturel ou anthropique), sur un territoire donné et au cours de la période annuelle la plus sensible, soit lorsque les réserves en eau diminuent.

Aussi, les basses eaux peuvent faire référence à un état hydrologique moyen, défini dans un contexte à la fois climatique, géographique et physique particulier, qui traduirait le niveau d'équilibre

entre l'offre disponible (en quantité et de qualité) et la demande (environnementale et sociétale), et à partir duquel il serait alors possible de définir des états d'abondance comme de pénurie en eau.

1.3.1 Des états hydrologiques fréquents à caractériser

S'intéresser aux basses eaux reviendrait donc à concevoir le penchant hydrologique moyen d'un bassin, soit sa prédisposition ou sa capacité à produire (emmagasiner et restituer) une certaine masse d'eau, pouvant par la suite être mobilisée par l'ensemble des espèces vivantes pour assurer leurs besoins propres. Ce concept induit par conséquent la possibilité de voir apparaître (certaines années, certains mois, etc.) des situations qui peuvent être traduites aussi bien en termes d'excédent (*e.g.* crue) que de déficit (*e.g.* étiage). Cela rejoint, par analogie, la notion de climat qui constitue le penchant atmosphérique moyen, déterminé par un certain nombre de facteurs climatiques (*e.g.* la température, le vent, les précipitations), d'une région donnée, à partir duquel sont définis des événements extrêmes ou exceptionnels (*e.g.* une tempête, une sécheresse, une canicule).

En ce sens, les basses eaux correspondraient à l'état **hydrologique moyen** d'un territoire (*e.g.* régional, hydrographique, de vie) dont peut disposer l'ensemble des usagers, de la même manière que l'aridité traduit un état de déficit atmosphérique. Cela revient à faire l'hypothèse que les basses eaux peuvent être envisagées comme des états hydrologiques fréquents ou normaux (en terme statistique), qui ne pourront toutefois être révélés que par de longues chroniques de débits (soit 30, 40, 50 ans de mesures, voire davantage). Cela étant, la caractérisation de ces états moyens exige au préalable de définir un seuil d'entrée en basses eaux, qui peut être pensé selon deux positions.

La première s'appuie sur la définition hydrologique du phénomène. L'entrée en basses eaux est alors relative à une moyenne interannuelle de débit (*i.e.* le module), propre au cours d'eau considéré. Selon cette conception, il devient aisément possible de s'affranchir d'un bornage temporel fixe (*e.g.* celui de la saison) et se référer exclusivement aux valeurs de débits. Cette démarche permet ainsi de s'assurer que la période d'intérêt est intégrée dans sa totalité, que celle-ci apparaisse de manière précoce, persiste au-delà de la période sèche, ou encore se manifeste plusieurs fois au cours de la même année. Ce seuil peut se révéler pertinent pour les cours d'eau pérennes et fortement soutenus par de grands fleuves ou par d'importants aquifères. Toutefois, pour les petites rivières (*e.g.* de type cévenol) aux ressources très locales, l'atteinte de la valeur du module est susceptible de traduire une situation d'insuffisance en eau déjà bien engagée.

C'est la raison pour laquelle, il apparaît plus judicieux d'adapter ce raisonnement, et de considérer non plus les basses eaux comme un état relatif à une moyenne de débit, mais de préférer un degré de satisfaction, défini par le rapport entre l'offre disponible et la demande en eau existante. En d'autres termes, dans un but de gestion opérationnelle de la ressource, cela revient à fixer le seuil d'entrée en basses eaux en fonction des besoins moyens, aussi bien naturels qu'anthropiques.

Ce type de seuil présente l'avantage de s'adapter au contexte spatial et temporel, et d'évoluer au rythme des modifications locales des besoins en eau, ces derniers étant sensiblement variables au cours d'une même année et d'une année sur l'autre. Contrairement au module qui est une valeur fixe,

il pourra donc être amené à varier afin de s'ajuster à la période considérée, aux pressions exercées, aux usages considérés, etc.

1.3.2 Le moyen de penser les situations de « manque hydrologique »

L'intégration de la demande sociale et environnementale dans la définition d'un état moyen de basses eaux ne permet dès lors plus de faire référence à des situations extrêmes en termes de déficit ou d'excédent, qui se justifient généralement de manière statistique par l'écart à la moyenne d'une variable « naturelle » (*e.g.* les précipitations ou les débits). Dans un tel contexte, la notion de « **manque hydrologique** » est préférable, car elle semble particulièrement appropriée ici pour traduire un état qui renvoie à l'écart négatif, à un moment et en un lieu donnés, entre la ressource disponible en période de basses eaux et la demande sociétale et environnementale.

Un état de « manque hydrologique » correspond par conséquent à la combinaison de facteurs naturels et anthropiques conduisant à un niveau d'eau considéré comme insuffisant (donc susceptible de faire émerger à terme des situations de tension), relativement à son utilisation et aux attentes locales. Ainsi, il peut signifier un penchant hydrologique positif quantitativement, mais de mauvaise qualité, rendant la ressource impropre à la consommation, et de fait indisponible. Ce concept reprend ainsi les deux dimensions indissociables afférentes aux basses eaux – la qualité et la quantité de la ressource – et devient le pendant de la sécheresse dont l'importance traduit un manque d'apports en fonction des besoins naturels et anthropiques.

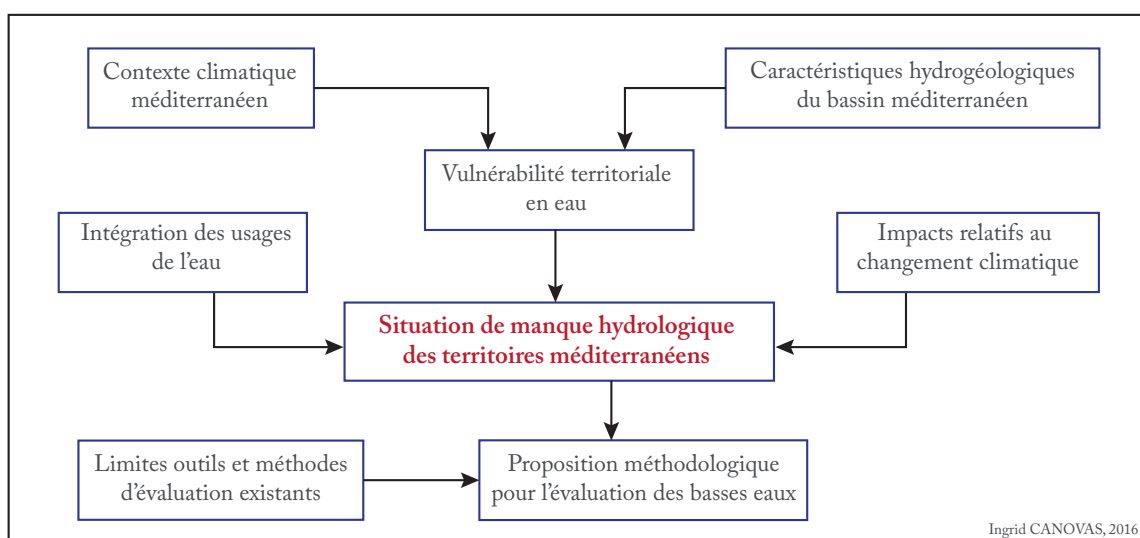
En extrapolant davantage, le penchant hydrologique d'un territoire peut être considéré comme négatif ou déficitaire, sans pour autant que la situation traduise un état de « manque hydrologique ». Cette configuration serait susceptible d'être observée, par exemple, sur des bassins sur lesquels les besoins sont très peu importants. À l'inverse, et vraisemblablement sur des bassins sur lesquels la demande et les pressions anthropiques sont très fortes et concentrées, une situation de « manque hydrologique » peut apparaître sans toutefois refléter un état de déficit en eau.

Conclusion — Il ne s'agit donc plus ici de considérer le phénomène comme purement hydrologique, mais de l'appréhender selon une démarche qui intègre à la fois les besoins environnementaux et sociétaux. Ces configurations soulignent bien la nécessité d'intégrer non seulement les facteurs naturels (*e.g.* climatiques, hydrologiques), mais aussi les forçages anthropiques.

En ce sens, la démarche à développer doit intégrer un ensemble de variables clés qui contrôlent à la fois l'état qualitatif et quantitatif de la ressource. Ces variables doivent ensuite être traitées indépendamment afin de révéler pour chacune d'elles leur état moyen, à partir duquel l'écart négatif traduira un niveau de déficit (qui sera par la suite adressé en termes de niveau de criticité (voir *infra* 3.2). Ce n'est qu'à partir de la combinaison de l'ensemble des facteurs, soit la combinaison des états individuels des variables considérées, et en intégrant les variables anthropiques, que l'état de « manque hydrologique » pourra ensuite être évalué (mesuré par l'Indice de Criticité). Il représente dès lors, dans une approche centrée sur les usages anthropiques et les besoins environnementaux, l'interprétation conceptuelle du « penchant hydrologique » d'un territoire à un moment donné, et

devrait permettre, dans un dernier temps, de rendre compte du niveau de tension sur la ressource.
(voir *infra* 3.3).

L'ÉTUDE DES BASSES EAUX OU COMMENT CARACTÉRISER LES SITUATIONS DE MANQUE HYDROLOGIQUE EN RÉGION MÉDITERRANÉENNE



2.1	L'aire méditerranéenne française à l'épreuve du changement climatique	56
2.1.1	Les spécificités climatiques	57
2.1.2	Retour sur les épisodes historiques de sécheresse	61
2.1.3	Les évolutions attendues du régime climatique et ses conséquences sur la ressource en eau	63
2.2	La vulnérabilité des territoires méditerranéens	69
2.2.1	Une disparité naturelle dans la disponibilité des ressources en eau . . .	70
2.2.2	Une inégale répartition et concentration des usages de l'eau	72
2.3	La nécessité d'une nouvelle approche pour appréhender les situations de manque d'eau	76
2.3.1	L'analyse locale : les indices et seuils hydrologiques	77
2.3.2	La caractérisation régionale : les indices et seuils de sécheresse	84
2.3.3	La démarche nationale : les indices de pénurie en eau	88
2.3.4	L'apport de l'approche multiscalaire des basses eaux	92

Sur les bases théoriques définies précédemment, il semble évident que les territoires méditerranéens français, voire européens (Margat et Vallee, 1999) sont particulièrement sujets à l'émergence de situations de manque hydrologique, notamment en été. De nombreux bassins, ne bénéficiant que de réserves locales, sont régulièrement en situation de grande vulnérabilité dès que les conditions climatiques deviennent défavorables et que les besoins en eau augmentent.

En effet, l'aire méditerranéenne est d'une part soumise à des extrêmes climatiques qui se traduisent l'été par des précipitations faibles, voire inexistantes, et des températures élevées, et génèrent des épisodes de sécheresse et de manque d'eau. D'autre part, elle concentre des bassins très hétérogènes ne bénéficiant pas tous d'une grande capacité de réserve. À cela, s'ajoute son attractivité (touristique et pérenne) toujours plus importante chaque année. Enfin, le bassin méditerranéen fait partie des zones désignées comme étant les plus susceptibles de connaître sur le moyen et long terme une intensification et une augmentation de la fréquence d'apparition des périodes sèches et par conséquent de faire face à des situations problématiques.

Pour aborder ce phénomène de raréfaction de la ressource en eau, de nombreux indices ont été élaborés. Ils sont basés sur une ou plusieurs variables clés et développés pour des échelles différentes. Toutefois, aucun ne se révèle adapté au contexte géographique de l'étude (le domaine méditerranéen), ou encore à la définition des basses eaux proposée. C'est pourquoi l'élaboration d'une nouvelle approche, dans ce contexte particulier, semble tout à fait justifiée.

2.1 L'aire méditerranéenne française à l'épreuve du changement climatique

Les modèles du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) sont relativement concordants à propos de l'avenir climatique probable des régions méditerranéennes. Tous convergent pour présager une augmentation prononcée des températures annuelles moyennes, avec des maxima qui seraient atteints en période estivale, ainsi qu'une diminution des précipitations.

Cela se traduirait alors par une intensification des épisodes de sécheresse, majoritairement en été et en automne. Le réchauffement et l'assèchement du climat, qui concernerait plus globalement l'ensemble de l'Europe méditerranéenne, pourraient ainsi impacter l'environnement et les populations de manière plus accusée qu'ailleurs (Garnier, 2009). Ces impacts concerneront, entre autres, la ressource en eau et amplifieront les pressions existantes sur l'environnement, en lien avec les activités humaines.

La Méditerranée figure par conséquent parmi les « hot-spot » mondiaux du changement climatique (Plan Bleu, 2008). Ce postulat s'explique notamment par l'exposition naturelle du bassin méditerranéen à des forçages climatiques marqués dans les extrêmes, dont les effets se trouvent fréquemment amplifiés en raison du contexte physique et sociétal de ces territoires, contribuant ainsi à l'accroissement de leur vulnérabilité.

2.1.1 Les spécificités climatiques

Les singularités du domaine méditerranéen sont bien connues. La définition en est essentiellement climatique, avec ses quatre saisons contrastées : un été sec et chaud, marqué par une faible pluviométrie, un hiver doux durant lequel la moyenne mensuelle des températures n'est jamais inférieure à 0°C, un printemps et un automne qui concentrent l'essentiel des précipitations, généralement sous forme d'orages. À cela s'ajoutent un ensoleillement annuel très important et des vents violents fréquents.

Outre ces éléments de description relativement élémentaires, l'aire méditerranéenne est également marquée par un fort gradient des paramètres météorologiques, qui s'observe aussi bien à petite échelle qu'à grande échelle (Bolle, 2003 ; Joly *et al.*, 2010). Les variabilités locales sont principalement caractérisées par des dynamiques internes, elles-mêmes déterminées par des gradients entre la mer et l'intérieur des terres, et cela jusqu'aux reliefs. Cet état de fait peut être illustré par un premier aperçu simple des valeurs moyennes de température et de précipitations enregistrées au poste de Marseille (en bordure littorale), de Nîmes (à la limite plaine-garrigues) et sur le Mont Aigoual (crête des Cévennes). Les FIGURES 2.1, 2.2 et 2.4 montrent clairement l'effet du relief sur ces deux paramètres.

De surcroît, la variabilité existante dans la structure des facteurs climatiques entre la bordure nord et sud du bassin méditerranéen ne se limite pas à l'échelle annuelle. Elle s'observe également à l'échelle inter et intra-annuelle, ce qui constitue par ailleurs une difficulté supplémentaire pour la gestion de la ressource en eau.

2.1.1.1 Variabilité des températures moyennes

La température moyenne annuelle dans le bassin méditerranéen français est comprise entre 10°C (sur les reliefs), et 14°C (sur le littoral). Comme l'indiquent les FIGURES 2.1 et 2.2, les températures moyennes maximales et minimales mensuelles diminuent avec l'éloignement à la mer, excepté pour les températures moyennes maximales printanières et estivales pour lesquelles les valeurs les plus élevées sont enregistrées à Nîmes (soit dans la plaine).

2. L'ÉTUDE DES BASSES EAUX OU COMMENT CARACTÉRISER LES SITUATIONS DE MANQUE HYDROLOGIQUE EN RÉGION MÉDITERRANÉENNE

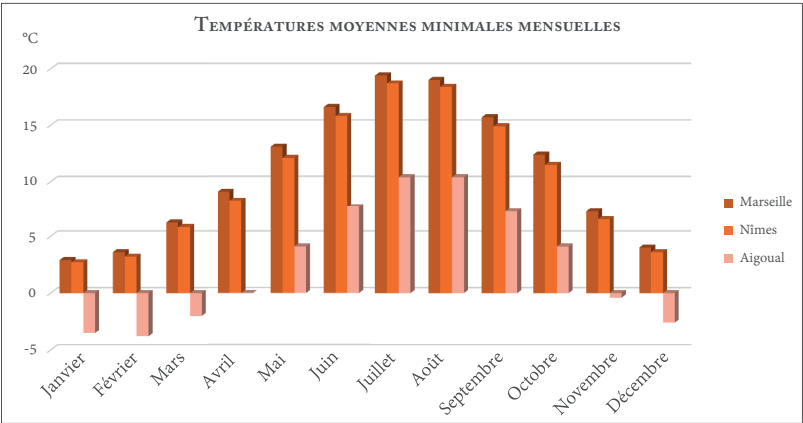


FIGURE 2.1 : RÉPARTITION DES TEMPÉRATURES MINIMALES MOYENNES MENSUELLES (MODIFIÉ D'APRÈS MÉTÉO FRANCE, 2015)

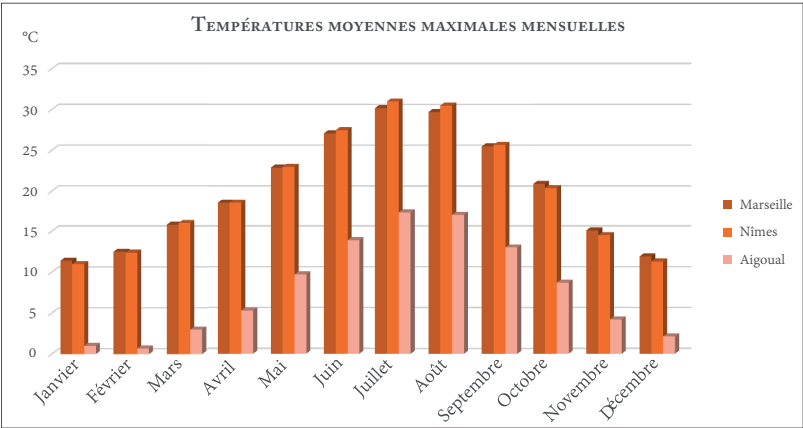


FIGURE 2.2 : RÉPARTITION DES TEMPÉRATURES MAXIMALES MOYENNES MENSUELLES (MODIFIÉ D'APRÈS MÉTÉO FRANCE, 2015)

	Température moyenne saisonnière en °C (normale 1981 - 2010)			
	Hiver	Printemps	Eté	Automne
Mer	10	14	24	16
Relief	4	8	18	10

FIGURE 2.3 : TEMPÉRATURES MOYENNES SAISONNIÈRES ENTRE LA MER MÉDITERRANÉE ET LES CÉVENNES (MODIFIÉ D'APRÈS MÉTÉO FRANCE, 2015)

En revanche, sur le plan saisonnier, c'est indiscutablement l'été qui enregistre les températures les plus fortes (FIGURE 2.3), borné par des saisons extrêmement douces, notamment sur la bande littorale.

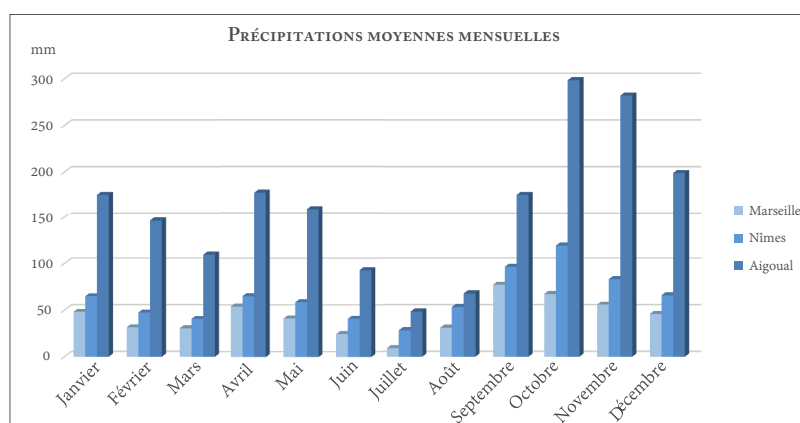


FIGURE 2.4 : RÉPARTITION DES PRÉCIPITATIONS MOYENNES MENSUELLES (MODIFIÉ D'APRÈS MÉTÉO FRANCE, 2015)

	Précipitations cumulées par saison en mm (normale 1981 - 2010)			
	Hiver	Printemps	Eté	Automne
Mer	125	100	25	175
Relief	600	500	150	800

FIGURE 2.5 : CUMUL DES PRÉCIPITATIONS SAISONNIÈRES ENTRE LA MER MÉDITERRANÉE ET LES CÉVENNES (MODIFIÉ D'APRÈS MÉTÉO FRANCE, 2015)

2.1.1.2 Variabilité des précipitations moyennes

La variation très marquée du régime des précipitations suit une tendance inverse à celle observée pour les températures (FIGURE 2.4).

En effet, si la température diminue progressivement avec l'éloignement à la mer, la hauteur des précipitations moyennes et saisonnières, quant à elle, augmente de manière significative, avec des maxima atteints sur le relief (FIGURE 2.5).

Globalement, les hauteurs précipitées chaque année sont relativement importantes. Par contre, les apports pluviométriques sont, en grande partie, concentrés dans le temps. En effet, les événements pluvieux se manifestent majoritairement sous forme d'orages, dont les plus violents se déclarent en automne. Il peut alors tomber plusieurs dizaines ou centaines de millimètres d'eau respectivement en 24h ou 48h. Ces épisodes pluvieux extrêmes et violents, dits « cévenols », donnent lieu aux nombreuses crues « éclair » et inondations exceptionnelles qui caractérisent la région.

De fait, le nombre annuel de jours de pluie est le plus faible du territoire métropolitain et varie de 40 jours sur le littoral méditerranéen à 80 voire 100 jours au niveau des reliefs. Les pluies, dans cette région, sont donc moins fréquentes, mais plus intenses.

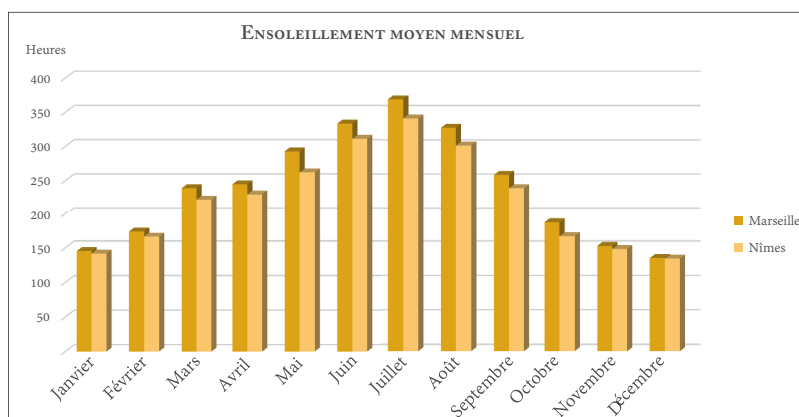


FIGURE 2.6 : ENSOLEILLEMENT MOYEN MENSUEL MESURÉ SUR DEUX STATIONS MER ET INTÉRIEUR DES TERRES (D'APRÈS MÉTÉO FRANCE, 2015)

2.1.1.3 L'insolation moyenne

L'ensoleillement, très important sur l'ensemble du bassin méditerranéen, présente une plus grande homogénéité que les autres variables climatiques, notamment depuis la bordure littorale jusque dans la plaine et les collines sèches (FIGURE 2.6). Le contraste est légèrement plus marqué entre la façade maritime et le relief, avec en moyenne 2 900 heures annuelles pour Marseille contre 2 200 pour la bordure cévenole.

Sur les reliefs, c'est majoritairement l'orientation du versant qui en détermine la nuance, la face sud bénéficiant, en principe, d'une meilleure exposition à l'ensoleillement que la face nord.

2.1.1.4 Le vent

Le Mistral, la Tramontane et le Marin sont des vents « régionaux » actifs sur le bassin méditerranéen. Ils se distinguent du vent de grande échelle, notamment en raison de leur forte dépendance de la situation météorologique et de certains facteurs topographiques.

Le Mistral et la Tramontane sont des vents secs, parfois violents. Le premier, de secteur nord, parcourt la basse vallée du Rhône et la Provence et envahit le littoral méditerranéen à partir de la Camargue. Le second, de secteur ouest, survole les contreforts des Pyrénées et les monts du sud du Massif Central. Tous deux possèdent des caractéristiques similaires : avec plus de force en hiver et au printemps, ils soufflent en moyenne à 50 km/h (avec des rafales pouvant dépasser 100 km/h), et peuvent se manifester durant plusieurs jours, voire une semaine. Ainsi, en période sèche, leur présence et leur déploiement, essentiellement localisé sur les zones côtières et dans les plaines (par ailleurs déjà soumises à des températures élevées) peut contribuer à l'apparition ou à l'amplification d'un épisode de sécheresse.

Le Marin, quant à lui, est un vent de secteur sud-est qui souffle sur toute la zone littorale méditerranéenne. Il est généralement fort et régulier, parfois violent et turbulent sur le relief. Généralement doux et chargé d'humidité (lié à son passage au-dessus de la Méditerranée), il amène le

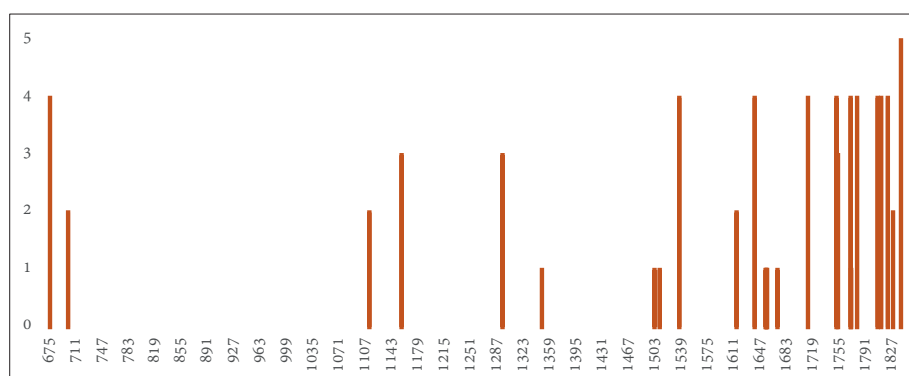


FIGURE 2.7 : LES ÉPISODES DE SÉCHERESSES RECENSÉS DANS LE MIDI ENTRE 675 ET 1840 (MODIFIÉ D'APRÈS FUSTER, 1845). LEUR DEGRÉ DE SÉVÉRITÉ, DÉFINI QUALITATIVEMENT, EST TRADUIT PAR UN NIVEAU COMPRIS ENTRE 1 ET 5, DE SORTE QUE : 1 – SÉCHERESSE ; 2 – GRANDE SÉCHERESSE ; 3 – TRÈS FORTE SÉCHERESSE ; 4 – SÉCHERESSE EXCEPTIONNELLE ET 5 – SÉCHERESSE EXTRÊME.

plus souvent des nuages bas et des précipitations abondantes sur les hauteurs qui bordent la mer, au printemps et en automne. Contrairement au Mistral et à la Tramontane, il ne contribue donc pas à l'intensification des conditions pouvant générer des épisodes de sécheresse.

2.1.2 Retour sur les épisodes historiques de sécheresse

Sur ces éléments, il ne fait aucun doute qu'à l'action seule, mais surtout combinée, des facteurs climatiques méditerranéens, qui peut être pour le moins extrême, résultent des épisodes fréquents de sécheresse. Ces situations ne sont donc pas récentes, et, contrairement aux perceptions actuelles portées sur le phénomène, les événements connus ces dernières décennies en région méditerranéenne ne comptent vraisemblablement pas parmi les plus sévères. Cela dit, il paraît difficile de comparer des épisodes aussi extrêmes et exceptionnels, notamment lorsque l'on intègre la dimension anthropique, l'intensité étant en grande partie déterminée par les attentes sociales et les impacts sur les activités humaines. En effet, un épisode de sécheresse qui se manifesterait aujourd'hui avec une intensité et une durée similaires à celles observées lors d'un épisode historique engendrerait des impacts considérablement différents, en lien avec les changements des caractéristiques sociétales (Wilhite *et al.*, 2007).

Si la sécheresse est un phénomène relativement fréquent sur le bassin méditerranéen, elle n'a pourtant été prise en compte que très tardivement. Cela se traduit concrètement par une rareté de l'information renseignant des situations extrêmes connues avant 1550, comme en témoigne le FIGURE 2.7.

Cet état de fait est par ailleurs souligné par Garnier (2009), qui, dans son travail de recueil historique des sécheresses, fait état de 148 épisodes de sécheresse en Languedoc-Roussillon entre 1550 et 2005, dont 58 % se produisent après 1800, avec un maximum atteint au XX^e siècle (FIGURE 2.8).

Toutefois, comme le souligne l'auteur, il ne faut pas pour autant en conclure à la hâte à une aggravation du siècle dernier. En effet, sur les 500 ans considérés, ce sont indiscutablement les XVII^e et XVIII^e siècles qui se révèlent être les plus sévères en termes de jours de sécheresse (FIGURE 2.9).

2. L'ÉTUDE DES BASSES EAUX OU COMMENT CARACTÉRISER LES SITUATIONS DE MANQUE HYDROLOGIQUE EN RÉGION MÉDITERRANÉENNE

Siècle	Nombre de sécheresses	Fréquence	Années extrêmes (jours sans pluie)
XVI ^{ème}	9	11 ans	- 1566 (330 jours) - 1567 (365 jours)
XVII ^{ème}	20	5 ans	- 1614 et 1651 (> 365 jours) - 1632 (300 jours)
XVIII ^{ème}	33	3 ans	- 1770 (> 260 jours) - 1785 (> 340 jours)
XIX ^{ème}	40	2 ans ^{1/2}	- 1821 (> 270 jours) - 1837 (250 jours)
XX ^{ème}	43	3 ans	- 1945 et 1988 (> 200 jours)
XXI ^{ème}	3		- 2005 (> 230 jours)

FIGURE 2.8 : NOMBRE, FRÉQUENCE ET ANNÉES EXTRÊMES DES SÉCHERESSES EN LANGUEDOC ROUSSILLON 1500-2009 (MODIFIÉ D'APRÈS GARNIER, 2009)

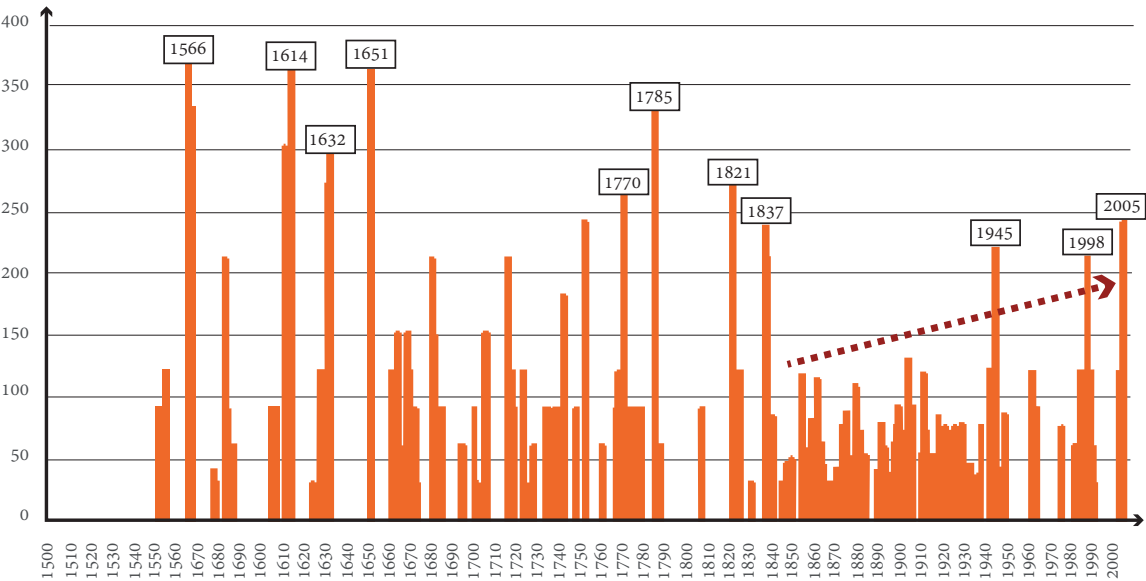


FIGURE 2.9 : LES SÉCHERESSES EN LANGUEDOC ROUSSILLON 1500-2009 (MODIFIÉ D'APRÈS GARNIER, 2009)

Bien que les épisodes les plus anciens aient été identifiés par appréciation, à défaut de mesures instrumentales utilisées de nos jours, ils ont toutefois été évalués en fonction de leurs impacts directs sur les usages. Il n'y a donc aucune raison de sous-estimer la gravité des épisodes relevés en ces termes, leur prise en compte dans une analyse historique étant au contraire tout à fait pertinente et légitime.

Par ailleurs, sur l'ensemble des événements recensés, Garnier (2009) estime leur origine édaphique dans plus de 86 % des cas. Causés par un déficit hydrique de printemps et d'été, ces épisodes de sécheresse ont alors engendré des conséquences majeures sur l'agriculture. À l'inverse, l'auteur

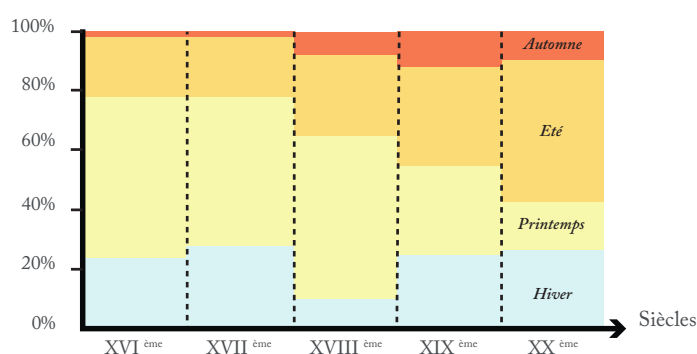


FIGURE 2.10 : ORIGINE SAISONNIÈRE DES SÉCHERESSES EN LANGUEDOC ROUSSILLON 1500-2009 (MODIFIÉ D'APRÈS GARNIER, 2009)

fait état de sécheresses hydrologiques bien plus rares, probablement induites par des déficits en précipitations en automne et hiver.

Enfin, cette même étude a mis en évidence un fléchissement saisonnier des sécheresses historiques (FIGURE 2.10). En effet, jusqu'au XVII^e siècle, 50 % des origines saisonnières se révèlent printanières. Au cours du XIX^e siècle, les mois printaniers ne représentent plus que 30 % du total, pour finalement se réduire à un pourcentage inférieur à 20 % au XX^e siècle. De nos jours, l'auteur estime que l'émergence des situations de sécheresse serait plutôt imputable à une rigueur estivale (40 %) et hivernale (30 %). Ainsi, il semblerait que les épisodes secs méditerranéens compris entre 1 900 et 2 000 accusent un glissement vers les mois estivaux, sans doute attribuables à des déficits pluviométriques printaniers.

2.1.3 Les évolutions attendues du régime climatique et ses conséquences sur la ressource en eau

Dans ses grandes lignes, l'analyse historique des sécheresses en Languedoc Roussillon a révélé une série de modifications au cours des cinq derniers siècles en termes d'effectifs et de sévérité, ainsi que sur leur origine saisonnière. Le constat, plutôt alarmant, puisqu'il suggère que les épisodes connus récemment ne sont pas les plus sévères et qu'il est probable que le cycle actuel tende vers une augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses, est toutefois à considérer avec précaution. En effet, une plus grande profondeur historique de l'information et une connaissance plus exhaustive des épisodes passés pourraient amener à en nuancer les conclusions. Néanmoins, les caractéristiques et les tendances soulignées ont déjà le mérite d'apporter un premier éclairage sur la dynamique temporelle du phénomène, et permettent ainsi de relativiser les situations récentes en les replaçant dans une perspective historique, bien plus longue que celle de quelques décennies.

La question qui se pose aujourd'hui, et qui préoccupe de plus en plus d'acteurs, de gestionnaires et d'usagers de la ressource en eau, est celle de l'évolution attendue de ces phénomènes. En d'autres termes, faut-il se préparer à affronter des épisodes plus intenses, plus fréquemment ? Le cas échéant, quels seront les impacts (aussi bien locaux que régionaux) sur la ressource en eau, sur l'environnement et sur l'économie ?

Des spécialistes ont regroupé leurs compétences au sein du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC, 2007, 2013 ; IPCC, 2014) et s'efforcent de répondre à ces interrogations depuis près de trente ans. Les résultats les plus récents, concernant la France et plus particulièrement le bassin méditerranéen, issus des simulations menées à partir de modèles toujours plus performants, sont synthétisés ci-dessous, et complétés par des projections réalisées au travers d'études régionalisées.

2.1.3.1 Les modifications supposées des forçages climatiques

L'ensemble des modèles (globaux, européens et régionaux), largement développés au cours de la dernière décennie, s'accorde sur une hausse généralisée des températures, à l'échelle nationale à toutes les saisons. Les précipitations estivales, quant à elles, diminueraient, le signal étant moins clair pour les autres saisons. Par ailleurs, les événements de sécheresses seraient plus fréquents, plus longs et/ou plus intenses. En revanche, les résultats portant sur les tendances pour les épisodes de pluviométrie extrêmes ne sont pas unanimes, bien que certains modèles suggèrent un accroissement de leur fréquence et de leur intensité en automne et en hiver.

Les températures — Malgré la diminution de la fréquence et de l'extension des feux de forêt observées ces dernières décennies, les projections révèlent avec un degré de confiance élevé une hausse des températures, particulièrement en région méditerranéenne, qui sera plus sèche et plus chaude qu'actuellement durant la saison estivale.

En effet, selon les scénarios³ de changement climatique, les températures moyennes annuelles pourraient augmenter :

- à l'horizon 2030, entre +1°C et +2°C (Chaouche *et al.*, 2010)
- à l'horizon 2050, entre +1,5°C et +3,5°C selon Chaouche *et al.* (2010), et entre +2°C et +3°C selon le GIEC (2007)
- à l'horizon 2080, entre 3°C et 5°C d'après Somot *et al.*, (2008), et entre 3,3°C et 4,4°C d'après Lespinas (2008)
- à l'horizon 2100, entre 3°C et 5°C (GIEC, 2007).

Les hausses seraient plus marquées en été, de +2°C à +4°C en août à l'horizon 2050 (Quintana Seguí, 2008) et +6°C à 7°C en août à l'horizon 2080 (Lespinas, 2008).

Par ailleurs, d'après Boé (2007), l'évaporation réelle augmenterait durant toutes les saisons, sauf en été où elle diminuerait, en raison d'une baisse du taux d'humidité des sols, qui concernerait la France entière à l'horizon 2050, essentiellement en automne (à l'exception des Alpes). Ce constat est confirmé par l'étude de Chaouche *et al.* (2010) dont les résultats prédisent, aux horizons 2020 et 2050, une augmentation moyenne annuelle de l'évapotranspiration respectivement de 7 % et de 10 %.

3. Voir le site Internet de l'Agence de l'Eau RMC (www.eaurmc.fr) pour la liste et les critères pris en compte dans les scénarios et les modèles.

Les précipitations — À l'inverse de la température, une diminution des précipitations a été observée entre 1900 et 2005, une tendance qui, selon les projections, devrait s'amplifier de manière significative notamment en été.

D'après le travail de synthèse sur les projections climatiques en région méditerranéenne de l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée (2012), il semblerait que les modèles climatiques se révèlent moins cohérents pour les tendances de précipitations, notamment dans les études de régionalisation. Toutefois, il en ressort que globalement, à l'horizon 2080, la tendance se manifesterait par une baisse généralisée des précipitations. À l'horizon 2050, les différents modèles convergent plutôt vers une baisse des précipitations moyennes annuelles. À l'échelle interannuelle, Lespinas (2008) rend compte d'une nette diminution des précipitations pendant les mois de mai à août, cette baisse pouvant atteindre, au mois de juillet, 20 % pour les modèles les plus optimistes, et jusqu'à 60 à 80 % pour les modèles les plus pessimistes.

Les extrêmes secs — Le rapport du GIEC (2012) sur les événements extrêmes, estime avec un degré de confiance élevé que la fréquence et l'intensité des températures extrêmes chaudes (aussi bien diurnes que nocturnes) augmenteront tandis que celles des températures froides se réduiront. Les valeurs extrêmes chaudes, actuellement de période de retour de 20 ans, pourraient d'ici 2050 avoir une période de retour de 2 à 10 ans et de 1 à 7 ans aux horizons 2080 et 2100.

À cela s'ajoute l'accroissement de la fréquence des vagues de chaleur, qui par ailleurs se manifesteraient de manière plus intense et/ou prolongée (GIEC, 2004). En été, le nombre de jours caniculaires devrait fortement augmenter, avec une multiplication par dix du nombre de jours de canicule à l'horizon 2080 (Déqué, 2007).

Enfin, le GIEC (2014) prévoit, avec un degré de confiance moyen, une augmentation des durées et de l'intensité des sécheresses, qui pourraient s'avérer 1,5 fois plus longues s'agissant de sécheresses estivales (Déqué, 2007).

2.1.3.2 Les répercussions potentielles sur la nature et la société

Au regard des résultats présentés, le bassin méditerranéen, déjà très vulnérable, devrait inéluctablement souffrir d'une baisse des ressources imputables aux changements climatiques. Les modèles du GIEC (2014) estiment avec un degré élevé de confiance que d'ici la moitié du siècle, le débit annuel moyen des cours d'eau et la disponibilité des ressources en eau diminueront. Par ailleurs, les zones touchées par la sécheresse devraient s'étendre, ce qui devrait se répercuter de manière négative sur de nombreux secteurs, tels que l'agriculture et le tourisme, pour ne citer que quelques exemples.

Hydrologie — Outre le Rhône, qui accuserait une diminution rapide de ses débits jusqu'aux années 2050, de 15 à 30 % en moyenne et de 30 à 40 % en été selon Milano (2010) et entre 25 et 50 % d'après Boé (2007), les cours d'eau côtiers méditerranéens et du sud-ouest du bassin du Rhône devraient compter parmi les plus touchés. En effet, Milano et *al.*, (2011) ont montré que les écoulements

2. L'ÉTUDE DES BASSES EAUX OU COMMENT CARACTÉRISER LES SITUATIONS DE MANQUE HYDROLOGIQUE EN RÉGION MÉDITERRANÉENNE

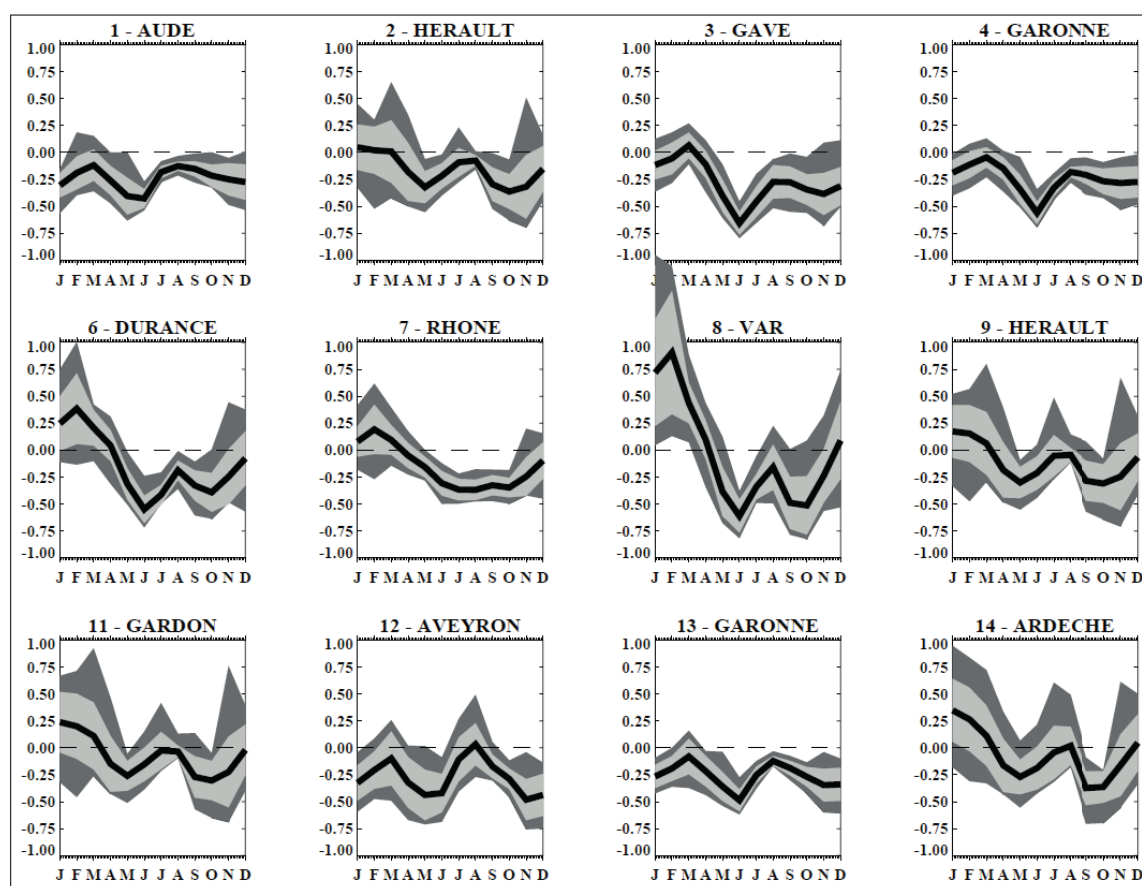


FIGURE 2.11 : LES CHANGEMENTS MENSUELS DES DÉBITS ENTRE LES PÉRIODES 2046-2065 ET 1970-1999 (Boé, 2007)

moyens annuels pourraient diminuer dans ces bassins de 10 à 30 % à l'horizon 2025 et de 30 à 50 % à l'horizon 2050.

D'autres études antérieures ont tenté de modéliser les évolutions possibles sous changement climatique des ressources en eau des bassins versants méditerranéens, dans des horizons différents. Le modèle de Boé (2007), sur l'horizon 2046-2065, et confronté à la période de référence 1970-1999, a rendu compte de fortes incertitudes quant à l'évolution des débits des cours d'eau méditerranéens, exception faite sur l'Aude (FIGURE 2.11).

Lespinas (2008), quant à lui, a modélisé les évolutions possibles sous changement climatique des ressources en eau des bassins versants méditerranéens du Languedoc-Roussillon, à l'horizon 2080 (par rapport à la période 1961). Les résultats obtenus présentent une forte dispersion, selon le scénario climatique choisi (FIGURE 2.12). Néanmoins, l'ensemble des scénarios simule une baisse du débit annuel et la quasi-totalité simule une forte diminution des débits estivaux ainsi qu'une baisse importante des débits de printemps et d'automne. Cela se traduirait par conséquent par des étiages plus longs et plus sévères.

Concernant la recharge souterraine, elle baisserait également sur tout le bassin Rhône-Méditerranée, excepté dans certaines zones au sud de la vallée du Rhône où les différents modèles donnent des évolutions de signe contraire (Boé *et al.*, 2009).

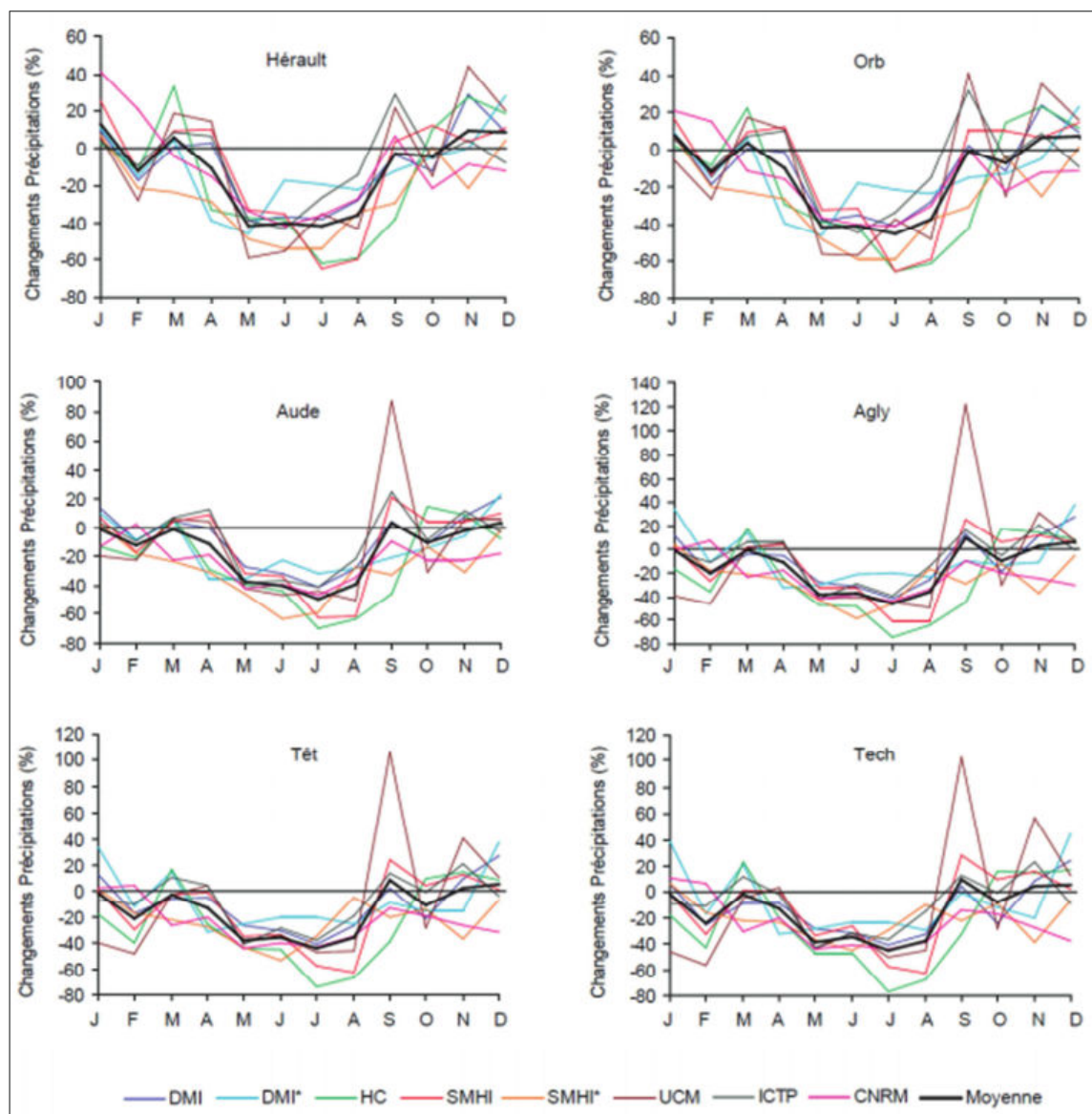


FIGURE 2.12 : ÉVOLUTION DES PRÉCIPITATIONS MENSUELLES (EN %) DANS LES BASSINS CÔTIERS DU LANGUEDOC-ROUSSILLON ENTRE 1961-1990 ET 2071-2100 SOUS LE SCÉNARIO SRES A2 AVEC 8 MODÈLES CLIMATIQUES (LESPINAS, 2008)

Agriculture — À l'échelle régionale, une forte augmentation de la demande en eau d'irrigation consécutive au changement climatique est à prévoir. Or, la réduction significative de la teneur en eau des sols, et la diminution des écoulements de surface et souterrain auront un impact significatif sur l'irrigation, ce qui devrait faire émerger des situations de tension sur la ressource.

Dans leur étude sur l'évolution des sécheresses agricoles en France, Soubeyroux et *al.*, (2011), ont montré peu de changements à l'horizon 2020, une aggravation de la situation demeure jusqu'alors incertaine. En revanche, à partir des années 2050, des sécheresses agricoles inhabituelles, de par leur expansion géographique et leur intensité, pourraient apparaître. Cette tendance se renforcerait à l'horizon 2080, où de longues sécheresses agricoles se manifesteraient probablement sur la quasi-totalité du pays, sans retour à la normale actuelle. Au-delà du caractère non linéaire, en raison d'une accentuation supposée rapide des sécheresses au cours de la seconde moitié du siècle, les auteurs ont également révélé une augmentation de la variabilité interannuelle, qui serait davantage marquée dans les régions ayant actuellement des sols humides (*i.e.* en montagne). Enfin, d'après cette étude, les sécheresses agricoles seraient susceptibles d'évoluer plus rapidement que les sécheresses atmosphériques.

Tourisme — L'impact du changement climatique sur le tourisme a été abordé par l'Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (ORNEC, 2009), au travers d'un indice climatotouristique (ICT), comprenant six variables climatiques mensuelles, et d'une enquête sur les préférences climatiques des touristes français et leur perception du changement climatique. Pour chaque département, l'attractivité climatique moyenne des mois de juillet et d'août sur la période de référence 1980-2000 a été en premier lieu définie, avant de conduire une analyse de l'évolution des données climatiques à l'horizon 2100. Les résultats obtenus indiquent une évolution à la baisse de l'attractivité climatique estivale sur l'ensemble du territoire, au sud et à l'est de la France principalement (FIGURE 2.13). En revanche, aux intersaisons et notamment aux mois de mai et juin, l'attractivité climatique en 2100 égalerait l'attractivité climatique estivale actuelle.

Selon le rapport, la traduction de cette évolution en termes de fréquentation touristique n'est pas immédiate, et les dégradations devraient s'amorcer qu'à partir des années 2030-2050. En effet, si le climat tient une place importante dans les choix de destinations, la sensibilité aux fortes chaleurs, et la perception même de ce qu'est une chaleur excessive diffèrent selon la période du départ, le mode d'hébergement, l'environnement du séjour. Ainsi, selon le résultat des enquêtes, la sécheresse et la chaleur suscitent actuellement peu d'appréhension. Ce sont en revanche les temps froids et pluvieux qui ont une influence notable sur les séjours touristiques.

Conclusion — D'après les modélisations disponibles, le climat n'est définitivement plus stationnaire, et évolue vers des changements qui se poursuivent à très long terme. Les changements climatiques à venir devraient être plus rapides que toutes les évolutions passées étudiées. Sur l'arc méditerranéen, cela se traduira par une augmentation des températures, notamment estivales, et une diminution des précipitations. Des épisodes de chaleurs voire de sécheresse seront alors susceptibles

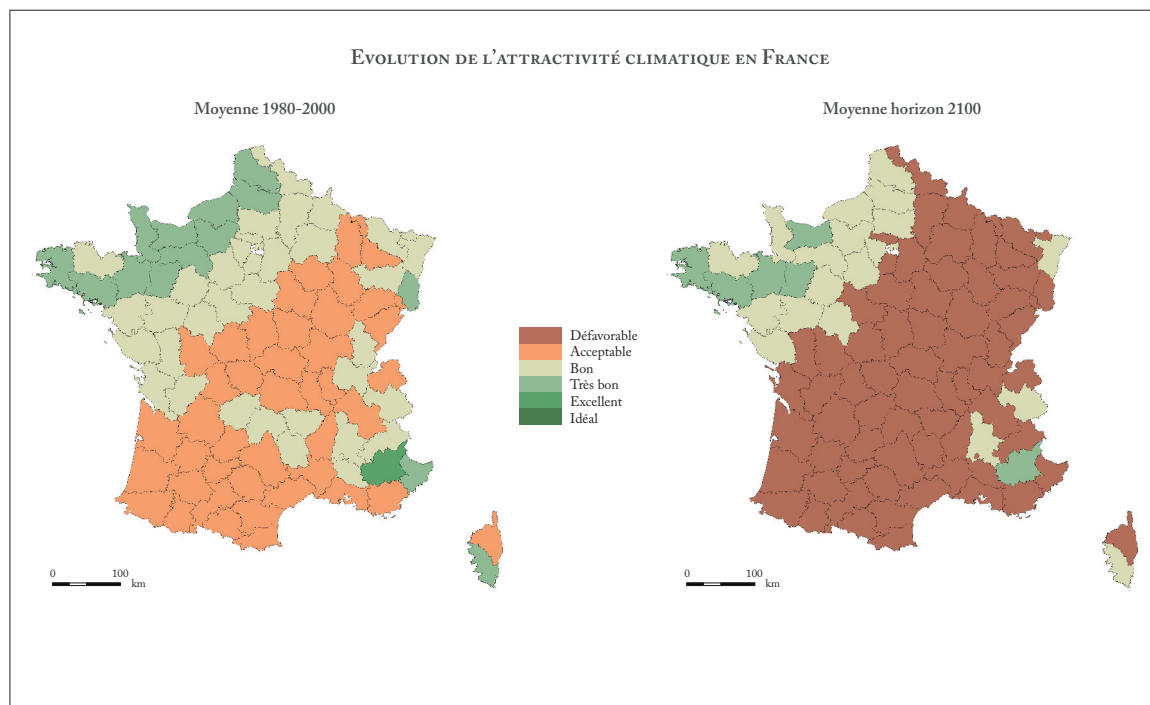


FIGURE 2.13 : ÉVOLUTION POTENTIELLE DE L'INDICE CLIMATO-TOURISTIQUE (ICT) DES DÉPARTEMENTS FRANÇAIS À L'HORIZON 2100 (MODIFIÉ D'APRÈS ORNEC, 2009)

d'apparaître et de se manifester sur des durées plus prolongées. Cela se traduira physiquement par une diminution des réserves en eau aussi bien des sols, que des cours d'eau et des réserves souterraines. Par conséquent, des difficultés d'approvisionnement en eau pourraient apparaître pour la demande domestique et notamment pour l'irrigation, ces dernières étant plus importantes en période estivale. L'impact sur l'agriculture devrait se traduire directement par une baisse du rendement, et de manière indirecte sur le tourisme, du moins sur le moyen terme, mais devrait néanmoins finir par se traduire par une diminution de la fréquentation des stations balnéaires et des sites de baignade en été.

Toutefois, ces impacts devraient être plus graduels et variables selon les territoires, selon leur degré de vulnérabilité, ce dernier étant étroitement lié à leurs caractéristiques naturelles, qui conditionnent leur capacité de réserve en eau, et au contexte sociétal, qui détermine le niveau de pression exercée sur la ressource.

2.2 La vulnérabilité des territoires méditerranéens

Si le climat est la principale caractéristique du domaine méditerranéen, l'impact sur la ressource en eau qu'il génère, lors de ces manifestations les plus extrêmes, rend compte d'une spécificité territoriale supplémentaire, celle de l'inégale répartition de ses réserves en eau. Deux facteurs peuvent justifier ce constat. Le premier, d'ordre physiographique, est attribuable aux différentes formations géologiques des sous-sols, qui définissent en partie la morphologie et l'occupation du sol des territoires, et déterminent les capacités de réserve en eau et donc la ressource disponible ou mobilisable. Le second est anthropique et relatif à la répartition, la concentration et le type d'activités humaines

qui témoignent, par ailleurs, de l'existence d'un certain déterminisme hydrogéomorphologique dans la localisation de l'établissement humain.

L'ensemble de ces éléments rend de fait chaque localité particulière, définie par un niveau de vulnérabilité propre, et introduit par conséquent des problématiques différentes (mais d'égale importance) en lien avec l'usage de l'eau. Afin d'appréhender au mieux les enjeux liés à la ressource en eau, au-delà du contexte climatique, il semble indispensable d'identifier les profils d'usage qui dominent sur les différents territoires méditerranéens.

2.2.1 Une disparité naturelle dans la disponibilité des ressources en eau

Le bassin méditerranéen français est morphologiquement hétérogène. Il en résulte un déséquilibre naturel en termes de stocks disponibles dans les réservoirs souterrains, en lien avec la nature des entités hydrogéologiques (FIGURE 2.14), qui peuvent être résumées en cinq grandes catégories (de Marsily, 1981).

2.2.1.1 Les formations alluviales le long des fleuves et des grandes rivières

La plus grande partie des ressources souterraines en eau se concentrent généralement dans les alluvions des cours d'eau. En effet, ces dernières renferment des nappes à faible profondeur, souvent connectées aux cours d'eau concernés. Elles sont communément appelées nappes d'accompagnement. Paradoxalement, leur fort potentiel de réserve rend ces aquifères très vulnérables, aussi bien en termes de quantité que de qualité, en raison des pressions importantes qu'ils subissent pour la satisfaction des activités humaines. Parmi ces formations, on peut citer à titre d'exemple, la puissante nappe alluviale du Rhône.

2.2.1.2 Les bassins sédimentaires dans les plaines et sur le littoral

Les formations sédimentaires calcaires et détritiques (*i.e.* les sables et les grès) des dépressions tertiaires peuvent elles aussi renfermer des nappes (libres et/ou captives) étendues, aux ressources souvent importantes, mais leurs véritables capacités sont encore méconnues. Elles concernent entre autres les formations tertiaires du bassin de Carcassonne en Languedoc-Roussillon et les sables et molasses du Miocène du Comtat en Provence Alpes Côte d'Azur.

2.2.1.3 Les régions de plateaux calcaires, entre littoral et montagne

Les plateaux calcaires sont généralement du domaine du karst. Le karst présente un paysage singulier (*e.g.* les gouffres, les avens) qui résulte de processus particuliers d'érosion des formations carbonatées. Les fractures et les vides créés permettent à l'eau de s'infiltrer jusqu'à atteindre la couche perméable profonde (FIGURE 2.15). Dans cette partie souterraine, les écoulements qui y circulent et s'y accumulent ont formé avec le temps un réseau souterrain (galeries) parfois extrêmement complexe (système de drainage par chevelu de rivières souterraines), ce qui rend parfois très ardue la

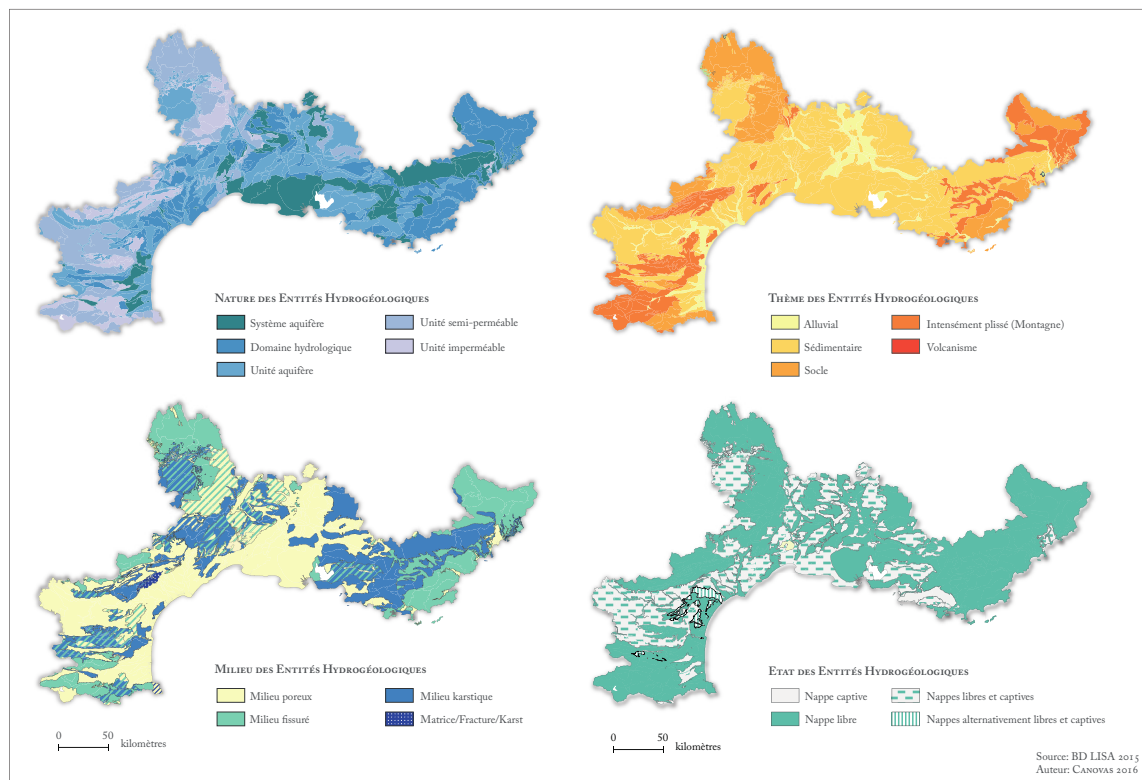


FIGURE 2.14 : LES CARACTÉRISTIQUES DES DIFFÉRENTES ENTITÉS HYDROGÉOLOGIQUES PRÉSENTES SUR LE BASSIN MÉDITERRANÉEN (SOURCE : BD LISA, 2015)

compréhension de son fonctionnement. Les eaux de surface communiquent avec les eaux souterraines par de nombreux systèmes de pertes et de résurgences. Grâce à leur réseau de fissures, plus ou moins élargies, les formations karstiques peuvent donc abriter des nappes ou des rivières souterraines dont les sources sont généralement captées pour l'alimentation en eau potable. C'est le cas notamment de la Fontaine de Vaucluse en Provence-Alpe-Côte-d'Azur et de la Source du Lez en Languedoc-Roussillon.

Le karst dans le bassin méditerranéen est très bien représenté (FIGURE 2.14). Cette formation, typique des plateaux et des Causses, est répartie de manière assez homogène sur l'ensemble du pourtour méditerranéen, et s'étend de manière discontinue et fragmentée depuis la bordure littorale (*e.g.* le massif des Calanques), les collines sèches et les contreforts (*e.g.* le plateau des Garrigues et le plateau du Vaucluse) et jusqu'aux reliefs (*e.g.* les plateaux Languedociens et la Montagne Noire).

2.2.1.4 Les formations de socle des massifs anciens et les régions montagneuses de terrains sédimentaires plissés

Les formations de socle sont principalement constituées de roches cristallines métamorphiques ou schisteuses très peu perméables, entourées de terrains sédimentaires (*i.e.* les grès, les calcaires et les marnes). Elles sont principalement localisées en bordure nord du bassin méditerranéen (*e.g.* Les Cévennes, la Montagne Noire, le Lodévois, le Massif des Maures).

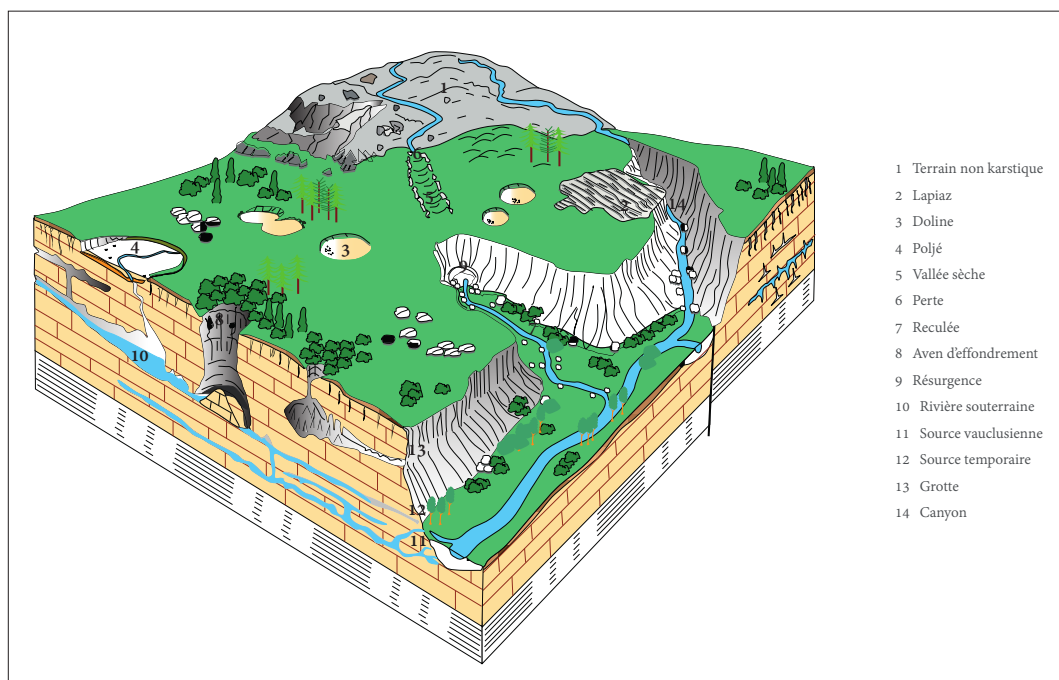


FIGURE 2.15 : SCHÉMATISATION D'UN PAYSAGE KARSTIQUE (MODIFIÉ D'APRÈS M. BAKALOWICZ, 1999)

Les seules petites nappes présentes sont limitées aux poches d'altération, dans les dépôts d'alluvions ou encore dans les zones fissurées. De faible extension (quelques kilomètres carrés), et par conséquent à faible réserve, ces petits aquifères très localisés donnent alors naissance à de multiples sources, souvent très dispersées et caractérisées par des débits d'étiage souvent très faibles. Ces dernières sont couramment exploitées pour alimenter en eau potable les petites communes de montagne. Dans ces régions, il faut souvent faire appel aux eaux de surface pour avoir des débits plus importants.

Dans les régions montagneuses, les nappes sont également rares et fragmentaires, en raison du morcellement des réservoirs.

2.2.2 Une inégale répartition et concentration des usages de l'eau

S'il existe une certaine cohérence naturelle entre les formations superficielles (e.g. la morphologie ou le relief) et les formations souterraines, il en est de même pour l'établissement humain. En effet, la répartition et la concentration des populations sont généralement motivées par des caractéristiques territoriales et des ressources adaptées à la nature de leurs activités. À titre d'exemple, les secteurs agricoles auront tendance à se développer dans les plaines alluviales, aux étendues planes, aux sols fertiles et aux réserves en eau abondantes. Cette configuration introduit nécessairement des différences en termes de besoins en eau en fonction des localités, mais peut également entraîner (avec l'indigence du climat, l'augmentation des demandes en eau, etc.) l'émergence de situations problématiques spécifiques au territoire et à l'usage. Pour illustrer ce dernier propos, quatre grands types de profils inhérents au domaine méditerranéen peuvent être dépeints.

2.2.2.1 Les zones urbaines et littorales *vs.* eau potable, industrie et tourisme

La majeure partie de la population méditerranéenne est installée et concentrée en bord de mer ou à proximité d'un grand fleuve.

Selon l'Insee (Béoutis *et al.*, 2005), sur les territoires littoraux méditerranéens, la densité y est cinq fois supérieure à la moyenne nationale. Leur développement, rapide dans un premier temps (+1,9 % entre 1962 et 1975 contre +0,9 % au niveau national), a accusé ensuite un ralentissement, notamment entre 1990 et 1999, excepté pour la Camargue et la ville de Marseille. S'en est suivi une légère accélération entre 1999 et 2005 (+0,3 point de croissance annuelle par rapport à 1990-1999), plus marquée en Languedoc-Roussillon et sur le littoral des Maures et des Alpes Maritimes, plus faible autour d'Hyères et de Fréjus, nulle dans le delta du Rhône. Toutefois, depuis 2006, une inflexion généralisée est observée, laquelle se traduit par un ralentissement de la croissance démographique, notamment dans le Var et les Bouches-du-Rhône (FIGURE 2.16).

Cette évolution et les variations de la population s'expliquent principalement par l'arrivée de nouveaux résidents et sont fortement imputables aux flux migratoires, qui expliquent 70 % de la croissance de la population des cantons littoraux, et 67 % sur le front de mer.

Par ailleurs, en plus de l'installation pérenne de nouvelles populations, en raison de la clémence du contexte climatique régional et de l'attractivité culturelle, du patrimoine, architecturale, etc., certaines villes accueillent également une population temporaire, et voient ainsi leur population parfois plus que doubler en période estivale. Le pourtour méditerranéen concentre à lui seul près de 4 lits sur 10, potentiel touristique qui a plus que doublé depuis 1982.

Les villes les plus importantes sont donc, à l'origine, stratégiquement développée sur des territoires possédant des réserves importantes en eau, afin d'assurer la demande en eau domestique de ses populations ainsi que le fonctionnement des grandes structures publiques et des commerces. Toutefois, rien ne dit que, si cette dynamique démographique persiste et si les modifications du climat attendues se réalisent, ces territoires seront encore à même d'alimenter l'ensemble des usagers de l'eau (populations pérenne et estivale, et autres secteurs économiques).

2.2.2.2 Les plaines alluviales et les collines sèches *vs.* eau potable et agriculture

Entre mer et montagne, la zone de transition est caractérisée par des territoires de plaine et de garrigues, où abondent la culture de la vigne et de l'olivier, les vergers et le maraîchage pour l'essentiel. Si, dans les petites plaines alluviales, l'eau y est relativement abondante (en fonction de la capacité du cours d'eau ou du fleuve qui alimente la nappe), sous les terrains de garrigue, la ressource y est plus rare et plus localisée. Dans ces derniers espaces, la nature des cultures en place (*e.g.* les oliviers et la vigne) est généralement bien adaptée à la pauvreté du sol et très peu gourmande en eau.

Toutefois, la sévérité du climat de certaines années et le souci d'une meilleure productivité, etc. entraînent bien souvent un changement des pratiques agricoles, qui peut être illustré par l'irrigation des vignes l'été. Actuellement, quels que soient la nature du sol et le type de culture, l'irrigation est

2. L'ÉTUDE DES BASSES EAUX OU COMMENT CARACTÉRISER LES SITUATIONS DE MANQUE HYDROLOGIQUE EN RÉGION MÉDITERRANÉENNE

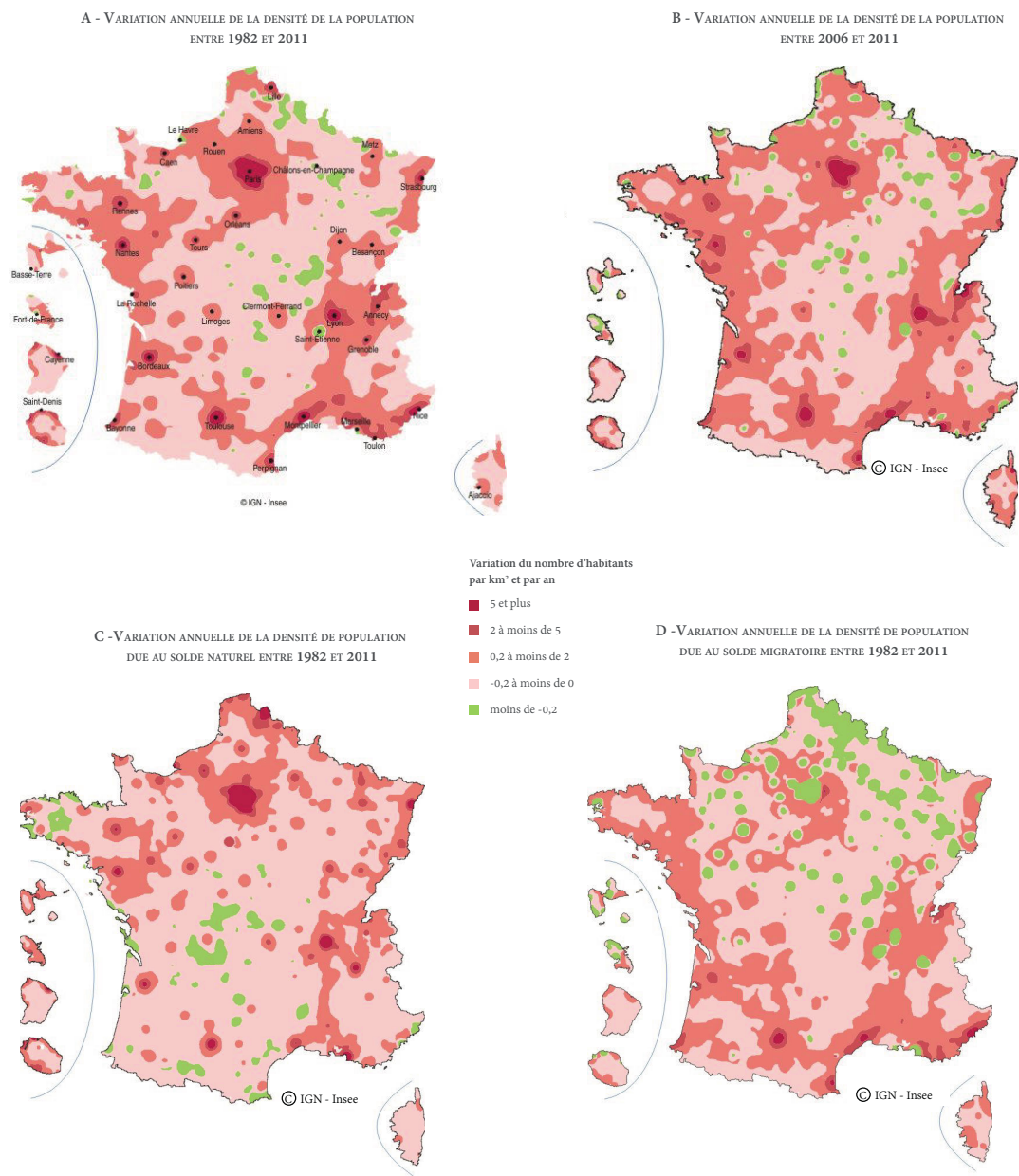


FIGURE 2.16 : VARIATIONS ANNUELLES DE LA DENSITÉ DE POPULATION

pratiquée en fonctions des besoins en eau des plantes, qui évoluent avec leur croissance, et qui sont les plus importants en période estivale ou de sécheresse.

Ces mêmes étendues font par ailleurs face à l'installation de nouvelles populations, actives pour l'essentiel, qui préfèrent de plus en plus s'installer en dehors des grandes villes proches du littoral. Ce phénomène, qui explique 85 % de la croissance de la population dans l'arrière-pays littoral, est de plus favorisé par le développement des réseaux routiers, qui facilitent l'accès aux grandes villes proches du littoral. Le développement des communes et l'expansion de l'urbanisation sur ces territoires introduisent alors la nécessité d'alimenter une population plus importante en eau domestique.

2.2.2.3 Les contreforts *vs.* eau potable et tourisme

Contrairement aux zones littorales et urbaines, les contreforts et reliefs, qui bordent le bassin méditerranéen, ne souffrent pas d'une concentration des industries ni d'une forte densité de population pérenne. En revanche, elles attirent une autre forme de tourisme que le tourisme balnéaire, tout aussi important : le tourisme « vert ». Dans ces secteurs, les activités sont davantage centrées sur les sports de nature (*e.g.* randonnées, découverte des paysages typiques (gorges, cirques, etc.), accrobranche) et les activités ludiques de l'eau (*e.g.* baignade en rivière, canoë, pêche).

Certaines petites communes, aux ressources fragiles et très localisées, voient ainsi leur population « exploser » en été : à titre d'exemple, Anduze accueille jusqu'à 15 000 touristes l'été, contre 3 500 habitants permanents⁴. Elles sont donc tout aussi susceptibles de rencontrer des difficultés pour alimenter en eau domestique ces populations temporaires en cas d'indigence climatique. D'autre part, et au-delà d'une quantité en eau suffisante pour la baignade et la navigation, la fréquentation touristique et la forme particulière du tourisme développé dans ces bassins introduisent une problématique particulière, qui peut être formulée en matière de qualité de l'eau. Si cette dernière est essentiellement d'ordre sanitaire pour la pratique de la pêche par exemple, elle est également basée sur l'aspect visuel pour les activités nautiques et de baignade (*e.g.* la présence d'algues, la turbidité de l'eau). Les attentes dans ces territoires sont donc aussi en priorité centrées sur l'état de propreté subjectif (*e.g.* visuel, sensoriel) de la ressource.

2.2.2.4 Les zones karstiques et les gorges *vs.* tourisme

Sur les plateaux et les causses karstiques, l'usage de l'eau se limite à l'eau domestique. Toutefois, les sources captées sont généralement bien en aval de la zone drainée, soit davantage dans les plaines, en amont des grandes villes littorales.

Dans les gorges des grandes rivières ou des fleuves côtiers méditerranéens, la problématique est similaire à celle soulignée dans le secteur des contreforts. L'usage principal est en lien avec la pratique de l'eau (*i.e.* la baignade et le canoë), et la sensibilité des usagers à la propreté de l'eau et à la quantité des écoulements (pour ne pas avoir à pousser son canoë, par exemple) est très forte. La demande domestique y est en revanche secondaire, étant donné la morphologie très accidentée du paysage, qui

4. D'après le cahier 1 du Document Cadre – Contrat de ville d'Alès Agglomération, - Juin 2015.

ne favorise pas l'accueil de populations pérennes ou temporaires. Les gorges ne sont généralement que des lieux de passage, bien souvent accessibles que par voie navigable.

Conclusion — Au-delà de leur exposition, plus ou moins forte, aux conditions favorables à l'avènement d'épisodes de sécheresse, certains territoires méditerranéens semblent particulièrement vulnérables au changement climatique du fait des enjeux présents et de la situation déjà plus ou moins tendue du bilan ressource-demande en eau.

L'analyse des spécificités territoriales naturelles et sociétales a mis en évidence quatre ensembles de profils « territoire – usage » et par conséquent quatre types d'enjeux sur la ressource en eau, pouvant indépendamment ou conjointement conduire à des situations problématiques :

- Dans les contreforts et les montagnes, la ressource est locale et limitée pour satisfaire des usages essentiellement ludiques, domestiques et pour l'élevage ;
- Dans les zones de transition (collines sèches, garrigues et plaines), il existe des réserves en eau variables (plus abondantes dans les plaines) destinées à des usages agricoles et domestiques ;
- Dans les gorges : des réserves variables (selon l'existence d'un réseau karstique souterrain et les pertes qu'il peut entraîner) sont disponibles pour un usage ludique de l'eau ;
- Sur le littoral et les zones très urbanisées des grandes plaines fluviales, on trouve une réserve en eau alluviale relativement abondante qui permet d'assurer les usages domestiques et industriels.

Ces profils témoignent de surcroît de la nécessité de tenir compte dans les études bilan-ressource des spécificités locales, et de fait, de descendre dans des échelles bien inférieures à celles généralement employées dans un esprit de synthèse (*e.g.* régional, grand bassin hydrologique) étant donné la diversité et la répartition des configurations existantes. Un état de crise, notamment au regard de la ressource en eau, ne correspond pas nécessairement à une situation de grande ampleur. Tout individu, groupe d'individus ou activité, qui serait privé d'eau, même sur un temps relativement court, pourrait se trouver en situation de crise. Ainsi, une situation de manque d'eau, qui pourrait se traduire par de grandes crises régionales, commence dès l'apparition de tensions locales.

2.3 La nécessité d'une nouvelle approche pour appréhender les situations de manque d'eau

Fondamentalement, il y a deux possibilités d'envisager les situations de manque hydrologique. L'une est plutôt nationale et annuelle (vision géopolitique), tandis que l'autre est locale et journalière, parfois mensuelle (conception focalisée sur une gestion au plus près des territoires et des habitants). Il n'est néanmoins pas certain que l'on puisse passer de l'une à l'autre et qu'une gestion puisse être autre que locale et une vision géopolitique autre qu'étatique. À ces deux approches, peut s'ajouter une démarche intermédiaire et régionale, développée essentiellement pour caractériser les épisodes de sécheresse.

2.3.1 L'analyse locale : les indices et seuils hydrologiques

Il existe un nombre important de moyens pour analyser les séries de débits afin de produire une information qui décrit le régime d'étiage *lato sensu* d'un cours d'eau. La diversité des méthodes est le résultat (1) des différentes définitions attribuées à l'étiage, (2) des méthodes variées pour en exprimer la fréquence et (3) des diverses durées considérées.

Par ailleurs, les indices élaborés se rapportent parfois à des valeurs simples extraites des hydrogrammes de crue, soit au résultat du traitement statistique d'une série de débits issue de ces mêmes hydrogrammes par différentes techniques de séparation, qui divisent l'écoulement total en écoulement rapide (*i.e.* influencé par les dernières précipitations) et retardé (*i.e.* contribution uniquement de la vidange souterraine, ou débit de base). Dans d'autres cas, ils sont issus de la courbe des débits classés.

2.3.1.1 Les minima annuels

L'étiage absolu d'une rivière pour une année donnée est par définition le débit le plus faible de l'année. Il coïncide avec le point d'aboutissement de la courbe de tarissement juste avant le retour de la saison des pluies (Roche, 1963). L'indice d'étiage absolu dérive des séries journalières de débit et est obtenu en sélectionnant le débit le plus faible de chaque année. Les minima annuels (*i.e.* étiages *stricto sensu*) peuvent ensuite être utilisés pour déterminer une fonction de distribution afin d'estimer la fréquence ou la période de retour des débits les plus extrêmes.

2.3.1.2 Les indices extraits de la courbe des débits classés

Les grandeurs issues de la courbe des débits classés (notée CDC) sont aussi appelées débits caractéristiques ou débits fréquentiels (Lang Delus, 2011). Cette courbe est une représentation synthétique du régime hydrologique qui traduit la probabilité qu'un débit donné soit atteint ou dépassé, aussi exprimée en termes de fréquence au dépassement. La construction de cette courbe est basée sur le classement en ordre décroissant de l'ensemble des débits moyens d'une chronique contenant n observations, à chacune desquelles est attribuée une fréquence empirique :

$$(2.1) \quad F_i = \frac{i - a}{n + b}$$

Avec i le rang du débit classé, n la taille de l'échantillon, et a et b deux nombres (prenant généralement les valeurs respectives de 0,5 et 0 ou 1).

À partir de cette définition générale, la courbe de débits classés peut être construite de manière à s'adapter à la problématique de l'étude. Par exemple, l'analyse des dynamiques saisonnières se concentrera sur les enregistrements d'une période donnée de l'année. L'avantage de la représentation sous forme de CDC réside principalement dans son aspect synthétique qui permet de visualiser rapidement les débits les plus indigents, sans traitement statistique élaboré.

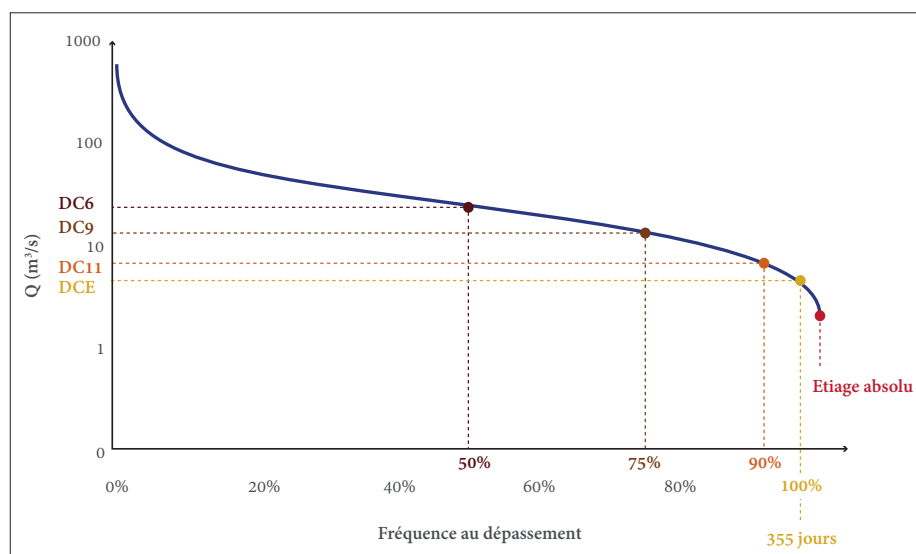


FIGURE 2.17 : LES INDICES STATISTIQUES ISSUS DE LA COURBE DES DÉBITS CLASSÉS (D'APRÈS LANG DELUS, 2011)

Parmi les indices issus de la CDC, on retrouve le Débit Caractéristique d'Étiage (noté DCE), qui correspond au débit égalé ou dépassé 355 jours par an et les Débits Caractéristiques de durées (notés DC_x ou Q_x), qui sont les débits dépassés x jours dans l'année.

Ces indices peuvent également s'exprimer en pourcentage puisqu'il s'agit de valeurs dépassées $x\%$ de l'année (FIGURE 2.17). Parmi ces derniers, le Q_{95} est l'un des plus utilisés dans un but opérationnel et constitue également une variable réglementaire en Suisse (Aschwanden et Kan, 1999). Il est défini par le débit excédé 95 % du temps à partir des débits classés, sur la base journalière ou mensuelle ou n'importe quelle période spécifique.

Toutefois, le pourcentage utilisé varie selon le type de cours d'eau étudié et le pays où l'analyse est menée. De manière générale, on retrouve dans la littérature toute la gamme comprise entre les Q_{70} et Q_{99} (Nathan et McMahon, 1990, 1992 ; Smakhtin, 2001 ; Giret, 2002 ; Pyrcce, 2004 ; Giuntoli *et al.*, 2013). D'après Gustard et Demuth (2008), le Q_{90} et le Q_{95} sont privilégiés pour les rivières pérennes tandis que le Q_{40} ou Q_{30} sont préférés pour les régions semi-arides ou polaires, en raison d'une surreprésentation des débits nuls.

2.3.1.3 Les indices de débits à durée fixe

Le débit moyen minimal observé annuellement sur une certaine durée d (noté VCN_d) constitue l'un des indicateurs les plus communément employés pour la caractérisation de la sévérité des étiages. Dans la littérature, la durée prend généralement des valeurs égales à 1, 3, 7, 10, 15, 30, 60 ou 90 jours (Tallaksen et Clausen, 1997), et parfois jusqu'à 284 jours (Smakhtin, 2001).

Tout comme les VCN_d , les QCN_d sont des valeurs extraites annuellement en fonction d'une durée fixée d , mais correspondent au débit maximal non dépassé sur une durée de d jours consécutifs.

Dans les deux cas, la durée optimale pour le calcul de ces deux types d'indices doit être en relation avec la définition attribuée à l'étiage, mais aussi avec les caractéristiques des bassins hydrologiques.

Aux États-Unis, les indices statistiques typiquement employés pour analyser les tendances des étiages sont issus de minima annuels de durée 7 et 10 jours (Svensson *et al.*, 2005). Parmi les plus fréquemment utilisés, on retrouve le 7Q10 qui correspond au minimum moyen annuel sur sept jours de période de retour de 10 ans (Schreffler, 1998 ; Abi-Zeid et Bobée, 1999) (Shreffler, 1998 ; Abi-Zeid et Boobée, 1999), initialement employé comme seuil de rejet des eaux usées afin d'assurer la protection de la vie aquatique et des habitats. De manière générale, les 7Q sont très répandus au Royaume-Uni et aux États-Unis (Smakhtin, 2001), et notamment employés par le Ministère des Ressources Naturelles de l'Ontario pour le maintien des habitats et le Ministère de l'Environnement de l'Ontario pour les prélèvements et les rejets (Pyrce, 2004).

Le débit moyen mensuel annuel (noté QMNA), privilégié en France, se situe également dans cette catégorie de descripteurs. Il est néanmoins calculé sur une base calendaire, ce qui peut présenter l'inconvénient d'être moins représentatif pour un comportement d'étiage puisqu'il peut intégrer des épisodes de remontée de débit n'ayant plus de rapport avec la dynamique de basses eaux (Lang, 2007).

Ces séries sont ensuite souvent intégrées dans une procédure d'analyse fréquentielle visant à estimer un quantile de période de retour donné à partir d'une loi statistique ajustée sur les observations. Comme pour le choix de la durée sur laquelle extraire le débit minimal, les durées de retour choisies varient selon les auteurs et les pays. Il est, par exemple, d'usage aux États-Unis de travailler sur des périodes de retour de 10 ans (1Q10, 7Q10, 30Q10) (Schreffler, 1998). Dans d'autres études, le recours aux quantiles secs et humides de période de retour 5, 10, 20 ou 50 ans est préféré (Galéa *et al.*, 1999, 2000).

Les lois appliquées aux étiages pour obtenir les caractéristiques fréquentielles des débits d'étiage dans le cas des variables de type VCND ou QMNA sont principalement celle de Weibull (Gustard et Gross, 1989 ; Nathan et McMahon, 1990 ; Galéa *et al.*, 2007), log Pearson type 3 (Stedinger et Thomas, 1985), log normale (Chen *et al.*, 2006), et Gamma (Catalogne, 2012). Dans leur travail bibliographique portant en partie sur l'analyse fréquentielle des étiages, Abi-Zeid et Bobée (1999) relèvent également le bon ajustement des séries des débits d'étiage aux lois de Gumbel, log normale à trois paramètres, Pearson type 3, Pearson type 5, log normale à deux paramètres ainsi que la loi généralisée des valeurs extrêmes.

2.3.1.4 Les indices de durée et de déficit hydrologique

L'analyse des étiages peut également être appréhendée à partir de la définition d'un débit seuil. Cette limite est utilisée pour la sélection de volumes et de durées déficitaires, d'après la « *theory of run* » de Yevjevitch (1967), afin de caractériser les étiages (Tallaksen et Clausen, 1997).

La procédure la plus courante consiste alors à identifier, à partir de la chronique des débits moyens journaliers, les durées au cours desquelles les valeurs de débit sont inférieures ou égales au seuil fixé.

La difficulté réside alors dans le choix d'un seuil adapté qui consiste finalement à définir la limite des débits d'étiage. Comme le suggère Lang Delus (2011), le choix de cette limite peut s'appuyer sur les débits caractéristiques issus de la courbe des débits classés.

Pareillement aux variables de durée, ces séries de variables se prêtent également à l'analyse fréquentielle. L'effectif des durées déficitaires s'ajuste à une loi de poisson tandis que les intensités suivent une loi exponentielle et sa généralisation au travers de la loi de Pareto généralisée (Tallaksen et Hisdal, 1997).

2.3.1.5 L'indice de débit de base

L'indice de débit de base (ou *Base Flow Index* (BFI)), introduit par Lvovich (1972) est défini par le rapport entre le débit de base et le débit total sur une période donnée (Humbert et Kaden, 1994 ; Hermann *et al.*, 2015). Lorsqu'il tend vers 1, composante lente est majoritaire, ce qui signifie que l'écoulement superficiel provient du débit de base. Le bassin est donc capable de soutenir de manière durable le débit d'étiage. À l'inverse, lorsqu'il tend vers 0, la contribution du ruissellement est dominante. C'est le cas notamment des bassins imperméables ou de faibles capacités de stockage.

Pour quantifier la contribution du débit de base à l'écoulement des cours d'eau, plusieurs techniques de décomposition d'hydrogrammes ont été développées, dont une revue complète est proposée par Nathan et McMahon (1990).

2.3.1.6 Le coefficient de tarissement

Comme cela a été évoqué précédemment (voir *supra* 1.1.2), la phase de récession correspond à la période durant laquelle le débit diminue, en l'absence de précipitations. L'analyse des propriétés de vidange des différents réservoirs durant cette période porte ainsi sur la forme de la courbe de récession, ou de tarissement si l'objectif est de rendre compte de la part attribuée au débit de base.

La dynamique de tarissement est généralement bien décrite par le modèle de décroissance exponentielle des débits, formulé par Maillet :

$$(2.2) \quad Q_i = Q_0 \times e^{-\alpha t}$$

Avec :

- Q_i est le débit à l'instant t ,
- Q_0 est le débit initial de la phase de tarissement
- α le coefficient de tarissement.

Ainsi, en traçant le logarithme du débit en fonction du temps, il est souvent possible de distinguer les différentes décroissances exponentielles en période de récession. Chacune d'elles est caractérisée par un segment de droite dont la pente donne un coefficient de tarissement.

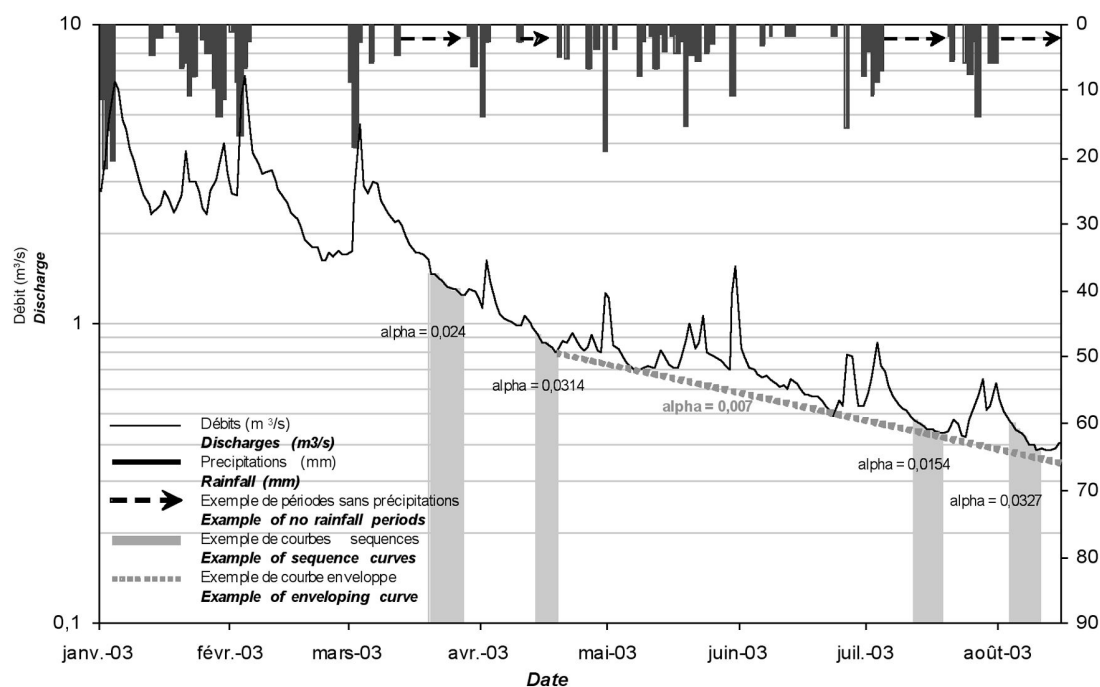


FIGURE 2.18 : EXEMPLE D'UNE COURBE ENVELOPPE DE TARISSEMENT ET DE COURBES SÉQUENCES DE TARISSEMENT (LA MORTAGNE À AUTREY-SAINTE-HÉLÈNE) (D'APRÈS LANG ET GILLES, 2006)

Selon Lang (2007), la difficulté réside dans la sélection des épisodes de tarissement (*i.e.* ne tenir compte que des débits non influencés par les dernières précipitations), qui peut être faite par la méthode des courbes-séquence, celle des courbes-enveloppe (FIGURE 2.18) ou encore celle de la courbe de décroissance. La première consiste à relier les points les plus bas d'un hydrogramme s'alignant en échelle semi-logarithmique et présente l'inconvénient d'intégrer au sein d'une même phase des remontées de débit liées à des événements pluvieux. La seconde consiste à sélectionner les débits décroissants consécutifs strictement non influencés par les pluies. La dernière méthode, automatisée, consiste à sélectionner les débits qui suivent une dynamique de décroissance, depuis le plus élevé et jusqu'au plus faible de l'année hydrologique. À partir de cette série, seuls les débits inférieurs à celui qui le précède sont retenus.

Les courbes sont ensuite ajustées au modèle de Maillet, afin d'obtenir une série de coefficients, correspondant à l'ensemble des périodes sèches analysées sur la chronique disponible (5, 10, 20 ans). À partir de cette série, il est possible de calculer un coefficient de tarissement moyen, qui permet de décrire la dynamique globale du bassin en étiage et de faire ressortir la variabilité des coefficients.

Cette analyse peut être menée en construisant une courbe moyenne de tarissement (dite « courbe maîtresse »), ou bien en procédant à un traitement statistique des coefficients. Ce dernier consiste à ajuster la distribution des coefficients à une loi log normale ou racine normale pour en déterminer ensuite la valeur moyenne, modale et les quantiles 0,25 et 0,75 par exemple (Lang et Gille, 2006 ; Lang, 2007).

L'ensemble de ces indices hydrologiques présente un certain nombre de limites. Tout d'abord,

le choix du seuil (d'entrée en étiage, de durée ou de débit) est souvent « arbitraire ». De plus, le phénomène d'étiage est abordé uniquement par le débit, supposé synthétiser l'ensemble des processus opérant à l'échelle du bassin versant. Les approches développées s'affranchissent donc des contraintes physiques, anthropiques et environnementales exercées sur les écoulements superficiels. Par ailleurs, l'élaboration de ces types d'indices exige le recours à des chroniques d'enregistrements de bonne qualité (*i.e.* des données sans lacunes) et repose sur des mesures précises et fiables.

De surcroît, les méthodes présentées ont pour objectif la prévision d'un débit ou un volume précis. Elles ne tiennent par conséquent pas compte de la qualité de la ressource en eau. Enfin, aucun de ces indices hydrologiques ne permet l'évaluation de l'état quantitatif de la ressource en fonction des besoins.

2.3.1.7 Les outils réglementaires pour la gestion quantitative de la ressource en eau

D'un point de vue réglementaire, les grands principes de gestion de la ressource en eau sont établis par la loi sur l'eau du 3 janvier 1992.

Sur le plan national, elle instaure entre autres les Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) et les Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE), qui établissent, pour chaque bassin versant, les orientations d'une gestion équilibrée de la ressource. Relativement à la problématique des étiages, cette loi définit le QMNA de fréquence 1/5^{ème} (noté QMNA5) comme débit de référence d'étiage pour l'application de la police de l'eau. Cette valeur est utilisée pour fixer les volumes de prélèvements et de rejets en eaux superficielles.

À l'échelle départementale, la loi sur l'eau définit les arrêtés-cadres qui permettent aux préfets de prendre les mesures nécessaires pour anticiper, ou à défaut, faire face à une insuffisance en eau en période d'étiage. Ce document définit ainsi, pour chaque département, l'organisation mise en place en cas de crise et fixe notamment :

- La composition du **comité sécheresse** chargé d'apporter au Préfet les informations sur la situation de la ressource en eau dans le département ;
- Les **zones d'alertes**, ou les secteurs qui possèdent les mêmes particularités hydrographiques, pour lesquelles les mesures de restrictions sont identiques ;
- Les **seuils** permettant de déclencher les mesures de restrictions dès qu'ils sont franchis⁵ :
 - **Seuil de vigilance** : valeur de débit laissée à l'appréciation des gestionnaires, pour déclencher des mesures de communication et de sensibilisation à l'économie d'eau ;
 - **Seuil d'alerte** : valeur de débit au-delà duquel l'ensemble des usages et le bon fonctionnement du milieu aquatique sont assurés au moins huit années sur dix. Lors du franchissement à la baisse de ce niveau, les premières mesures de limitation sont mises en place ;

5. URL : <http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/gestion/gestion-quantite/infos-secheresse.php>

- *Seuil de crise* : à ce stade, les mesures de limitation sont renforcées, allant jusqu'à la suspension de certains usages, afin de ne pas atteindre le niveau de crise renforcée ;
- *Seuil de crise renforcée* : valeur de débit en dessous de laquelle les usages prioritaires pour l'homme (santé, salubrité, eau potable, sécurité civile) et la survie des espèces présentes dans le milieu sont menacés. Elle repose souvent sur le débit minimum biologique ou débit réservé, qui correspond au 1/10^e ou au 1/20^e du module interannuel, selon le régime du cours d'eau et le type d'ouvrage hydraulique présent sur la section du cours d'eau considéré ⁶.
- Le détail des mesures de limitation des usages de l'eau, progressives et adaptées à la situation et aux usagers ⁷ :
 - *Usages domestiques* (collectivités et particuliers) : sensibilisation, puis limitation de plus en plus forte des prélèvements pour l'arrosage des pelouses, des espaces verts, le lavage des voitures, le remplissage des piscines jusqu'à l'interdiction totale ;
 - *Usage agricole* : interdiction d'irriguer 1 jour par semaine, plusieurs jours par semaine ou à certaines heures jusqu'à l'interdiction totale de l'irrigation ;
 - *Usage industriel* : démarche spécifique sur les unités les plus consommatrices. Par exemple, des mesures imposant le recyclage de certaines eaux de nettoyage, la modification de certains modes opératoires, etc.

L'ensemble des indicateurs réglementaires d'étiage correspond à des notions de gravité et ne tient donc pas compte de la durée ou encore la récurrence d'événements sévères, que ce soit au cours d'une même saison, une même année, voire sur plusieurs années consécutives, qui peut entraîner de graves répercussions sur les écosystèmes et les hydrosystèmes. Enfin, on peut souligner le fait que le recours à ces indices et ces seuils est relativement confus puisqu'ils ne reposent sur aucune justification scientifique et peuvent par ailleurs s'avérer peu pertinents ou adaptés à certains bassins. À ce propos, Lang Delus (2011) propose d'établir la base des seuils réglementaires sur des indices issus de la courbe des débits classés (FIGURE 2.19).

En ce qui concerne les débits réservés des étiages des cours d'eau méditerranéens, les seuils réglementaires font débat. En effet, la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (LEMA) du 30 décembre 2006 impose l'application du 1/10^e des débits à l'ensemble des ouvrages et concessions au 1er janvier 2014. Cette norme était, depuis 1984, le 1/20^e du module pour les cours d'eau dont le débit moyen est supérieur à 80 m³/s, ainsi qu'à l'aval d'ouvrages assurant la production d'électricité aux heures de pointe. Certaines dérogations ont par ailleurs été introduites. Ces seuils peuvent ne pas être respectés pour les cours d'eau au fonctionnement « atypique », et le préfet a la possibilité de fixer, ponctuellement, en cas d'étiage exceptionnel, un seuil spécifique ou encore de moduler le débit réservé à partir d'études spécifiques (*e.g.* détermination des volumes prélevables par un SAGE, un contrat de rivière).

6. URL : http://www.bulletin-officiel.developpement-durable.gouv.fr/fiches/BO201114/met_20110014_0100_0025.pdf

7. URL : http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Seuil_d_alerte_secheresse.pdf

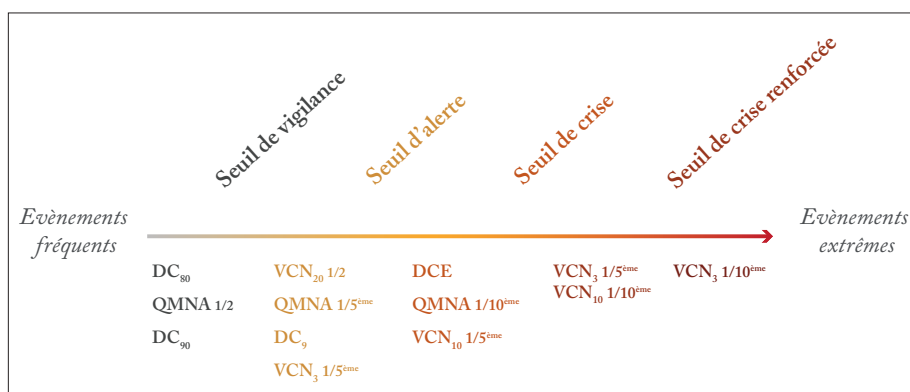


FIGURE 2.19 : DÉBITS CARACTÉRISTIQUES ET SÉVÉRITÉ DES ÉTIAGES (D'APRÈS LANG DELUS, 2011).

Malgré les différentes modulations possibles, les seuils réglementaires sont toujours polémiques, notamment parce que la priorité est portée sur la vie aquatique (débit minimal garantissant en permanence la vie, la circulation et la reproduction des espèces présentes, comme le précise l'article L.214-18 du code de l'environnement) et non sur les besoins humains et économiques (Souchon *et al.*, 1998 ; Mazeaud, 2011). De plus, dans les bassins méditerranéens, les débits d'étiages sont souvent très inférieurs au 1/10^e du module en raison de la très forte irrégularité de leur régime. Ceci remet même en question la base statistique du module et donc sa validité pour la détermination de seuils de bas débits méditerranéens. En effet, si la définition d'un seuil sur la base du module apparaît adaptée aux cours d'eau au régime hydrologique assez réguliers, il est possible de s'interroger sur sa pertinence pour les cours d'eau méditerranéens au régime hydrologique extrême.

2.3.2 La caractérisation régionale : les indices et seuils de sécheresse

Le désaccord qui existe entre les définitions de la sécheresse rend impossible l'élaboration d'un indice universel, ce qui en explique le nombre important. Un indicateur de sécheresse est toute variable hydrométéorologique ou toute fonction de ces variables dont les fluctuations peuvent indiquer la présence plus ou moins marquée de sécheresse. De manière pratique, puisqu'il s'agit d'un paramètre mesuré depuis presque deux siècles, les indices et définitions des sécheresses incluent la variable « pluie », seule ou combinée à d'autres éléments, selon la définition faite du phénomène, dont les plus utilisés sont ici présentés. Pour une liste plus exhaustive, il est possible de se référer à la revue proposée par Heim Jr (2002) qui recense l'ensemble des indices développés aux États-Unis au cours du XX^e siècle.

2.3.2.1 Les indices pluviométriques

De manière générale, pour mesurer un épisode de sécheresse sur le seul critère « précipitations », les seuils sont définis de sorte que l'évaluation du phénomène est menée en termes de :

- Durée déficitaire : n jours consécutifs sans pluie ;

- Fréquence déficitaire : précipitations (annuelles, mensuelles, etc.) inférieures à x % de la normale (annuelle, mensuelle, etc.) ;
- Durée et fréquence déficitaires : au moins n jours consécutifs avec précipitations inférieures à x % de la normale sur la période considérée ;
- Un cumul déficitaire : cumul des précipitations inférieur à x % de la normale.

Ces démarches présentent des similitudes avec la plupart des approches employées pour caractériser les étiages, la variable d'intérêt n'étant plus ici le débit, mais les précipitations. Les valeurs prises par les seuils de durée et de fréquence varient selon les pays et les régions, ce qui les rend bien souvent très peu pertinents pour l'analyse d'autres territoires que ceux pour lesquels ils ont été développés. Parmi les indices pluviométriques, les plus répandus sont certainement l'Indice de Précipitations Antérieures (IPA ou API dans sa version anglaise pour *Antecedent Precipitation Index*) et l'Indice de Précipitation Standardisé (IPS ou SPI pour *Standardized Precipitation Index*).

Élaboré par Kohler et Linsley (1949 et 1951) (Chevalier, 1983) pour estimer la teneur en eau des sols dans un but de prévision des crues (Fedora et Beschta, 1989 ; Beschta *et al.*, 1990 ; Ali *et al.*, 2010), l'Indice de Précipitations Antérieures, s'exprime mathématiquement par :

$$(2.3) \quad API = \sum_{i=1}^n k_i P_i$$

Avec :

- P_i la hauteur totale de précipitation tombée au $i^{\text{ème}}$ jour,
- n le nombre de jours antérieurs au jour i choisi (*e.g.* le jour suivant le dernier événement pluvieux),
- k un facteur qui caractérise la perte d'humidité du sol.

Ce dernier dépend fortement des caractéristiques physiques du bassin et prend généralement une valeur comprise entre 0,85 et 0,90 (Chevalier, 1983).

Dans une démarche similaire, d'autres auteurs ont recours au l'**Indice de Précipitation Standardisé**, également privilégié pour caractériser les états de sécheresse (Guttman, 1998 ; Hayes *et al.*, 1999 ; Vicente-Serrano et López-Moreno, 2005 ; Cancelliere *et al.*, 2001 ; Livada et Assimakopoulos, 2007 ; Türkeş et Tatli, 2009) ou encore pour la prévision des crues (Seiler *et al.*, 2002). Cet indice, développé par McKee *et al.* (1993), est basé sur la probabilité de précipitations sur une période donnée.

Pour le calculer, une distribution de probabilité est ajustée à la série (préférentiellement longue) de relevés pluviométriques mensuels ou saisonniers (de 2 mois à 48 mois) et de normaliser les probabilités en utilisant la fonction (gaussienne) normale inverse, de sorte que l'indice moyen (SPI moyen) soit égal à zéro.

$$(2.4) \quad SPI = \frac{X - X_{mean}}{\sigma}$$

2. L'ÉTUDE DES BASSES EAUX OU COMMENT CARACTÉRISER LES SITUATIONS DE MANQUE HYDROLOGIQUE EN RÉGION MÉDITERRANÉENNE

SPI	Classe	Fréquence
≥ 2	Extrêmement humide	1 fois tous les 50 ans
[1,5 ; 1,99]	Très humide	1 fois tous les 20 ans
[1 ; 1,49]	Modérément humide	1 fois tous les 10 ans
[0,99 ; -0,99]	Proche de la normale	1 fois tous les 2 ans
[-1 ; -1,49]	Modérément sec	1 fois tous les 10 ans
[-1,5 ; -1,99]	Très sec	1 fois tous les 20 ans
≤ -2	Extrêmement sec	1 fois tous les 50 ans

FIGURE 2.20 : VALEURS DE L'INDICE SPI ET CLASSES ET FRÉQUENCES ASSOCIÉES (MODIFIÉ D'APRÈS OMM, 2012)

Avec :

- X les précipitations à la station de référence ;
- X_{mean} les précipitations moyennes ;
- σ l'écart-type.

Cette méthode permet, à partir des valeurs prises par l'indice SPI, de définir des niveaux d'intensité des épisodes secs (*i.e.* d'aridité) ou des périodes humides, et de les exprimer en termes de déficit de précipitations, de pourcentage par rapport à la normale ou encore en fréquence de retour (FIGURE 2.20).

Cet indice présente les avantages d'être moins complexe que le PDSI, de pouvoir être calculé pour différentes échelles temporelles, de permettre la détection précoce d'un état de sécheresse et, le cas échéant, d'en évaluer le niveau de gravité (Jha, 2010). Par ailleurs, il présente une bonne cohérence spatiale, permet la comparabilité entre différentes régions (même si ces dernières sont soumises à des climats différents), et peut donc être utilisé à tout territoire (Heim Jr, 2002). Enfin, sa nature probabiliste lui permet de se positionner dans un contexte historique, ce qui présente un certain avantage pour la prise de décision.

En revanche, le SPI ne permet que la mesure stricte du déficit pluviométrique. De plus, les valeurs de l'indice, fortement dépendantes de l'historicité des séries utilisées, peuvent changer en fonction de la longueur de la chronique considérée ainsi que de l'ajout ou de la suppression de certains enregistrements (OMM, 2012). Enfin, cet indice n'a de sens que si la distribution des valeurs est gaussienne, ce qui n'est pas toujours le cas.

2.3.2.2 Les indices climatiques

Dans un souci d'intégrer à l'analyse des épisodes de sécheresse la demande naturelle en humidité, d'autres approches ont tenté de combiner aux précipitations d'autres variables climatiques, dont la température, qui est incontestablement la plus utilisée.

Classiquement, le recours à cette variable est justifié pour traduire le potentiel d'évapotranspiration, introduit en premier lieu par Thornthwaite (1931). L'évapotranspiration étant dépendante de facteurs dont les mesures directes ne sont généralement pas disponibles (*e.g.* la radiation solaire), il a été admis que la température journalière moyenne, la latitude et la période de l'année pouvaient être utilisées pour rendre compte, de manière approximative, de la quantité d'humidité perdue dans l'atmosphère par évaporation, en supposant qu'il y a une réserve en humidité dans les sols suffisante pour la végétation (Heim Jr, 2002).

À partir de cette découverte, de nombreux indices ont été développés, dont l'indice d'efficacité des précipitations (*Precipitation Effectiveness Index*) et l'indice de sécheresse (*Drought Index*), tous deux du même auteur. Le premier correspond à la somme des douze ratios mensuels d'efficacité des précipitations, chacun d'eux étant égal à la hauteur mensuelle des précipitations divisée par l'évaporation mensuelle. Le second s'exprime simplement par la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration.

La prise en compte du potentiel d'évapotranspiration se retrouve également dans l'Indice d'état de Sévérité de Sécheresse de Palmer (ou PDSI pour *Palmer Drought Severity Index*) (Palmer, 1965), le plus répandu en Amérique du Nord pour caractériser les états de sécheresse. Il est basé sur le principe d'équilibre entre l'offre et la demande et s'appuie sur des cas historiques d'événements de sécheresse extrêmes connus aux États-Unis. L'indice varie de -4 (épisode extrêmement sec) à +4 (conditions extrêmement humides), déclinant ainsi les situations en onze catégories (FIGURE 2.21).

Le PDSI est calculé à l'aide d'un algorithme qui permet de déterminer l'offre et la demande au travers des variables température et précipitations pour calibrer les taux d'évapotranspiration et de recharge ainsi que la teneur en eau des sols. L'auteur a complété son modèle en intégrant notamment un facteur de pondération climatique k , censé représenter le potentiel attendu (en termes de quantité de précipitations) pour remplir les conditions normales de recharge, de ruissellement et de perte, en un lieu et à un moment donnés.

Dans sa version complète, le PDSI est explicité par l'équation :

$$(2.5) \quad X_i = 0,897 X_{i-1} + \frac{z_i}{3}$$

Avec :

- X_i l'actuel PDSI ;
- X_{i-1} le PDSI du mois précédent ;
- z_i l'anomalie d'humidité actuelle, qui équivaut à la différence entre les précipitations actuelles et le facteur k .

Cet indice, simple d'utilisation, offre la possibilité de comparer les situations entre régions grâce au facteur de pondération climatique. Il permet également de mettre en évidence les conditions historiques à l'origine de la situation actuelle et d'anticiper les situations de sécheresse à l'échelle régionale.

2. L'ÉTUDE DES BASSES EAUX OU COMMENT CARACTÉRISER LES SITUATIONS DE MANQUE HYDROLOGIQUE EN RÉGION MÉDITERRANÉENNE

PDSI	Classe
≥ 4	Extrêmement humide
$[3 ; 3,99]$	Très humide
$[2 ; 2,99]$	Modérément humide
$[1 ; 1,99]$	Légèrement humide
$[0,5 ; 0,99]$	Début de période humide
$[0,49 ; -0,49]$	Proche de la normale
$[-0,5 ; -0,99]$	Début de période sèche
$[-1 ; -1,99]$	Légère sécheresse
$[-2 ; -2,99]$	Sécheresse modérée
$[-3 ; -3,99]$	Sécheresse sévère
≤ -4	Sécheresse extrême

FIGURE 2.21 : LES CLASSES DE PALMER POUR CARACTÉRISER LES PÉRIODES HUMIDES ET SÈCHES (D'APRÈS PALMER, 1965)

En revanche, on peut regretter les valeurs arbitraires utilisées pour quantifier l'intensité de la sécheresse et signaler le début et la fin d'un épisode humide ou sec, qui sont basées sur des études menées sur quelques états du centre des États-Unis.

De plus, s'il se veut normalisé pour être comparable entre différents territoires et différentes saisons, la pondération du facteur climatique utilisé pour standardiser les valeurs du PDSI est également basée sur des comparaisons entre seulement neuf divisions climatiques et sur des données agrégées à un niveau annuel. Elle n'est donc pas justifiée sur des bases physiques ou statistiques, et, de fait, ne rend pas l'indice comparable spatialement et temporellement. À cela s'ajoute la non-prise en compte de l'effet retardé entre les précipitations et la génération de l'écoulement (Heddinghaus et Sabol, 1991). Enfin, les valeurs de l'indice peuvent révéler l'émergence d'épisodes de sécheresses avec un décalage de quelques semaines à quelques mois, et se révèlent inadaptées pour des régions qui connaissent des événements extrêmes fréquents (Jha, 2010).

2.3.3 La démarche nationale : les indices de pénurie en eau

Les différentes approches pour appréhender la pénurie en eau s'appuient essentiellement sur des indicateurs. L'évolution et la complexification de ces derniers sont intimement liées à la progression du débat sur le phénomène, et peuvent être retracées en plusieurs étapes (Treyer, 2006). Ainsi, on observe le passage de l'appréhension du phénomène, initialement considéré comme unidimensionnel et quantifiable, en confrontant les ressources à la demande, à un phénomène complexe et doublement relatif. Dès lors, l'existence de ressources en quantité suffisante ne présume pas de pouvoir y accéder et en faire usage. L'enjeu ne réside alors plus uniquement dans la quantification, mais également dans la compréhension de la montée du phénomène. C'est la raison pour laquelle les approches les plus

récemment développées et employées intègrent dorénavant les sciences sociales en plus des sciences physiques, jusqu'alors exclusivement adoptées (Buchs, 2012).

2.3.3.1 Disponibilités en eau et seuils de stress hydrique

Dans un premier temps, l'accent est mis sur le facteur démographique et la question est de rendre compte du degré d'intensité du phénomène, en quantifiant les disponibilités en eau pour la population d'un pays donné. Il s'agit donc de concevoir la pénurie comme structurelle, physique.

L'indicateur qui fut pris en référence pour le développement des suivants est « l'indice de stress hydrique » ou « indice d'encombrement hydrique » de Falkenmark (1989). L'auteure considère que si l'on connaît combien d'eau est nécessaire pour satisfaire les besoins d'une personne, la disponibilité en eau devient une mesure de la pénurie (Rijsberman, 2006). Ainsi, dans sa première version, l'indice de stress hydrique mesure l'abondance ou la rareté de la ressource en eau, à l'échelle nationale et annuelle en mettant en relation le volume annuel en eau disponible (qui correspond à l'écoulement annuel moyen auquel est soustraite l'évapotranspiration) au volume annuel théorique pour satisfaire les usages humains. Sur la base d'une étude empirique comparant pour un ensemble de pays le nombre de personnes se répartissant une unité d'eau (soit un million de m³ par an), l'auteure propose 1 700 m³ de ressource en eau renouvelable par tête et par an comme seuil de stress hydrique (Falkenmark, 1989). Entre 1 000 et 1 700 m³, le pays est en situation de pénurie chronique. En deçà de 500 m³, il s'agit d'une situation de pénurie absolue ou structurelle. Cet indicateur est encore très largement utilisé puisqu'il est intuitif et facile à comprendre. De plus, les données qui le renseignent sont généralement disponibles. Cependant, il ne permet pas de révéler des situations de pénuries sévères à des échelles plus fines, puisque les moyennes prises en compte sont nationales et annuelles. Enfin, les seuils étant fixes, l'indice de stress hydrique s'affranchit des variations importantes de la demande entre les pays, variations liées au mode de vie, à la culture, au climat, etc.

2.3.3.2 Vulnérabilités physique, économique et environnementale

À la suite à ces travaux, le débat sur le phénomène de pénurie en eau a évolué vers la nécessité de prendre en compte la vulnérabilité du système qu'elle soit physique, économique ou environnementale.

En conservant la ressource et la population comme critères déterminant l'intensité de la pénurie en eau, de nouveaux indicateurs ont été développés, dans lesquels la demande est substituée par le concept de prélèvement. Sur la base des travaux entrepris par Shiklomanov (1991) (Brown et Matlock, 2011), qui, jugeant l'estimation des besoins comme subjective et arbitraire, développe un indice d'exploitation (correspondant au taux de prélèvement), Raskin et *al.* (1997) élaborent un indicateur de vulnérabilité hydrique. Ce dernier met en relation les prélèvements annuels totaux (tous usages confondus) et le volume annuel en eau disponible. Une situation de pénurie est identifiée lorsque le taux d'exploitation, ou le niveau de pression subi par le système physique, est compris entre 20 et 40 %. Au-delà de 40 %, la situation est qualifiée de sévère. Bien que les auteurs suggèrent de

prendre en compte la dépendance du pays étudié vis-à-vis des ressources transfrontalières et d'intégrer le montant de l'eau partagée (Feitelson et Chenoweth, 2002), cet indicateur présente d'autres limites. Les données relatives à la disponibilité des ressources ne tiennent pas compte de la quantité réellement mobilisable pour les usages humains. De plus, les prélèvements ne permettent pas de renseigner la quantité réellement consommée (ou évapotranspirée), ni la quantité rendue disponible par recyclage ou retour au milieu naturel. Enfin, l'indice de vulnérabilité hydrique ne considère pas la capacité d'adaptation de la société à faire face ou à répondre au stress hydrique (Rijsberman, 2006).

Pour s'affranchir de la limite liée à l'échelle spatiale nationale Alcamo et *al.* (2003) ont défini le ratio de criticité. Ce dernier conserve le rapport et les seuils définis pour l'indicateur de vulnérabilité hydrique tout en réduisant l'échelle spatiale d'analyse au bassin versant.

Pour d'autres auteurs, la pénurie n'est pas seulement d'ordre physique. Un pays peut être considéré en situation de pénurie, tandis qu'il bénéficie d'une ressource abondante sans toutefois y avoir accès. L'International Water Management Institute (IWMI) fait la distinction entre pénurie physique et pénurie économique. La pénurie physique est évaluée sur la base de l'indicateur de vulnérabilité hydrique avec la prise en compte de l'évapotranspiration et de la réutilisation des flux (en zones agricoles). En deçà de 25 %, il n'y a pas de pénurie. Lorsque le taux de prélèvements est supérieur à 60 %, le pays rencontre une situation de pénurie physique ; le seuil de criticité étant fixé à 75 %. La pénurie économique est quant à elle appréhendée en tenant compte des contraintes économiques (au travers des infrastructures existantes) et correspond à la nécessité d'accroître les capacités de mobilisation et de stockage de plus de 25 % (Brown et Matlock, 2011). De son côté, Molden (2007) considère qu'une situation de pénurie économique peut être caractérisée par des taux de prélèvements inférieurs à 25 % alors même que sont observés des problèmes de malnutrition (Buchs, 2012).

Enfin, de nombreux travaux se sont intéressés à la composante environnementale. Dans ce sens, Smakthin et *al.* (2004) ont développé un nouvel indicateur de stress hydrique qui rend compte des besoins hydriques environnementaux, par le biais des débits réservés. Cet indicateur met en relation les prélèvements et la différence entre les écoulements annuels moyens et les besoins environnementaux, à l'échelle des grands bassins hydrographiques. Les seuils sont fixés à 30 et 60 %. En deçà de 30 %, les bassins sont considérés comme environnementalement sains. Au-delà de 60 %, les bassins sont surexploités, et en situation de pénurie hydrique environnementale.

2.3.3.3 Sécurité hydrique ou la pénurie en eau comme phénomène social

La troisième phase marquant la progression de la réflexion sur le phénomène correspond à la prise en compte des capacités adaptatives des sociétés pour faire face à la rareté de l'eau, par la mobilisation de moyens économiques, technologiques, etc. Plusieurs démarches ont été adoptées, intégrant progressivement ou combinant les composantes sociale, économique, politique et institutionnelle.

Les premiers travaux à prendre en compte le facteur social, pour tenter à la fois de conceptualiser les capacités adaptatives et prendre en compte les disparités en termes de niveau de vie d'un pays, ont abouti à un indicateur de stress hydrique social (Ohlsson, 2000). En pondérant l'indice

de stress hydrique de Falkenmark par l'IDH et en conservant des seuils identiques, l'auteur définit quatre niveaux de stress (abondance relative à pénurie absolue). Les résultats obtenus révèlent que le classement des pays varie considérablement si l'indicateur de Falkenmark ou l'indicateur de stress hydrique social est utilisé.

Cependant, Falkenmark, dans la deuxième version de son indicateur, avait déjà intégré le volet social, en combinant trois paramètres sur un support graphique. Chacun d'entre eux donne des informations de nature différente, qui, recoupées, permettent de caractériser la situation d'un pays (Buchs, 2012). Sur l'axe des abscisses est reportée la pression démographique, définie par l'indice d'encombrement et exprimant à la fois le niveau de conflits d'usage et le nombre de personnes polluant chaque unité d'eau. Sur l'axe des ordonnées, est projeté le taux de prélèvement, renseignant le niveau de mobilisation en fonction de la disponibilité globale au niveau d'un pays et estimant les difficultés de gestion. Enfin, les volumes prélevés moyens par habitant et par an sont superposés aux deux précédents paramètres, sous la forme de diagonales. Pour chacun des trois paramètres, des seuils sont fixés afin de dresser des typologies. Cette approche, simple à appréhender et à mettre en œuvre permet de comparer les pays vis-à-vis de l'intensité de la pénurie. Néanmoins, les moyennes nationales utilisées sont peu significatives au regard de la diversité des conditions climatiques et hydrologiques d'une part, et d'autre part de l'hétérogénéité de la répartition de la population (Margat, 2005). De la même manière, les moyennes annuelles masquent les disparités existantes à des échelles temporelles plus réduites (Rijsberman, 2006).

Sullivan (2002) s'oriente vers une approche désagrégée pour tenter d'établir si les populations sont en situation de sécurité hydrique. En partant du postulat que la pénurie en eau résulte de plusieurs facteurs tels la ressource (variabilité, quantité et qualité), l'accès (à l'assainissement, à l'eau potable, etc.), la capacité à gérer l'eau (liée au niveau d'éducation et du revenu), les usages (correspondant au rapport des volumes de chaque secteur par habitant) et l'environnement (*e.g.* qualité de l'eau, le degré de pollution, la protection de l'environnement), l'auteure développe un indice de pauvreté hydrique (Lawrence *et al.*, 2002 ; Sullivan, 2002 ; Sullivan, C. *et al.*, 2006). Ce dernier est évalué sur une échelle de 0 à 100, un maximum de 20 points étant attribué à chacune des cinq composantes, elles-mêmes basées sur un total de 17 indicateurs. L'indice de pauvreté hydrique se veut un outil d'aide à la décision, qui présente l'avantage de sa compréhension, mais est limité par sa complexité et son manque d'intuitivité (Rijsberman, 2006). De plus, les pondérations sont établies de manière arbitraire et, comme pour la majorité des indices multidimensionnels, il combine des informations de nature différente, pouvant générer des résultats d'associations surprenants (Molle et Mollinga, 2003).

La raréfaction de la ressource résulte aussi de choix politiques et des institutions en vigueur. Dans leur travail critique sur les indicateurs de pénurie en eau (Molle et Mollinga, 2003) identifient dans un premier temps cinq types de pénurie qui peuvent se combiner. La pénurie physique est liée à un déficit des ressources ; la pénurie économique est le résultat d'un manque de ressources humaines et/ou financières pour assurer l'approvisionnement en eau ; la pénurie managériale est occasionnée par des déficiences de maintenance et de gestion des systèmes hydriques et des infrastructures ; la

pénurie institutionnelle est liée à des failles dans l'ajustement du bilan ressources-usages, notamment pour des raisons d'appropriation et de répartition des ressources défaillantes ; la pénurie politique correspond à des situations de discrimination face à l'accès à l'eau pour des personnes ou groupes de personnes en situation de subordination politique. Dans un deuxième temps, les auteurs déterminent cinq catégories d'usage : la boisson, les autres usages domestiques, l'irrigation, les usages comme intrant dans les procédés de production et les besoins environnementaux. Ces dernières sont ensuite croisées avec les cinq types de pénurie pour obtenir une matrice descriptive à 25 cases, balayant ainsi une grande variété de situations.

2.3.4 L'apport de l'approche multiscalaire des basses eaux

Si conceptuellement le pas proposé est riche, les indicateurs développés jusqu'à présent, pour caractériser les états hydrologiques, les niveaux de sécheresse pouvant induire une raréfaction de la ressource et les degrés de tension sur l'eau, présentent de nombreuses limites propres, mais aussi communes.

D'une part, l'échelle étatique ou régionale, voire celle de grands bassins versants, fréquemment utilisée (excepté pour l'analyse des étiages) s'avère peu significative au regard de la diversité du contexte géophysique ainsi que de l'hétérogénéité de la répartition de la population et de ses activités. De la même manière, les moyennes annuelles, voire mensuelles, masquent les disparités existantes à des échelles temporelles plus réduites, qui sont généralement celles des tensions catastrophiques. Les données annuelles/mensuelles et nationales/régionales ne permettent donc pas de mettre en lumière des situations de tensions locales tout aussi importantes.

De plus, les paramètres pris en compte sont dans certains cas bien trop englobants et autorisent uniquement la comparaison entre pays, entre vastes aires. Ils ne sont donc pas adaptés à une gestion locale et immédiate. Les démarches basées sur l'analyse d'une variable unique ou d'un couple de variables, quant à elles, ne peuvent rendre compte de la complexité de la structure d'un système anthropo-naturel. Elles se révèlent par conséquent insuffisantes pour évaluer le plus justement possible les niveaux d'offre et de demande en eau, quelle que soit l'échelle spatiale considérée. Par ailleurs, dans la majorité des approches présentées, les seuils de discrimination des variables et des états (de pénurie, de sécheresse, d'étiage) définis par les indices qui en découlent, sont majoritairement fixés de manière subjective (*i.e.* sur la base d'estimations, d'appréciations ou de comparaisons) et ne repose parfois sur aucune justification scientifique.

Enfin, si les indices d'étiage et de sécheresse (ces derniers s'apparentent plutôt à des indices d'aridité) n'intègrent pas les besoins anthropiques et naturels, les indices de pénurie, quant à eux, ne prennent pas en considération la dynamique du phénomène, les changements dans les apports pluviométriques (*i.e.* la variation et le changement climatiques), ou encore les évolutions démographiques et de la consommation, etc. qui peuvent varier au cours de l'année (*e.g.* la migration touristique) et entre cultures (*e.g.* rurale, suburbaine).

Au regard de ces éléments, il apparaît donc essentiel de redéfinir le(s) cadre(s) spatio-temporel(s) au sein duquel (desquels) une analyse des basses eaux peut être envisagée et de déterminer la nature et les prérequis des facteurs qui seront pris en compte dans l'évaluation du phénomène.

2.3.4.1 Modification spatio-temporelle de la structure du phénomène

L'hypothèse centrale sur laquelle se fonde la présente réflexion visant à caractériser les états de basses eaux admet l'existence d'une structuration du phénomène dans les échelles spatiale et temporelle. De ce postulat découle une série logique de présupposés sous-jacents.

- (1) Le phénomène est observable et appréhendable à différents niveaux, selon l'objectif fixé (*e.g.* l'étude de l'état global de la ressource, la disponibilité en eau pour un usage spécifique).

En considérant l'état des basses eaux d'un point de vue strictement hydrologique, le penchant en eau (positif ou négatif) est observable et évaluable à l'échelle régionale comme locale. Dans cette perspective, l'objectif fixé est de définir l'état hydrologique global de la ressource. En revanche, en se positionnant du point de vue centré sur les besoins environnementaux et les usages anthropiques, l'état de manque hydrologique ne peut être envisagé que localement, comme cela a été suggéré précédemment lors de la définition des profils « territoire – usages » (voir *supra* 2.2.2). Pour reprendre quelques exemples, la disponibilité en eau pour l'usage domestique peut être mesurée à l'échelle de la commune, les volumes destinés à l'irrigation peuvent être évalués à l'échelle du bassin d'activité, la ressource pour assurer les activités ludiques (*e.g.* la baignade) peut être appréhendée à l'échelle du linéaire du cours d'eau voire du site ponctuel de baignade, etc. Une fois mises bout à bout, ces situations locales pourront ensuite autoriser la détermination d'un état plus global.

- (2) De nombreux facteurs interviennent à chaque niveau d'observation, un certain nombre à tous les niveaux, d'autres uniquement à des niveaux spécifiques, qu'il faut au préalable identifier.

Certains facteurs, notamment climatiques (*e.g.* les précipitations) ont une incidence majeure sur l'état des basses eaux, donc entrent naturellement dans l'analyse aussi bien locale que globale du phénomène. En revanche, la présence d'algues vertes sur un site de baignade ou sur une partie du linéaire d'un cours d'eau, n'aura d'impact que localement sur l'état des basses eaux, pour satisfaire notamment les usages ludiques. C'est le cas également de la qualité des eaux de baignade, qui n'aura de pertinence que sur les territoires où l'activité ludique de l'eau est présente. Il faut donc envisager de prendre en compte, en plus des paramètres globaux, des facteurs qui introduisent des problématiques localement pertinentes, c'est-à-dire en lien avec les usages particuliers de l'eau.

- (3) Chacune de ces variables présente une structure homogène dans un espace à définir.

Bien que les facteurs, ou variables, qui interviennent dans l'état des basses eaux ne sont pas identiques selon les échelles spatiales considérées, ils présentent néanmoins individuellement une structure particulière et homogène au sein de leur aire supposée de contrôle. Par exemple, la variable pluviométrique est susceptible d'intervenir dans toutes les échelles, mais présentera, le cas échéant,

une structure différente selon le lieu, étant donné qu'il existe, au sein du climat méditerranéen, une différence sensible du régime pluviométrique entre le nord et le sud du bassin méditerranéen (voir *supra* 2.1.1.2). Ainsi, que l'on considère un territoire plutôt proche du littoral, ou au contraire, situé en bordure des contreforts cévenols, la distribution des précipitations sera différente. Il est donc nécessaire de tenir compte de cette variabilité pour cadrer au mieux avec le territoire soumis à l'étude. Ce point fait apparaître la question de la territorialisation (voir *infra* 2.3.4.2), qui introduit le problème de la définition de la représentativité (ou de l'aire d'influence) d'une variable générale ou locale et du moyen de penser cette variable à une échelle respectivement plus grande ou plus petite.

- (4) Il existe alors une hiérarchie au sein des variables, dont le rôle et le poids varient avec l'échelle et l'usage mis au regard.

L'intégration des problématiques locales dans l'évaluation des basses eaux entraîne nécessairement un changement de l'importance des forçages exercés par les facteurs pris en compte. Ainsi, en reprenant l'exemple de l'usage ludique de l'eau, la qualité de l'eau de baignade et la présence d'algues vertes vont prévaloir sur la température de l'eau et probablement de manière équivalente sur le débit du cours d'eau. À l'inverse, la question de la disponibilité en eau pour l'agriculture ne fera intervenir la qualité de l'eau de baignade que dans une moindre mesure, la priorité étant mise sur la qualité physico-chimique et surtout sur le débit du cours d'eau, la hauteur de la nappe ou le volume disponible dans le barrage. En d'autres termes, selon les usages, les variables à considérer seront différentes, et quand bien même elles interviendraient dans les différentes échelles, elles ne seront pas jugées avec la même force de contrôle, les attentes selon les usages de l'eau n'étant pas basées sur les mêmes critères.

- (5) La genèse et la fréquence des états de basses eaux, quel que soit le territoire considéré, varient également dans le temps.

D'un point de vue strictement hydrologique, et dans un contexte non perturbé par les pressions anthropiques, le régime des basses eaux évolue dans le temps court (*e.g.* variabilité annuelle, inter-annuelle), mais aussi dans le temps long (*e.g.* décennie, siècle), au rythme des forçages climatiques. Ainsi, observer des états sur une courte période mettrait en évidence une structure différente que celle observée sur des périodes plus longues. Des états considérés comme plus problématiques dans une approche courte se révéleraient normaux dans une approche plus longue. Or, il s'agit ici d'envisager les situations qui présenteraient une fréquence bien plus rare que les états qui s'observent régulièrement ; cette rareté se définissant en partie à partir des effets cumulés d'une année sur l'autre (*e.g.* la Californie depuis quelques années). Cette variabilité, dont on ne voit pas pourquoi elle devrait se réduire, devrait, de plus, être affectée par le changement climatique actuel. La mise en évidence d'états passés, à partir de données historiques, pourrait donc faire apparaître des tendances longues ou des fluctuations.

À cela il faut évidemment ajouter le forçage anthropique lié à l'augmentation de la population dans certains territoires et à l'évolution de son mode de vie ; population qui est de plus en plus sensible (surtout si elle est temporaire et consommatrice d'espaces naturels, d'eaux vives, etc.) à la qualité des

milieux et à la « propreté » perçue de l'eau courante. Dans une perspective alors anthropocentrée, la situation devient fondamentalement non stationnaire, vraisemblablement dès que la durée considérée dépasse quelques années. Bien qu'un état de basses eaux soit supposé se former selon une temporalité relativement longue (au contraire d'une crue), il n'est pas exclu qu'avec les forçages climatiques et anthropiques de plus en plus forts envisagés, une modification de la dynamique du système naturel puisse apparaître et entraîner une accélération de la montée vers un état de crise, accompagnée d'un accroissement de la fréquence du phénomène. L'une des conditions d'étude sous-jacente repose donc, en partie, sur la profondeur historique de l'information nécessaire pour caractériser un état moyen de basses eaux, à partir duquel pourrait être révélée une situation de manque hydrologique.

2.3.4.2 La question de la territorialisation des états de basses eaux

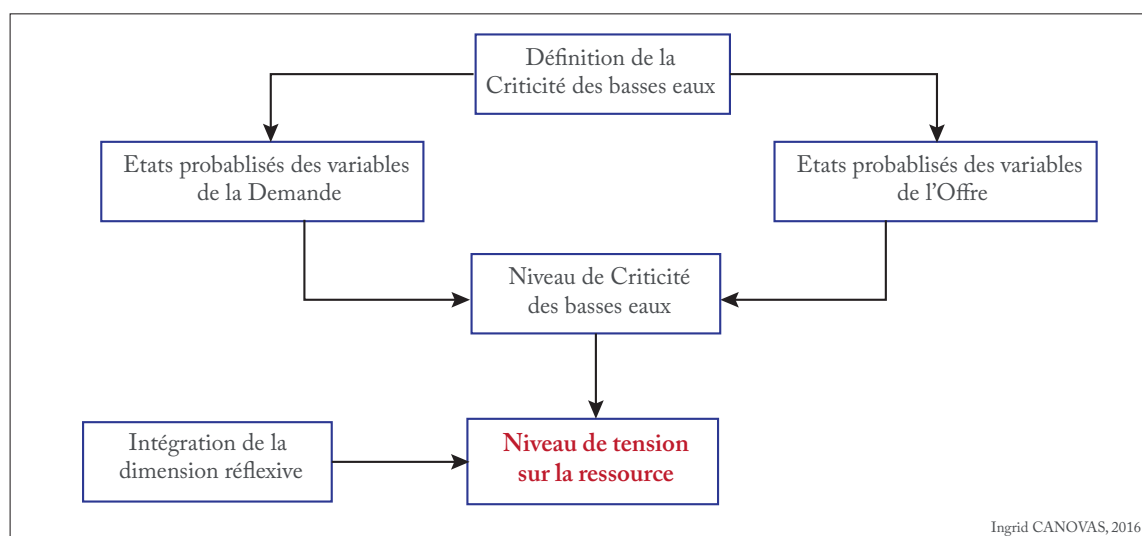
L'hypothèse selon laquelle les basses eaux présentent une structure spatiale et temporelle fait intervenir la question de la territorialisation de ces états. En effet, le système considéré se manifeste de manière aréolaire, à la différence des étiages (*ss* ou *ls*) ponctuels, voire linéaires. Ainsi, bien qu'il soit possible de définir au préalable des aires d'observation (*e.g.* la région, le bassin versant, la commune) selon l'objectif de l'étude (*e.g.* une évaluation globale de la ressource, la quantité en eau mobilisable pour un usage particulier), la disponibilité et la représentativité des informations renseignant les facteurs pris en compte dans la caractérisation des états de basses eaux ne seront pas toujours en adéquation avec l'échelle d'analyse retenue. Il sera donc parfois nécessaire de penser l'information ponctuelle à plus petite échelle (*i.e.* d'un grand territoire) et inversement. La réflexion doit alors être étendue aux modalités pour traduire avec pertinence l'aire de représentativité, de diffusion, de contrôle de chacun des facteurs. Cela revient, par conséquent, à identifier l'expansion spatiale au sein de laquelle chaque variable possède une structure homogène.

Conclusion — Si l'on se réfère à la définition des basses eaux proposée dans ce travail, la situation de basses eaux est certes fonction de l'état hydrologique des rivières et nappes pour l'essentiel, mais aussi de la position du point d'observation où cette évaluation est faite au regard des besoins affichés. À cela vient s'ajouter la question de la territorialisation de ce phénomène, qui apparaît infiniment plus complexe que pour les autres phénomènes, car il s'agit d'une manifestation aréolaire. L'approche à envisager ici ne peut donc pas s'inscrire dans la branche classique des études sur la ressource en eau, qui se basent généralement sur des logiques de flux ou de volumes et sont déployées sur des aires vastes, ou au contraire sur des analyses d'écoulements très fines sur des sites ponctuels. La logique défendue ici part du territoire, de la situation très locale, et elle essaye de la caractériser. En d'autres termes, l'objectif est de voir au plus près des usagers quelle pourrait être la situation au regard de la ressource en eau et comment il est possible d'en suivre une évolution défavorable (ou favorable). Il s'agit ensuite de définir comment mises bout à bout, l'ensemble de ces situations locales peuvent traduire un état plus global (*e.g.* départemental, régional).

L'analyse des basses eaux ne peut donc se limiter à une approche trop grossière. Dans un but opérationnel d'anticipation et de réaction face à une situation pouvant avoir des impacts significatifs,

il est nécessaire d'aborder ces problèmes à des échelles plus restreintes (plus locales), et en articulation avec une certaine globalité hydro-sociale locale. C'est la raison pour laquelle, dans ce travail, le recours à une approche multiscalaire du phénomène et des variables a été choisi et développé.

DE LA CONCEPTUALISATION DE LA CRITICITÉ DES ÉTATS DE BASSES EAUX À LA DÉFINITION D'UN NIVEAU DE TENSION SUR LA RESSOURCE EN EAU



3.1	La criticité, un concept issu de la physique et des sciences de l'ingénieur	98
3.1.1	Réaction en chaîne	98
3.1.2	Changement d'état d'équilibre	99
3.1.3	Mesure du risque	102
3.2	La notion de criticité appliquée aux basses eaux	103
3.2.1	Criticité relative <i>vs.</i> criticité absolue	103
3.2.2	La combinaison d'états probabilités	104
3.2.3	Vers des seuils de criticité des basses eaux	105
3.3	Détermination de l'état de tension sur la ressource en eau	106

Les basses eaux constituent le penchant hydrologique moyen d'un territoire, qui présente une structure et une dynamique particulière selon l'échelle d'observation. L'état moyen de la situation de basses eaux dépend de nombreux facteurs à la fois locaux et plus globaux. L'écart à cet état constitue un manque hydrologique, qui peut être gradué, selon sa sévérité. Cet écart négatif peut être envisagé comme un niveau de criticité, qu'il faut définir dans ce contexte particulier. Il dépendrait donc des variations des facteurs de contrôle du phénomène, à la fois naturels et anthropiques.

Avant de définir des états critiques ou des niveaux de criticité, il faut revoir dans un premier temps les notions développées dans les autres domaines autour de ce concept, afin de l'adapter à celui des basses eaux. Puis, dans une finalité visant à évaluer le niveau de tension sur la ressource en eau qui peut émerger en réponse à la montée vers un état critique, la dimension réflexive sera introduite, de sorte à traduire l'adéquation entre la situation évaluée (le niveau de criticité défini) et les attentes et la perception des usagers de l'eau de cette même situation (évaluation subjective).

3.1 La criticité, un concept issu de la physique et des sciences de l'ingénieur

Dans la conscience collective, la criticité revêt une signification dramatique, faisant référence à une situation incontrôlable et, de fait, extrêmement dangereuse. Cependant, dans la littérature scientifique, cette analogie n'est pas systématiquement établie. En effet, la criticité peut être appréhendée de plusieurs manières, selon le domaine dans lequel elle est considérée. Elle peut signifier : (1) l'emballement d'un système au dépassement d'une valeur critique, (2) la distance du système au seuil critique ou encore (3) le degré de gravité d'un risque.

3.1.1 Réaction en chaîne

À l'origine, le terme « criticité » est utilisé en physique (industrie nucléaire) pour caractériser une « réaction nucléaire de fissions en chaîne incontrôlée, qui s'accompagne d'une émission intense de rayonnements gamma et de neutrons (...) ». Le paramètre déterminant l'état du système, et donc susceptible d'en provoquer l'emballement, est le « facteur de multiplication effectif du système » (k_{eff}). En fonction de sa valeur, le système est dit : « sous-critique » (k_{eff} est inférieur à 1), « critique » (k_{eff}

est égal à 1) ou « surcritique » (k_{eff} est supérieur à 1). Ce dernier est requis pour lancer un réacteur ou en augmenter la puissance, induisant une évolution exponentielle du nombre de neutrons dans le temps. Si cette situation n'est pas maîtrisée, c'est l'accident de criticité (IRSN, 2010).

Le point critique représente ici l'équilibre du système. La criticité correspond à l'état du système au dépassement de cette valeur seuil, soient l'emballement et la perte de contrôle qui se manifestent par une réaction en chaîne, entraînant alors une situation de crise.

3.1.2 Changement d'état d'équilibre

Dans de nombreux domaines, tels que la physique, les mathématiques ou encore l'étude du vivant et l'écologie, la criticité correspond à la phase durant laquelle le système évolue depuis un état d'équilibre jusqu'à un point de rupture (le point critique). Une fois ce dernier atteint, le système bascule de manière brutale et soudaine, entraînant un changement d'état. Selon cette approche, la criticité peut se construire dans le temps, en réponse aux changements (plus ou moins graduels) des conditions extérieures ou bien s'auto-organiser.

3.1.2.1 Dans le domaine des mathématiques

Les modèles mathématiques pour expliquer les phénomènes sont basés sur des équations différentielles. Cependant, ces dernières ont des limites : elles ne peuvent décrire que les phénomènes dont le changement s'opère lentement et de manière continue. Or, peu de phénomènes réagissent de cette manière. Au contraire, le monde est plein de transformations soudaines et de divergences imprévisibles, qui appellent à des fonctions qui ne sont pas différenciables.

Une méthode mathématique a été développée pour traiter ces phénomènes discontinus et divergents. Elle permet de décrire l'évolution des formes dans tous les aspects de la nature et présente l'avantage de s'appliquer de manière pertinente aux situations pour lesquelles les changements de pressions graduelles entraînent des changements du comportement brutaux (Ekeland, 1977). Cette méthode, dont l'invention revient à René Thom (1972), appelée « théorie des catastrophes », dérive de la typologie, la branche des mathématiques concernée par les propriétés des surfaces dans plusieurs dimensions. La typologie est impliquée, car les forces sous-jacentes dans la nature peuvent être décrites par des surfaces d'équilibre régulières. C'est lorsque l'équilibre est rompu (bifurcations) que les catastrophes apparaissent (changement d'état). Le problème de la théorie des catastrophes est de décrire les formes de toutes les surfaces d'équilibre possibles. Thom a résolu ce problème sous la forme de quelques archétypes qu'il a nommé les catastrophes élémentaires. Pour les processus contrôlés par au maximum quatre facteurs, Thom a démontré qu'il existait seulement sept catastrophes élémentaires (FIGURE 3.1).

Il s'agit donc une théorie de l'émergence, de la modification ou de la disparition plus ou moins brusque de « formes » au sein de systèmes régis par des équations dépendant continûment des paramètres. Le terme de catastrophe a donc deux sens : un sens commun où il désigne des changements soudains et un sens propre à la théorie des catastrophes, selon lequel une catastrophe correspond à

3. DE LA CONCEPTUALISATION DE LA CRITICITÉ DES ÉTATS DE BASSES EAUX À LA DÉFINITION D'UN NIVEAU DE TENSION SUR LA RESSOURCE EN EAU

NOM DES SINGULARITÉS	SECTIONS REMARQUABLES	GRAPHES ELEMENTAIRES D'INTERACTIONS	INTERPRETATION SPATIALE SUBSTANTIFS	INTERPRETATION TEMPORELLE VERBES		LISTE DES MORPHOLOGIES ARCHETYPES
MINIMUM SIMPLE			Etre Objet	Etre	Durer	
LE PLI			Le bord Le bout	La fin Finir	Le début Commencer	
LA FRONCE			La faille	Capturer Casser Rompre Changer	Engendrer Unir Denier	
LA QUEUE D'ARRONDE			La fente Le coin	Déchirer Fendre	Coudre	
LE PAPILLON			La poche L'écaillé	Sécailler S'exfolier Remplir	Donner Recevoir Vider	
L'OMBILIC HYPERBOLIQUE			Le crêt (de la vague) La voûte	Briser la vague Seffondrer	Recouvrir	
L'OMBILIC ELLIPTIQUE			L'aiguille La pique Le poil	Piquer Pénétrer	Boucher Anéantir	
L'OMBILIC PARABOLIQUE			Le jet d'eau Le champignon La bouche	Briser Ejecter Lancer Percer	Lier Ouvrir Fermer	

FIGURE 3.1 : MODÈLES MATHÉMATIQUES DE LA MORPHOGENÈSE ET IMAGINAIRE (MODIFIÉ D'APRÈS THOM)

la disparition d'une forme stable. Cette disparition aboutit à l'établissement d'une nouvelle forme résultant d'une modification des forces agissantes sur le système. Une forme stable, au sens mathématique de la stabilité structurelle, est alors une forme qui ne change pas de type sous l'influence de perturbations de faible importance.

La notion de seuils critiques (bifurcations ou sauts catastrophiques) n'est donc pas ici synonyme de drame ou de crise, mais renvoie à un changement d'état, qui, certes, s'opère de manière brutale, rapide, soudaine. On retrouve d'ailleurs ces concepts dans les domaines des sciences physiques et de l'étude du vivant, notamment en termes d'états critiques.

3.1.2.2 Dans le domaine de la physique

En physique, un état critique est susceptible d'apparaître aussi bien à l'équilibre que hors d'équilibre. Dans ce dernier cas, il peut être caractérisé par des transitions de phase, au cours desquelles un changement d'état est observé (le passage du gaz au liquide, par exemple), forcé par des modifications de l'environnement extérieur. À l'état critique, les propriétés et les paramètres du système considéré changent de manière radicale, et une nouvelle structure de cohérence émerge (Bailly et Longo, 2006). Un exemple peut être donné par la formation de la structure cristalline lors de la transition critique du liquide au cristal.

Dans un tel contexte, l'état critique se réduit aussi au point critique, mais la criticité correspond à l'établissement d'une nouvelle structure (un changement d'état) lorsque la valeur seuil du paramètre contrôlant le système (soit la température pour les exemples cités) est atteinte.

Ce phénomène peut également se produire sans que les conditions extérieures aient été modifiées (Bak *et al.*, 1989). La simple interaction d'éléments a priori non organisés peut être à l'origine de la formation de structures organisées. C'est le réseau même qui relie des éléments simples et produit l'émergence de structures complexes, en atteignant spontanément le point critique : on parle, dans ce cas, de criticité auto-organisée (Bailly et Longo, 2006). En d'autres termes, le système se conduit lui-même à une transition critique afin de se constituer ou de retrouver un état stable. L'exemple le plus couramment utilisé pour illustrer ce phénomène est celui de la pile de sable (Bak *et al.*, 1989 ; Solé *et al.*, 1999 ; Pascual et Guichard, 2005).

Ainsi, en physique, la criticité est caractérisée par l'existence de nombreux états stables, qui se présentent à des valeurs bien précises (ou valeurs critiques) des paramètres de contrôle. En franchissant ces valeurs exactes, et seulement dans ces cas, sous forçages extérieurs ou non, ces structures de cohérence apparaissent.

3.1.2.3 Dans le domaine de l'écologie

En écologie, la criticité correspond à la phase précédant le changement d'état du système, lié à une perte de stabilité, et repose en partie sur des concepts dérivés de ceux développés précédemment en physique et mathématiques.

Un écosystème est un système complexe, ouvert et non linéaire, qui évolue dans le temps. Il est d'une part régi par des processus internes qui lui assurent ses fonctions de régulation, de production, d'habitat et d'informations (De Groot *et al.*, 2002 ; Ekins, 2003 ; Ekins *et al.*, 2003). Mais il est d'autre part soumis à des facteurs extérieurs (*e.g.* climat, apport en nutriments) qui altèrent sa stabilité et peuvent le faire évoluer dans une direction différente, dans une nouvelle configuration, parfois indésirable. Ce phénomène est étroitement lié à la présence (ou l'absence) de multiples états de stabilité. En effet, il est admis que certains écosystèmes possèdent au minimum deux états stables (domaines de stabilité), dits « alternatifs » (May, 1977 ; Scheffer *et al.*, 2001 ; Scheffer et Carpenter, 2003 ; Walker et Meyers, 2004). Au sein de chacun de ces domaines, le système peut fluctuer, sans pour autant perdre sa structure qualitative et s'effondrer. Il est donc stable sans se trouver dans un état d'équilibre (Aschan-Leygonie, 2000).

Lorsque le système est soumis à une perturbation, soit il est capable de l'incorporer dans son fonctionnement en changeant, soit il se détruit à plus ou moins long terme (FIGURE 3.2).

Dans le cas de systèmes ne possédant qu'un seul état de stabilité, la réponse se manifeste soit (A) de manière régulière, continue (sans heurt) et réversible. Le système a un comportement résilient et il n'y a pas de changement de sa structure qualitative. Elle peut également se traduire (B) de manière forte et irréversible, par un basculement du régime à l'approche d'un seuil critique, après un temps plus ou moins long d'inertie. Le système est capable d'incorporer la perturbation dans son

3. DE LA CONCEPTUALISATION DE LA CRITICITÉ DES ÉTATS DE BASSES EAUX À LA DÉFINITION D'UN NIVEAU DE TENSION SUR LA RESSOURCE EN EAU

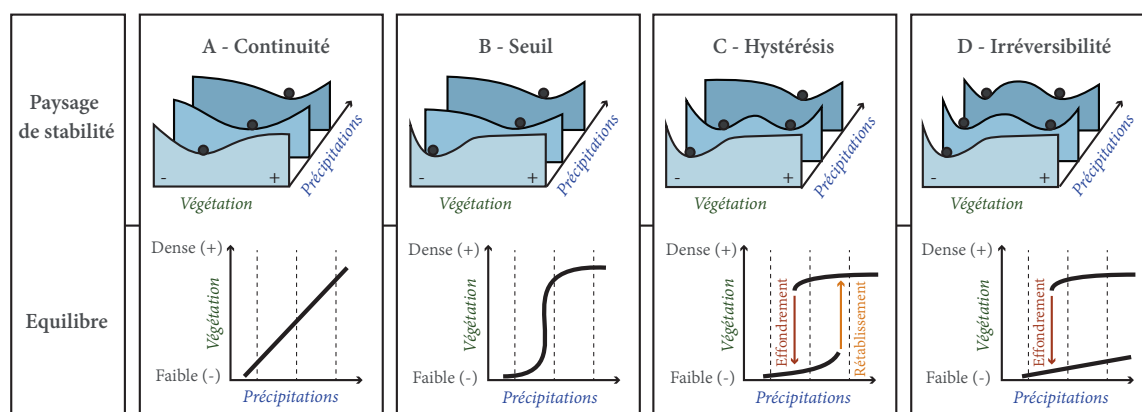


FIGURE 3.2 : LES DIFFÉRENTES RÉPONSES D'UN ÉCOSYSTÈME AUX PERTURBATIONS (MODIFIÉ D'APRÈS GORDON ET *al.*, 2008)

fonctionnement pendant un certain temps, entraînant une évolution significative des paramètres, qui, poussés à une valeur critique, le font basculer radicalement.

Pour les systèmes possédant au moins deux états stables alternatifs, séparés par un état d'équilibre instable, (D) le passage d'un état stable à l'autre ne peut se faire que de manière brutale, par des sauts soudains (May, 1977 ; Scheffer *et al.*, 2001 ; Scheffer et Carpenter, 2003 ; Walker et Meyers, 2004). Le basculement de régime survient lorsqu'un niveau seuil d'une des variables de contrôle (*e.g.* concentration en nutriments) est dépassé. Le système change alors de direction (*i.e.* bifurcation catastrophique de Thom) ou de domaine de stabilité, c'est-à-dire de structure qualitative. En d'autres termes, les processus internes du système ayant été modifiés, l'état global de ce dernier se déplace dans une nouvelle direction, vers un nouvel état stable.

Cependant, le changement d'état n'est pas toujours irréversible. La présence de multiples équilibres peut amener le système à présenter une hystérésis : sous certaines conditions environnementales, une rétroaction positive apparaît avec l'établissement d'un état stable alternatif (C).

En écologie, donc dans le cas d'un système complexe et ouvert, c'est-à-dire soumis à des influences aussi bien internes (entre les éléments qui le composent) qu'externes (avec les éléments constituant son environnement proche), la criticité décrit sa distance à l'état critique. Elle caractérise la dynamique d'évolution du système vers un seuil critique variable, déterminée essentiellement par l'état de stabilité initial du système (son éloignement au point d'équilibre), sa capacité à absorber les modifications qu'il subit (résilience comme formulée par Holling (1973)), son organisation interne et l'intensité de la pression exercée sur un ou plusieurs paramètres le contrôlant. Ce n'est que lorsqu'est atteint ou franchi l'état critique, que le système bascule dans un nouvel état (réversible ou non), dans une nouvelle dynamique, cette fois-ci rapide et brutale (bifurcations, sauts catastrophiques).

3.1.3 Mesure du risque

La notion de criticité a été reprise dans l'industrie et élargie aux domaines médical (Lhomme *et al.*, 2013 ; Farges, 2015 ; Blondel et Brunel, 2004), de l'aéronautique (Sagaspe, 2008 ; Catche,

2013 ; Martin, 2015), etc. pour qualifier et quantifier, en termes de sévérité ou de gravité, le risque lié au(x) dysfonctionnement(s) d'une infrastructure (ou système) ou d'un de ses éléments.

Metzger (2004) distingue deux interprétations de la criticité au sens vital et essentiel du terme (Bouchon, 2011). La première considère une infrastructure, un bien, un service comme critique s'il (elle) représente un symbole pour la nation, mais aussi en raison de son rôle indispensable, incontournable et difficilement remplaçable, car contribuant au développement économique, culture, sociétal, etc. La seconde interprétation repose sur la criticité comme concept systémique. C'est le cas notamment d'une infrastructure qui joue un rôle d'intermédiaire, assurant un service nécessaire, et pouvant ainsi engendrer, en cas de dysfonctionnement des dommages à plus large échelle.

La criticité peut d'autre part renvoyer à la notion de source potentielle de crise. L'arrêt ou le dysfonctionnement d'une infrastructure entraînerait un changement d'équilibre. Suivant sa vulnérabilité et ses capacités de résilience, la société se retrouverait en situation de crise (*e.g.* économique, politique). Cela dépend également du niveau d'acceptabilité des conséquences que la société est prête à supporter. Une seconde interprétation renvoie au rôle de certaines infrastructures dans la gestion de crise. La destruction ou le dysfonctionnement de ces infrastructures auraient pour conséquence majeure une aggravation de la situation de crise (Marchais-Roubelat, Defeuille, 2003 *in* Bouchon, 2011).

La criticité du système définit ici un niveau d'exigence par rapport à la tolérance aux pannes et s'exprime généralement par le produit de la fréquence d'un évènement (ou d'une défaillance) et sa gravité. En d'autres termes, sur la base de l'acceptabilité sociale d'un risque, elle est une mesure de sa gravité.

3.2 La notion de criticité appliquée aux basses eaux

En concevant une situation de basses eaux comme un état de « manque hydrologique », c'est-à-dire un état pour lequel le débit est inférieur à la somme des demandes naturelles et anthropiques, quels que soient le lieu et le moment, il est alors possible d'envisager une gradation des niveaux de pénurie en eau : sous-critique, critique et surcritique.

3.2.1 Criticité relative *vs.* criticité absolue

Selon le cadre conceptuel défini dans le premier chapitre, les basses eaux constituent un phénomène qui décrit un équilibre fragile entre ressources disponibles et besoins naturels et anthropiques. L'analyser revient alors à considérer un système complexe et dynamique, qui évolue au gré des fluctuations internes (*e.g.* régime hydrologique) et des pressions extérieures (*e.g.* climat, démographie).

De ce point de vue, l'état critique de basses eaux correspond à une situation de pénurie qui affecte le milieu physique (*e.g.* état d'assec des cours d'eau) et l'ensemble des usages (*i.e.* application des mesures de restriction). Cette dernière pourrait être abordée en termes de **criticité absolue**. Il est

également possible de considérer l'existence de plusieurs états critiques propres à chacun des usages de l'eau, mais il suffit que l'un de ces usages soit affecté pour considérer que la situation peut être, globalement, critique. Le cas échéant, ferait alors référence à un état de **criticité relative**.

La criticité traduit ainsi le risque de voir émerger une situation de sécheresse, ou par extension, de pénurie en eau, définie d'abord localement puis globalement, et qui rend compte de l'état qualitatif et quantitatif de la ressource pour chacun ou l'ensemble des usages de l'eau.

3.2.2 La combinaison d'états probabilités

Une hypothèse fondamentale supplémentaire sur laquelle repose ce travail admet que les situations de basses eaux connues, c'est-à-dire révélées par l'analyse statistique des chroniques historiques (ou issues des archives, de témoignages passés, de retours d'expérience, etc.) des variables retenues, correspondent à des distributions gaussiennes.

Par ailleurs, les facteurs intervenant dans la genèse des états de basses eaux étant multiples et divers, il est possible de les traiter en équivalents ceci ou cela, ou bien de les aborder sous forme de probabilité, ce qui est l'option retenue ici.

Sur ces postulats, et en admettant que le phénomène de basses eaux présente une combinaison particulière de distributions de probabilités aux différentes échelles spatiales et temporelles, définir un état de basses eaux reviendrait alors à évaluer les facteurs en fonction de leurs probabilités d'occurrence, puis à croiser ces fréquences expérimentales. Le niveau de criticité, sous cette forme probabiliste, serait alors une mesure statistique du manque hydrologique au regard des besoins naturels et anthropiques, donc une évaluation du degré de pénurie en eau. Sur ces bases, il devient possible d'envisager un risque potentiel d'atteindre un niveau critique particulier.

L'approche statistique probabiliste présente l'avantage de traduire toutes les variables dans une unité commune, autorisant de fait leur comparaison et facilitant d'autre part leur combinaison. Elle semble, de plus, être bien adaptée à la problématique des basses eaux. En effet, il s'agit d'un phénomène fréquent et qui présente une certaine régularité, rendant particulièrement difficile la discrétisation intuitive des états possibles. Aussi, le traitement statistique des situations passées serait susceptible de révéler, de manière objective, un état moyen et un nombre important d'états proches de la moyenne, mais surtout, de mettre en lumière des états marqués dans l'humide comme dans le sec. Enfin, cette approche offre la possibilité de mener l'analyse d'une variable même dans le cas où la chronique qui la renseigne présenterait des discontinuités. En effet, la variable est traitée chaque année de manière indépendante, ce qui signifie que les années lacunaires ou non mesurées ne sont pas prises en compte. Cette démarche implique de fait que plus il y aura d'années mesurées, plus stable sera la distribution, et plus le crédit accordé à la modélisation statistique sera important.

Enfin, selon cette logique, il est possible de conjecturer qu'une description peut être faite en termes gaussiens des modalités de fonctionnement, notamment sur le temps long (30 ans par exemple) de chacun des hydrosystèmes (bassin versant, aquifère) en situation de basses eaux dont rendraient compte les points d'observations (section de rivière, source, puits). Sur cette base, il est sup-

posé possible de définir en termes de fréquences de retour, ou plus simplement en fonction du paramètre de dispersion de la loi de Gauss (écart-type), dans quelle situation statistique se trouve chaque facteur de chaque hydrosystème, ou en d'autres termes quelle est la distribution statistique de leurs états de basses eaux. Il semble ensuite possible de combiner ces informations afin de la définir à un second niveau, qui est celui de l'intégration spatiale (voir CHAPITRE 10).

Sur ces fondements théoriques, il paraît envisageable d'établir pour une année, un mois, ou une période temporelle à définir, l'écart à la distribution statistique des états de basses eaux de chaque point d'observation, et au bout du bout l'écart pour une région.

3.2.3 Vers des seuils de criticité des basses eaux

En supposant que les informations choisies pour renseigner la situation de basses eaux puissent être ramenées à une distribution gaussienne ou subgaussienne (par anamorphose), des seuils statistiques pourraient alors être fournis par les écarts à la moyenne (écarts-type (σ)), de sorte que :

- $[0 - 1 \sigma]$ la situation est normale – État normal (au sens statistique, avec $0 = \bar{x}$ et \bar{x} la moyenne) ;
- $[1 - 2 \sigma]$ la situation est à surveiller – État sub-critique ;
- $[2 - 3 \sigma]$ la situation est problématique – État critique ;
- Au-delà de 3σ la situation est catastrophique – État super-critique.

Toutefois, une telle approche présente des contraintes. Il n'est pas exclu, dans un premier temps, que l'information issue de certaines variables ne puisse pas être rapportée à une distribution gaussienne.

Le cas échéant, il conviendra de complexifier le processus de transformation de la donnée brute afin que l'information finale réponde aux exigences de la méthode. Cette alternative devrait introduire toutefois une nouvelle contrainte, relative au manque d'intuitivité de la démarche, notamment si cette dernière est employée à des fins opérationnelles de gestion de l'eau.

De plus, si le choix de l'écart-type, comme unité commune aux indicateurs, est préféré, car il autorise une discrimination moins arbitraire des seuils et apparaît pertinent dans le cadre de la réflexion et de la recherche menées sur les basses eaux, il peut toutefois se révéler inadapté (*i.e.* peu compréhensible) selon le public visé. Pour s'affranchir de cette limite, plusieurs options peuvent être suggérées : la première repose sur la définition de seuils à partir de tiers (*e.g.* base réglementaire, expertise, attentes des autorités locales). Une deuxième alternative consiste à transformer l'échelle de dispersion en échelle arithmétique, c'est-à-dire à associer à la valeur de chaque écart-type une valeur plus intelligible (*e.g.* un pourcentage). De même, le recours à une unité standard, accessible à une grande majorité, tel un volume, peut être envisagé. Cela suppose, dès lors, que l'ensemble des variables du système considéré puisse être traduit dans ces nouveaux termes, et que l'information, ainsi exprimée, puisse, dès lors, être ramenée à une distribution gaussienne.

De toute évidence, la mobilisation de proxys sera, dans certains cas, inévitable. D'une part, si une variable ne peut être traduite en volume et/ou ramenée à la distribution statistique choisie. D'autre

part, si les données relatives à l'une des variables ne sont pas disponibles, que ce soit en quantité (profondeur historique), en termes de représentativité (existence de données départementales uniquement pour une information locale souhaitée, par exemple), ou encore si l'une des variables est renseignée de manière qualitative.

3.3 Détermination de l'état de tension sur la ressource en eau

Si un état de criticité des basses eaux, comme étant la mesure du « manque hydrologique », peut être apprécié en fonction de l'offre et de la demande environnementale et humaine en eau, une situation de tension sur la ressource en eau ne peut, quant à elle, être définie sans la prise en compte de l'évaluation subjective des usagers de l'eau de ce même état.

Étendre la réflexion sur une situation de basses eaux, pour être en mesure d'appréhender des tensions potentielles sur la ressource, revient donc à rendre compte des attentes et du regard porté par les consommateurs, de même que de l'évaluation de la situation par les gestionnaires de l'eau. Une situation de tension est ainsi susceptible d'émerger lorsque la situation perçue n'est pas en adéquation avec la situation « réelle », ou encore lorsque les décisions prises par les acteurs locaux ne semblent pas justifiées.

Pour illustrer ce premier propos, prenons l'exemple de l'usage ludique de l'eau, restreint ici à la baignade. L'étude des basses eaux peut révéler un état sous-critique, soit une situation normale, qui traduit une disponibilité en eau en quantité et qualitativement suffisante (soit un écart positif – excédentaire), mais être appréciée par les usagers de l'eau comme insatisfaisante si ces derniers observent la présence massive d'algues vertes. En conséquence, bien que la ressource soit propre à une consommation ludique, les sites de baignade seront susceptibles d'être désertés.

L'évaluation de la situation des décideurs publics peut quant à elle être illustrée par les « arrêtés-cadres sécheresse ». Comme cela a été mentionné précédemment, la mise en application de mesures exceptionnelles de limitations ou de restrictions des usages de l'eau inadaptée à la situation évaluée, peut conduire à l'incompréhension des usagers de l'eau, créer ou renforcer des tensions et participer à l'émergence de conflits entre usages et entre usagers et autorités.

Conclusion — L'évaluation d'un état de « basses eaux », dans son intégralité, peut être représentée au travers d'un schéma qui intègre de manière synthétique l'ensemble des concepts et des éléments constitutifs du système tel qu'il a été défini graduellement au cours des trois précédents chapitres (FIGURE 3.3).

Le penchant hydrologique, qui correspond à la ressource en eau disponible (à la fois qualitative et quantitative), peut être traduit par un indice d'offre. Le manque hydrologique, défini par le rapport entre l'offre et la demande sociétale et environnementale (définie par un indice de demande), dont l'écart négatif peut être gradué en termes de niveaux de criticité, est donné par l'indice de criticité. La criticité, appliquée au concept de basses eaux, est donc la mesure du manque hydrologique, ou le

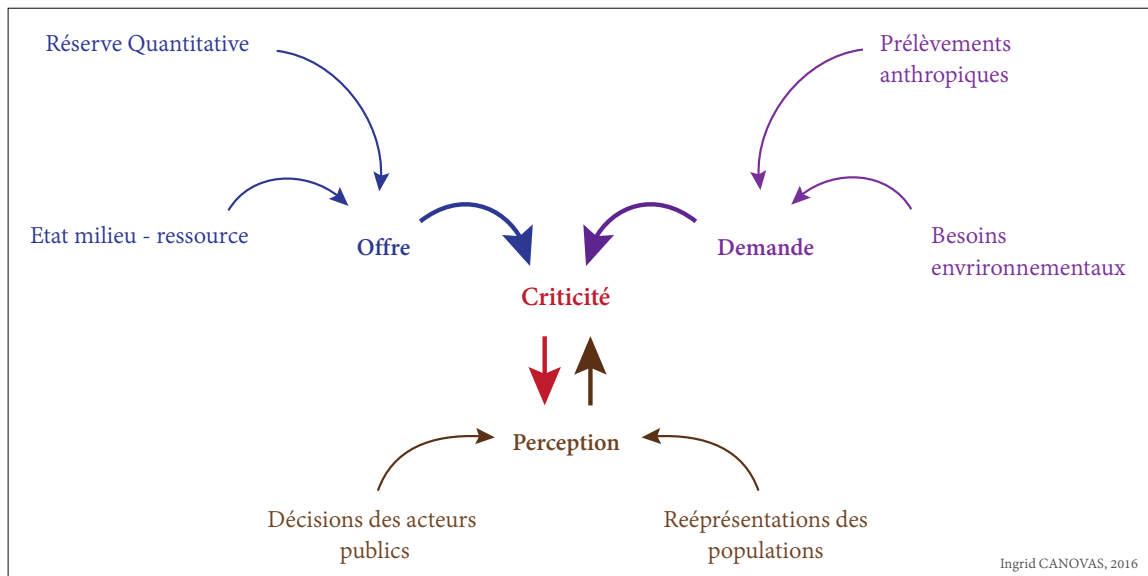


FIGURE 3.3 : SCHÉMA CONCEPTUEL DU SYSTÈME « BASSES EAUX »

degré de pénurie en eau. Enfin, l'état de tension sur la ressource correspond à l'évaluation du niveau de manque hydrologique (état de criticité) mis au regard de la perception sociale (*e.g.* des autorités publiques, des gestionnaires de la ressource, des usagers), soit au degré d'adéquation entre le niveau de pénurie en eau mesuré et perçu.

Théoriquement, et sur ces bases, la situation devient, par conséquent, évaluable à tous les niveaux (*e.g.* local, bassin versant, bassin d'usage, départemental) et dans toutes les temporalités (*e.g.* annuelle, mensuelle, décadaire).

Deuxième partie

DU MODÈLE CONCEPTUEL À LA BASE DE DONNÉES « BASSES EAUX »

Sur les bases conceptuelles exposées, il devient théoriquement possible de définir un état de criticité, et à terme, un niveau de tension sur tout territoire vulnérable (*i.e.* pouvant être affecté par un manque d'eau), donc sur tout territoire méditerranéen, par exemple. Cela étant, il est nécessaire d'identifier au préalable les facteurs contrôlant l'état des basses eaux à différentes échelles. Cela revient à déterminer *a priori*, à l'aide de la littérature et de connaissances expertes, leur représentativité spatiale ou leur champ d'action.

Pour cela, la réflexion prend appui sur les approches développées pour l'analyse des risques et les études de danger (Tixier *et al.*, 2002), lesquelles suggèrent de décomposer le système (*i.e.* cadre structurel) afin d'en fixer les limites, d'en identifier les éléments structurels et de déterminer leurs liens (*i.e.* hiérarchie) et leur nature (*e.g.* flux, processus, état).

La démarche est déclinée ici sur trois niveaux d'observation homogènes : l'aire régionale (zone climatique), le bassin versant (unité hydrologique), et le bassin d'usage de l'eau (*e.g.* emprise locale – communale, linéaire du cours d'eau). Pour chacune des échelles considérées, les facteurs d'influence sont ensuite synthétisés au travers de variables (dites essentielles) relatives à l'offre, la demande et la perception.

Ainsi, un état de basses eaux peut être aussi bien défini par des facteurs météorologiques (*e.g.* pluie, température), que par des facteurs physiographiques (*e.g.* topographie, géologie). Il est également influencé par la présence humaine, qui se traduit essentiellement par des prélèvements directs (*e.g.* pour l'usage domestique, agricole) et des modifications du milieu naturel (*e.g.* imperméabilisation des sols, variation du niveau de qualité de l'eau). Le système « basses eaux » peut de surcroît être complété par l'intégration de facteurs subjectifs, traduisant la perception sociale de l'état de la ressource, ce qui a un impact fort sur, par exemple, la fréquentation des sites de baignade, le déclenchement des mesures de restrictions, etc.

A l'issue de ce recensement, des modèles spécifiques (à un territoire, une échelle, et/ou un usage) sont conçus, à partir desquels un modèle générique et synthétique (multiscale) est ensuite proposé.

Se pose alors la question des modalités associées au changement d'échelle d'observation, puisque, de toute évidence, toutes les variables n'interviennent pas systématiquement ni avec la même force sur l'état de basses eaux, que ce dernier soit appréhendé localement ou à l'échelle de la région climatique.

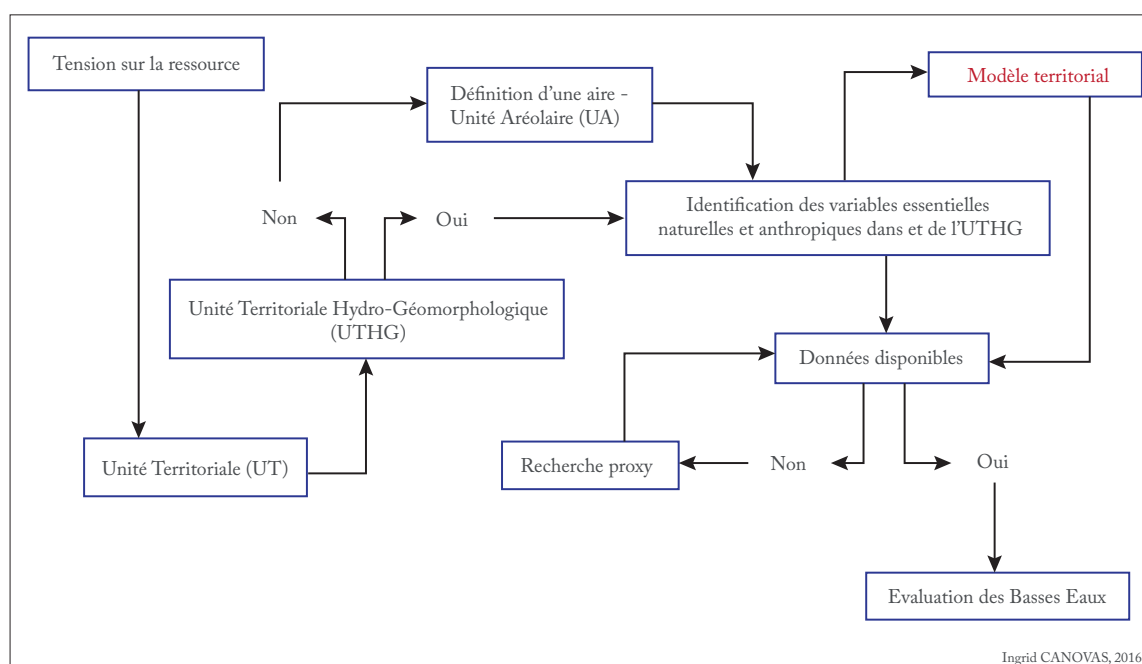
En tenant compte de ces considérations, il devient ensuite possible d'élaborer le modèle spécifique au territoire considéré, par l'activation des variables essentielles représentées dans l'aire concernée. Les étapes de conception sont mises en œuvre ici sur le bassin des Gardons et ses neuf sous-bassins.

Le développement de la méthode est par ailleurs effectué avec l'information disponible, même si celle-ci est manifestement déséquilibrée (les mesures de débit sont infiniment plus nombreuses que les mesures de qualité de l'eau, par exemple, en milieu naturel), et même si cette information

est disparate et dispersée dans de nombreuses bases de données, car produites par différents organismes (*e.g.* Banque hydro, BRGM, ONEMA). Il y a donc là une première difficulté à identifier et à rassembler, puis à mettre en forme, les informations acquises avec des objectifs spécifiques, souvent étrangers à la présente démarche. Dans ce cadre, les manques informationnels les plus flagrants seront soulignés. Cela étant, le recours à cette solution assouplit la mise en œuvre de la démarche (*e.g.* peu coûteuse, peu contraignante, utilisable par tous) et favorise, par ailleurs, son déploiement sur d'autres territoires (recours à des informations communes et donc comparables).

Ces dernières sont ensuite compilées au sein d'une base de données dédiée à l'étude des basses eaux et spécifique au territoire étudié (ici le bassin versant des Gardons). Cette dernière sera à la fois pensée et conçue de manière simple, pour être utilisable par tous, être mise à jour aussi souvent que nécessaire et pour intégrer des informations nouvelles, à toutes résolutions (spatiales et temporelles), de toute nature, et de toute origine.

DES MODÈLES CONCEPTUELS POUR L'ANALYSE MULTISCALEAIRE DES BASSES EAUX MÉDITERRANÉENNES



4.1	Les modèles conceptuels spécifiques à une échelle spatiale donnée	114
4.1.1	Le modèle climatique englobant	116
4.1.2	Le modèle hydrologique synthétique	117
4.1.3	Le modèle anthropique, relatif à l'usage de l'eau (bassin d'usage)	119
4.2	Le modèle conceptuel global multiscalaire	122
4.2.1	Les variables essentielles retenues	122
4.2.2	Le modèle synthétique multiscalaire	124
4.3	Les modalités associées au changement d'échelle d'analyse et à la résolution spatio-temporelle de l'information	126
4.3.1	Le nombre de variables essentielles à considérer	127
4.3.2	La résolution temporelle de l'information véhiculée	130
4.3.3	La résolution spatiale de l'information : les postes de référence	132
4.3.4	Le recours aux proxys	133

La présente réflexion admet la possibilité de mener une analyse multiscalaire (*i.e.* dans différentes échelles tant spatiales que temporelles) pour décrire des états (de criticité) de basses eaux, avec un certain nombre de variables disponibles dans un ou plusieurs espaces emboîtés ou contigus.

Pour ce faire, il est nécessaire, dans un premier temps, de recenser l'ensemble des facteurs qui contribuent à la satisfaction environnementale et sociétale en eau. Chacun d'eux, identifié à l'aide de la littérature et/ou par des connaissances expertes, pourra ensuite être traduit par une variable permettant d'en synthétiser le poids (*i.e.* **variable essentielle** (VE)). À la suite de ce recensement, et après la mise en relation de l'ensemble des VE, des modèles conceptuels, aussi bien spécifiques que globaux, seront conçus.

Toutefois, s'il semble possible d'observer le phénomène à différentes échelles spatiales, ce n'est pas sans compter sur la difficulté liée au changement de niveau d'observation. En effet, plus ce dernier sera étendu, plus les VE pouvant être prises en compte seront englobantes et fortement moyennées, et seul un petit nombre de paramètres pouvant les renseigner sera accessible. Par ailleurs, il faut s'attendre à devoir composer avec des informations hétérogènes, tant de par leur nature (*e.g.* quantitative, qualitative), que par le pas de temps des enregistrements (*e.g.* annuel, mensuel), la profondeur historique des chroniques (*e.g.* 10 ans, 20 ans, un siècle)

Il semble donc indispensable de s'interroger, d'une part, sur les besoins en termes de qualité de la donnée (aussi bien souhaitée que potentiellement disponible) pour définir un état de basses eaux, et, d'autre part, sur les changements qu'il faudra, dans certains cas, opérer afin de répondre à un tel objectif.

Afin d'éviter toute confusion, un rappel des définitions attribuées aux termes utilisés dans la suite de ce travail semble indispensable (FIGURE 4.1).

4.1 Les modèles conceptuels spécifiques à une échelle spatiale donnée

Dans le CHAPITRE 1, les différents facteurs d'influence sur l'état hydrologique des cours d'eau et des réservoirs souterrains, en période estivale notamment, et aux différents niveaux d'observation, ont

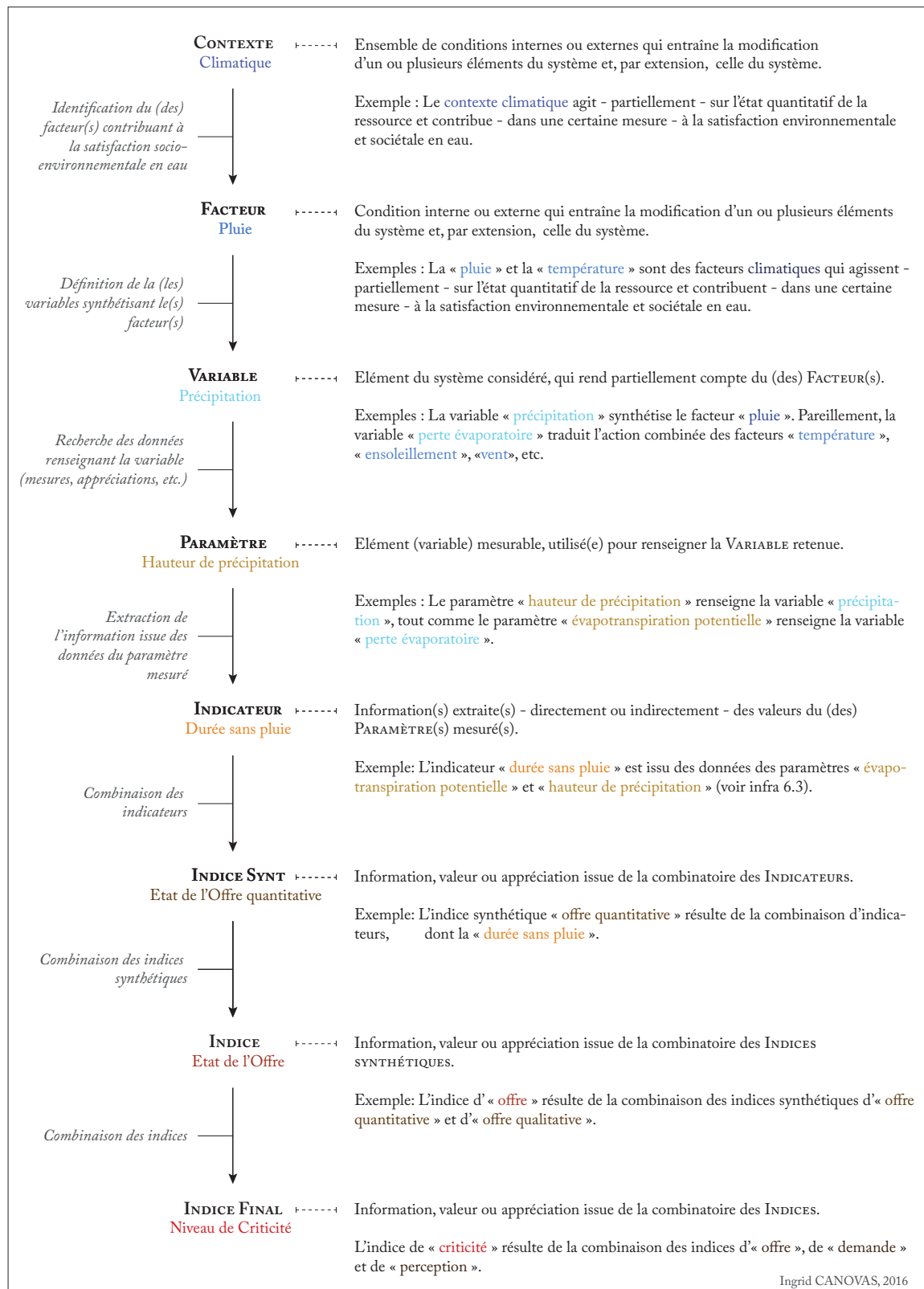


FIGURE 4.1 : DU CONTEXTE À L'INDICE DE CRITICITÉ : DÉFINITIONS

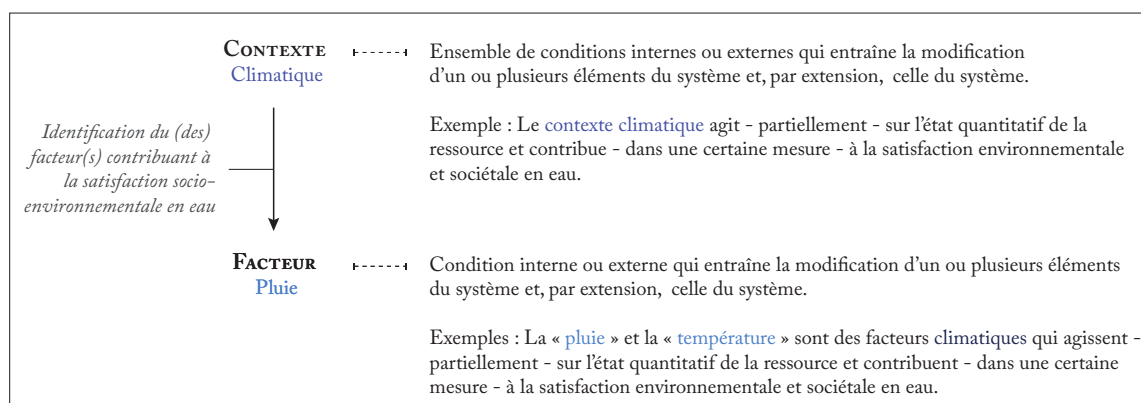


FIGURE 4.2 : DU CONTEXTE AU FACTEUR : DÉFINITIONS

été identifiés. Ces derniers, recensés en nombre important dans la littérature, ne peuvent toutefois pas être pris en compte dans leur totalité, surtout lorsqu'il d'agit de mener une approche qui se veut synthétique.

Préalablement au traitement statistique des informations (*i.e.* des données issues des paramètres mesurés), pour l'élaboration d'indicateurs d'état de basses eaux, il convient donc d'identifier les facteurs qui contribuent majoritairement à la satisfaction en eau des usages anthropiques et des besoins environnementaux (FIGURE 4.2).

Cela revient indirectement, et à terme, à sélectionner les variables jugées essentielles (VE), c'est-à-dire capables d'en exprimer le poids respectif.

Dans un souci d'explicitation de la démarche adoptée, des modèles conceptuels spécifiques sont proposés.

4.1.1 Le modèle climatique englobant

À l'origine du remplissage des différents réservoirs (*e.g.* sol, rivière, barrage), les facteurs climatiques interviennent directement sur l'état de la ressource en eau, plus particulièrement en période estivale, et à toutes les échelles spatiales. Même s'il existe des disparités et des micros-climats (*i.e.* le gradient mer - relief en région méditerranéenne), leur champ d'action demeure relativement large, et dépasse amplement les limites du bassin versant, voire d'un département. C'est la raison pour laquelle, pour une analyse englobante de l'état de basses eaux à petite échelle, les seuls facteurs climatiques, jugés relativement homogènes, peuvent se révéler pertinents.

Parmi ces derniers, la température, l'ensoleillement et les précipitations sont indiscutablement les principaux. En effet, les deux premiers contribuent fortement aux pertes d'humidité et d'eau par évaporation, et donc aux besoins en eau des plantes et des organismes vivants de manière générale. Le dernier, quant à lui, est déterminant pour (1) garantir une réserve suffisante, antérieure à la période sèche, et (2) compenser les pertes et les besoins en eau en été. Leur action est donc opposée, mais l'augmentation du premier couplé à la diminution du second peut entraîner (plus ou moins rapidement) une situation d'insuffisance.

D'autres facteurs peuvent également intervenir, tel le vent par exemple, notamment dans la basse vallée du Rhône. Ils ne sont néanmoins pas inclus ici, la démarche envisagée ne se prétendant pas exhaustive, mais synthétique. Par conséquent, seuls sont pris en compte les facteurs jugés les plus influents. De plus, si un certain nombre de difficultés est déjà à prévoir pour renseigner le nombre réduit de facteurs potentiellement pertinents, dont certains sont étudiés et suivis depuis très longtemps, on peut naturellement supposer qu'il sera d'autant plus délicat de faire l'analyse de facteurs plus spécifiques et très localisés, probablement moins bien renseignés. En revanche, si l'information existe localement, l'approche n'exclut pas leur intégration, notamment dans une étude plus approfondie.

En outre, le modèle conceptuel proposé, visant à mettre en évidence les facteurs intervenant dans l'état de basses eaux à l'échelle régionale, n'intègre que les composantes climatiques dominantes, à savoir les précipitations, l'ensoleillement et la température, ces deux dernières étant à l'origine des flux de chaleur et, de manière plus globale, du processus d'évapotranspiration. Le modèle propose, par ailleurs, une description simple de leurs influences sur l'hydrosystème et, *in fine*, sur la satisfaction sociale et environnementale (FIGURE 4.3).

Pour ce faire, quatre concepts sont utilisés. Ils seront d'ailleurs repris dans les modèles spécifiques présentés par la suite :

- Les **flux** : traduisent la notion de circulation d'énergie, de matière ou d'information entre les éléments du modèle ;
- Les **processus** : doivent être vus, quant à eux, comme des modalités potentielles de transformation des flux qui conduisent certaines variables à certaines valeurs ;
- Les **états** : décrivent la situation interne du modèle ;
- La **finalité** : exprime la dimension téléologique d'un système annexe (mais tout aussi important) qui, dans le cas présent, renvoie à la satisfaction de l'ensemble des besoins en eau.

L'action très large exercée par les facteurs climatiques les inclut donc dans des approches spatiales plus fines (*e.g.* départementale, bassin versant, communale). En d'autres termes, ils interviennent à toutes les échelles spatiales inscrites dans l'aire régionale.

4.1.2 Le modèle hydrologique synthétique

L'état des réserves superficielles et souterraines en eau est le résultat de processus complexes qui opèrent essentiellement à l'échelle du bassin versant (voir *supra* 1.2.1.2). De fait, outre les forçages climatiques, les facteurs qui interviennent à ce niveau d'observation sur les processus de recharge, de stockage et de vidange de l'eau (*i.e.* ensemble de processus contrôlant la capacité des bassins versants à acheminer, stocker et relâcher de l'eau en périodes sèches), sont à prendre en compte.

Les processus de stockage et de vidange dépendent des caractéristiques physiographiques (déterminées en grande partie par les conditions lithologiques) du bassin. L'état du stock (*i.e.* volume disponible superficiel et souterrain) est fonction du processus de recharge des rivières, des sols et

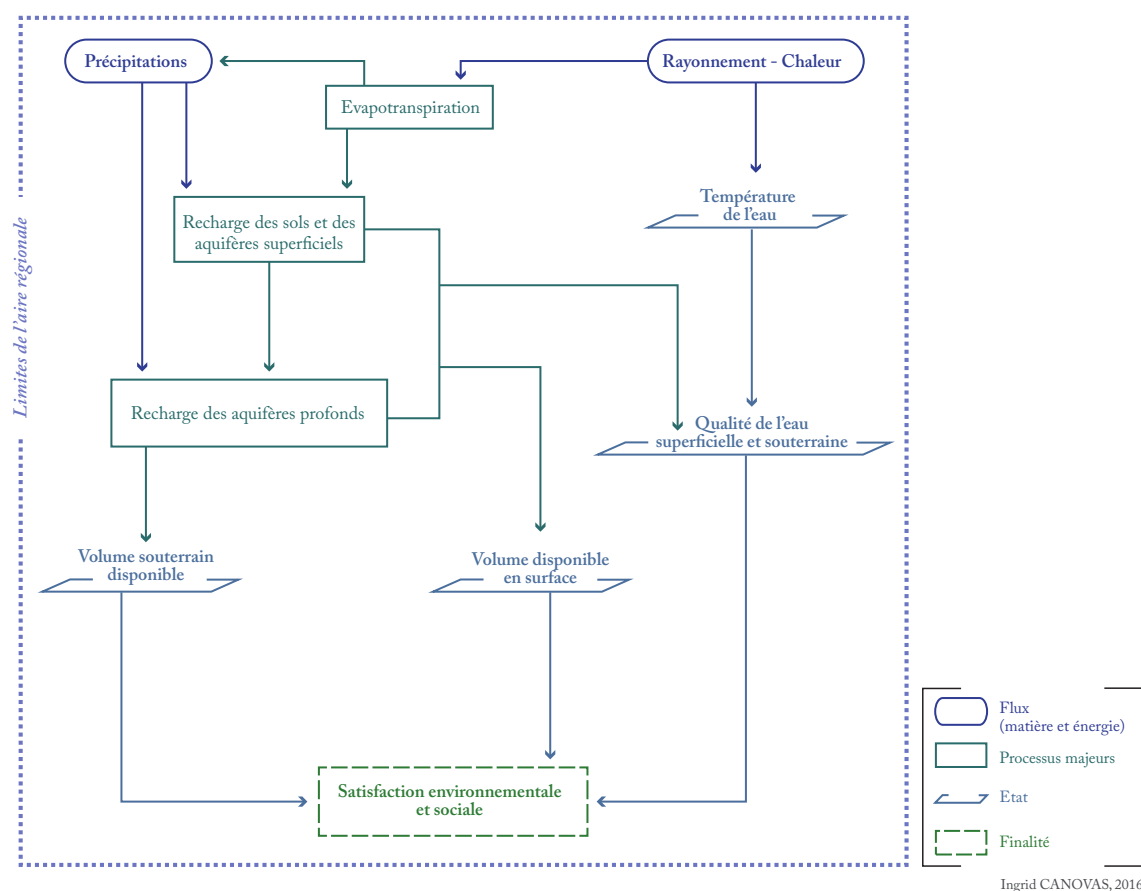


FIGURE 4.3 : STRUCTURE SCHÉMATIQUE DU SYSTÈME « BASSES EAUX » SELON LES SEULES INFLUENCES CLIMATIQUES.

des aquifères, fortement lié à la date des pluies, à leur fréquence, à la quantité et à l'intensité des précipitations.

Il dépend également des pertes attribuables aux températures élevées en période estivale, lesquelles renforcent l'évaporation directe et l'évapotranspiration de la végétation. La capacité de stockage est, quant à elle, conditionnée à la fois par la nature de l'aquifère (*e.g.* source karstique, nappe alluviale), son étendue (*e.g.* taille et épaisseur du réservoir), ainsi que par la structure et la perméabilité (*i.e.* infiltrabilité) des sols. Cette dernière dépend de leurs propriétés physiques (*e.g.* la porosité), et du type de végétation qu'ils portent. Cet état résulte donc du bilan entrée – sortie qui se réalise en permanence, en chaque point du territoire considéré (*e.g.* jusqu'à l'aire régionale).

Par ailleurs, en période sèche, les basses eaux sont principalement alimentées par le drainage ou la vidange des zones saturées (*e.g.* aquifères). Dans ce contexte, la nature des roches et leur altération constituent les principaux facteurs qui contribuent aux mécanismes de maintien des débits estivaux (*e.g.* Granites *vs.* calcaires, arène *vs.* terra rossa).

Par conséquent, le modèle conceptuel visant à caractériser un état de basses eaux, pour la satisfaction des usages environnementaux et sociétaux, à l'échelle du bassin versant, doit introduire, en plus des conditions climatiques, les facteurs qui en déterminent le fonctionnement hydrologique, à savoir les conditions lithologiques. Si ces dernières n'exercent pas d'influence directe sur le niveau

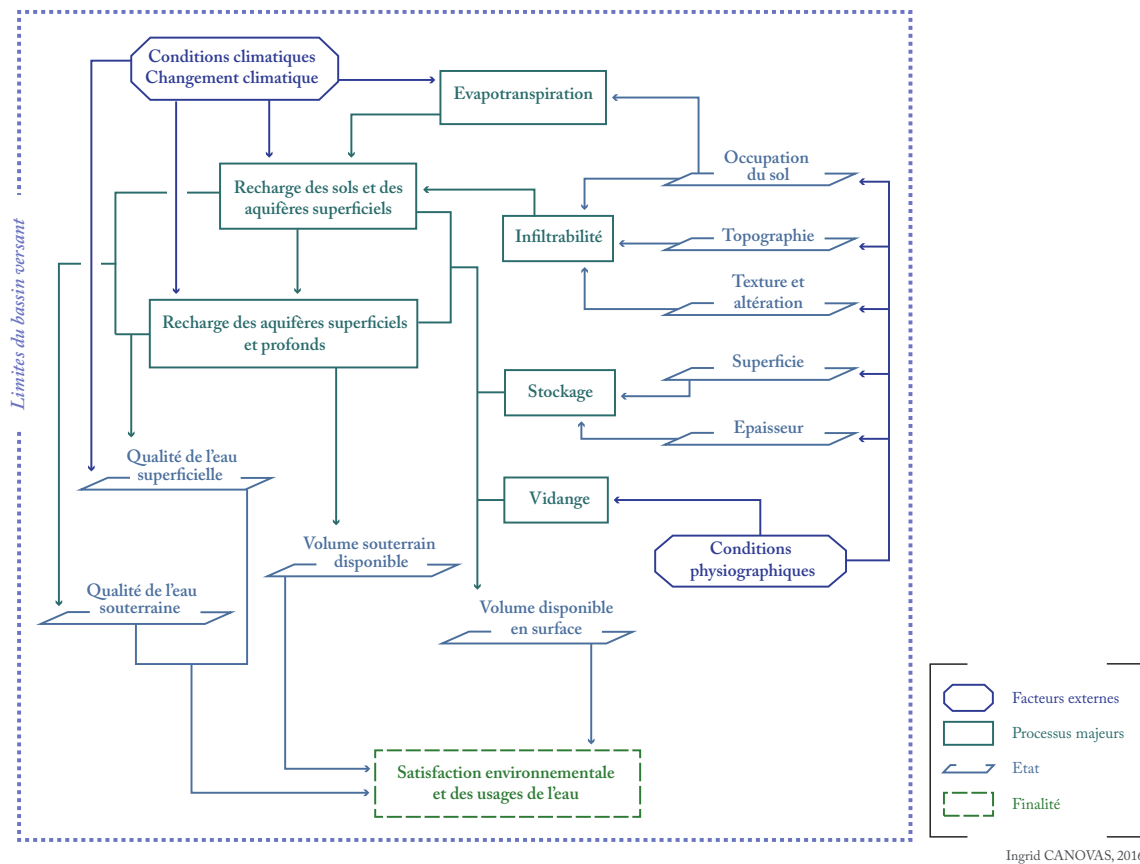


FIGURE 4.4 : SCHÉMA CONCEPTUEL DES RELATIONS ESSENTIELLES DANS UN HYDROSYSTÈME, À L'ÉCHELLE DU BASSIN VERSANT

de satisfaction en eau, elles contribuent néanmoins aux processus (d'infiltrabilité, de recharge, de stockage, etc.) qui opèrent à cette échelle pour garantir un niveau en eau suffisant (FIGURE 4.4).

4.1.3 Le modèle anthropique, relatif à l'usage de l'eau (bassin d'usage)

Les bas débits, dans certains territoires, ne sont plus uniquement le résultat de facteurs naturels (*i.e.* climatiques et physiographiques). Dans les zones anthropisées, ils sont également conditionnés par les modifications engendrées aussi bien par les aménagements et les besoins humains que par le mode de gestion du territoire (voir *supra* 1.2.2), dont la conception évolue dans le temps.

L'action de l'Homme sur l'état de la ressource est multiple. Elle se traduit d'une part par des investissements dans des ouvrages hydrauliques (*e.g.* barrages, retenues collinaires), par des plans de gestion (*e.g.* arrêtés de limitation ou de restriction), ou encore par la mobilisation de ressources externes (*e.g.* canaux interbassins, achat d'eau), au travers de législations et d'institutions.

D'autre part, la demande en eau anthropique correspond au forçage le plus important. Elle dépend de la population (*e.g.* densité) et des pratiques de l'eau, en lien avec les activités humaines (*e.g.* zone industrielle, bassin agricole). En fonction de l'usage de l'eau, qui peut être économique (*e.g.* irrigation, industrie), domestique (*e.g.* AEP), ou encore ludique (*e.g.* canoë, pêche, baignade), les besoins et les attentes seront divergents. À titre d'exemple, les exigences en matière de qualité ne

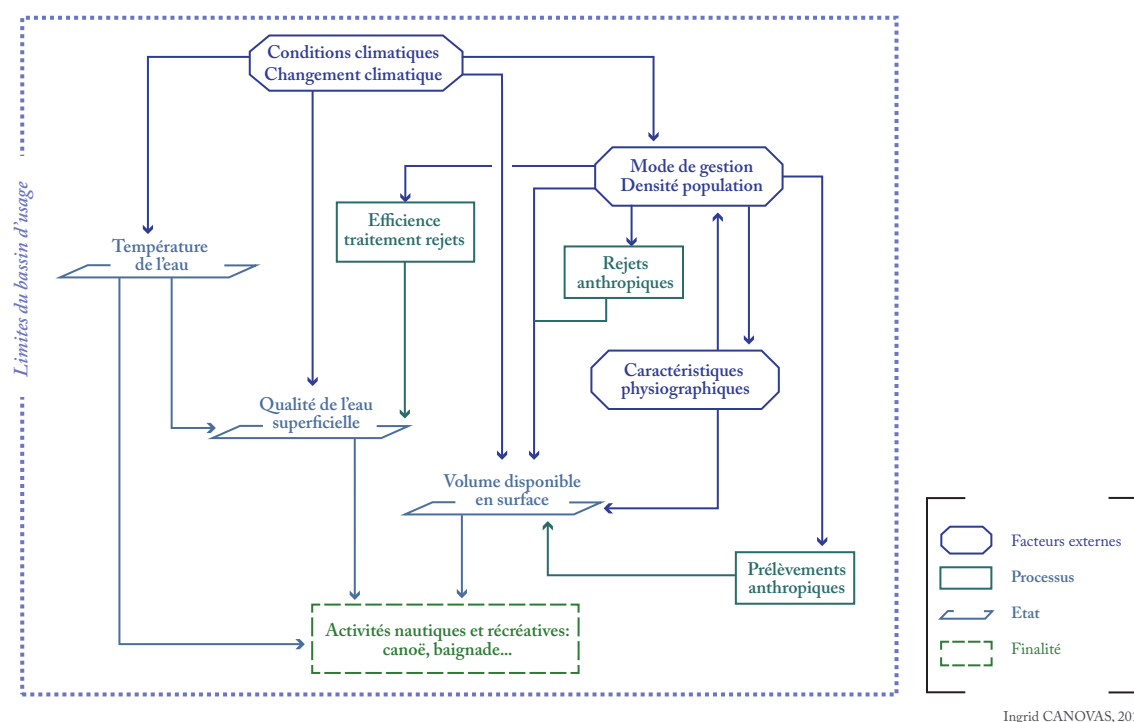


FIGURE 4.5 : SCHÉMA CONCEPTUEL DES RELATIONS ESSENTIELLES POUR LA DÉFINITION D'UN MODÈLE PROPRE À L'USAGE « LUDIQUE » DE L'EAU.

seront pas équivalentes pour une eau destinée à la consommation humaine que pour celle utilisée à des fins de refroidissement des centrales hydroélectriques. Les facteurs d'influence et les variables d'état à prendre en compte seront donc différents, car propres à chaque usage.

Le bassin d'usage est généralement inclus dans les limites du bassin versant. Il est entendu ici comme étant le territoire au sein duquel se concentre un usage de l'eau spécifique, au minimum. En ce sens, la commune correspond au bassin d'usage domestique de l'eau, tandis que la pratique ludique se concentre sur un site de baignade ou une partie du linéaire d'un cours d'eau (pour les activités nautiques), etc. Le modèle synthétique intègre de fait les contextes climatique et physiographique (*i.e.* lithologique), synthétisés par les « facteurs externes » dans la FIGURE 4.4. Dans la mesure du possible, les facteurs qui déterminent le mode de gestion de la ressource (*e.g.* l'efficacité des structures d'épuration des eaux) sont également à prendre en considération, et plus particulièrement ceux contribuant à l'état qualitatif de la ressource, fondamental pour la majorité des usages.

À partir de ce modèle générique, d'autres facteurs spécifiques peuvent être introduits, en lien avec l'usage considéré. Plusieurs modèles peuvent ainsi être déclinés (*i.e.* modèle d'usage ludique de l'eau, modèle d'usage agricole). Pour une pratique ludique de l'eau, par exemple, ce sont les niveaux d'eau, la température et la qualité phytosanitaire qui primeront (FIGURE 4.5).

Suivant une démarche et une logique similaires, un autre exemple peut être donné par le modèle spécifique à la satisfaction environnementale (FIGURE 4.6). Sensiblement identique à celui de l'usage ludique de l'eau, il introduit à la fois le contexte climatique, qui détermine la quantité et la

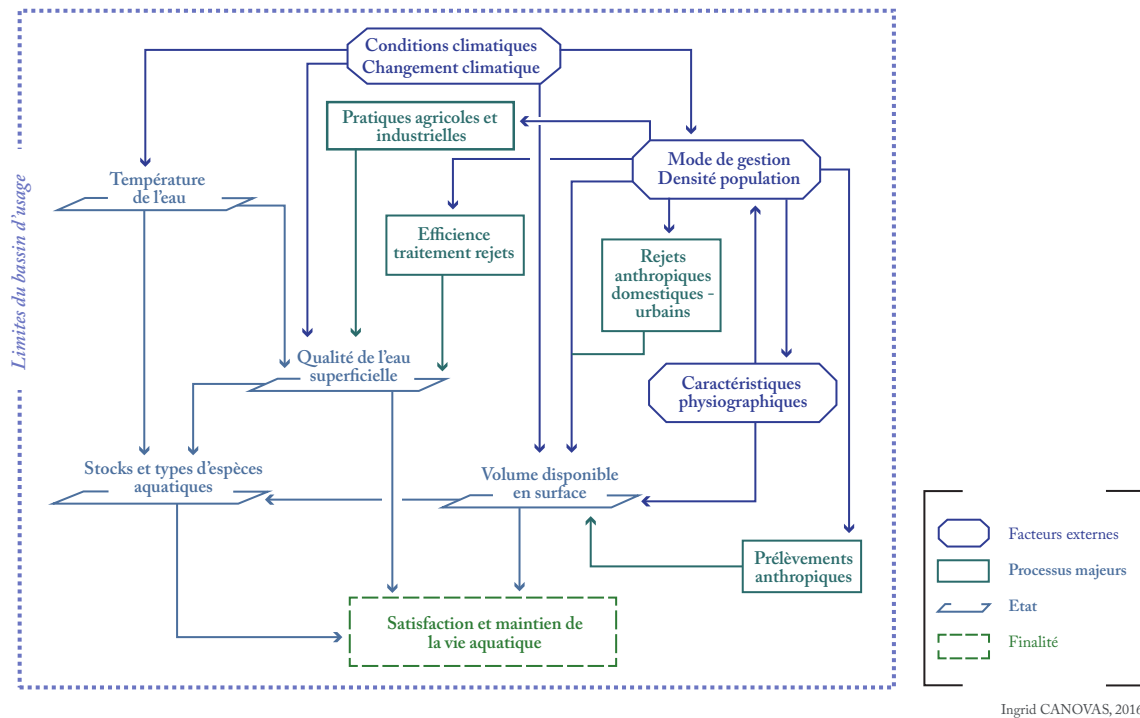


FIGURE 4.6 : SCHÉMA CONCEPTUEL POUR LA DÉFINITION D'UN MODÈLE SPÉCIFIQUE À LA VIE AQUATIQUE.

qualité de l'eau (*e.g.* potentiel de dilution des pollutions, température de l'eau), ainsi que le contexte lithologique. Toutefois, les critères qualitatifs pris en compte ne sont pas identiques. En effet, la qualité de l'eau superficielle pour la baignade (*i.e.* état bactériologique) n'est pas évaluée à partir des mêmes paramètres que ceux utilisés pour apprécier la qualité biologique et physico-chimique de l'eau (*e.g.* présence de nitrates, de pesticides, de métaux lourds), primordiale pour assurer le maintien de la vie aquatique et humaine. C'est pourquoi, en addition de l'efficacité des structures d'épuration des eaux, les pratiques et effluents agricoles et industriels sont à intégrer dans le modèle.

Conclusion — La démarche partant de la finalité recherchée, c'est-à-dire de la satisfaction environnementale et sociétale en eau, majoritairement déterminée par les niveaux (superficiel et souterrain) d'eau et leur qualité, a permis d'identifier les principaux facteurs de contrôle climatiques, physiographiques et anthropiques agissant sur l'état final de la ressource en période de basses eaux.

À partir des besoins définis en matière d'exigence qualitative et quantitative, propre à chacun des usages, les modèles élaborés sont plus ou moins complexes. Toutefois, dans certains cas, plusieurs indicateurs spécifiques (à un usage et à une échelle d'observation) seront associés à un même facteur ou à une même variable essentielle. À titre d'exemple, la « qualité de l'eau » devrait contribuer, au minimum, à deux indicateurs. Pour renseigner le modèle propre à l'usage ludique de la ressource en basses eaux, un premier indicateur, qualitatif, sera construit sur la base de données renseignant la qualité des eaux de baignade, définie selon des normes bactériologiques réglementaires. De la même manière, un second indicateur, quantitatif, sera élaboré sur la base d'un élément chimique jugé dé-

terminant (*e.g.* nitrate, pesticides), pour renseigner le modèle propre à la consommation domestique et à la satisfaction des besoins de la vie aquatique, etc.

4.2 Le modèle conceptuel global multiscaleaire

À partir des facteurs qui interviennent dans la satisfaction des usages de l'eau, toutes échelles confondues, une base conceptuelle du système « basses eaux » est proposée, adaptable au territoire choisi pour l'étude. Le modèle conceptuel global reprend ainsi les composantes du système, jugées indispensables pour évaluer l'état de la ressource en période de basses eaux pour satisfaire la demande sociétale et environnementale (*i.e.* les variables essentielles). Ces variables sont issues de l'ensemble des modèles spécifiques, et dont quatre viennent d'être présentés.

Ce modèle générique global est élaboré de manière à correspondre à (1) une réalité de modélisation, en se référant à des variables d'entrée, de sortie et d'état (qualitatif et quantitatif); (2) la définition proposée des basses eaux, en traitant des indicateurs d'offre et de demande en eau.

4.2.1 Les variables essentielles retenues

Pour définir un état de basses eaux, 14 variables, considérées comme essentielles ou indispensables (VE), sont retenues des modèles présentés (FIGURE 4.7). Elles sont ici abordées comme les composantes des dimensions d'offre, de demande et de perception. Dans les schémas synthétiques, elles seront également spécifiées en termes propres à une démarche de modélisation (*e.g.* entrée, sortie).

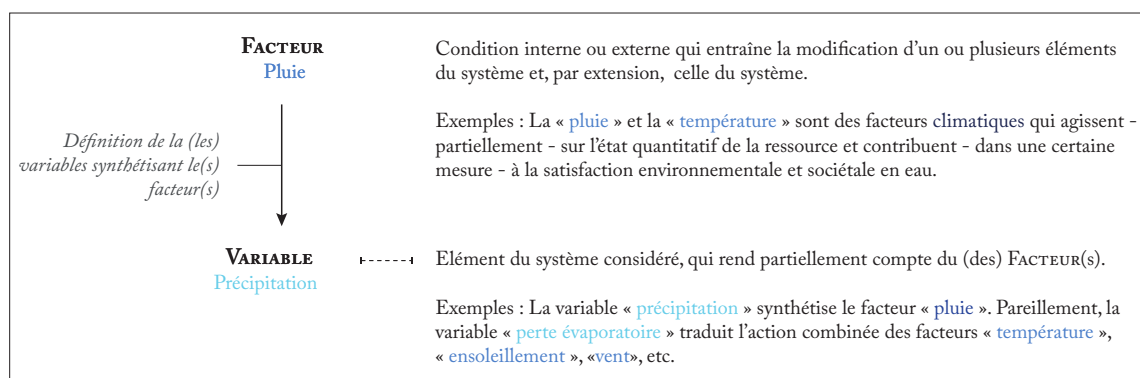


FIGURE 4.7 : DU FACTEUR D'INFLUENCE À LA VARIABLE ESSENTIELLE : DÉFINITIONS

4.2.1.1 Les variables d'offre

L'offre, ou l'état à la fois quantitatif et qualitatif du (des) stock(s) présent(s) sur un territoire, peut être déterminée par sept variables essentielles (VE), synthétiques et relatives à :

- **L'offre quantitative** (*i.e.* l'état de stock quantitatif), caractérisée par :
 - les précipitations,

- le volume en eau disponible en surface (*e.g.* le niveau des rivières),
- le volume en eau souterraine disponible (*e.g.* le niveau des nappes),
- le volume disponible dans les retenues anthropiques (*e.g.* le niveau des barrages),
- les apports extérieurs (*e.g.* le volume en eau importé).
- **L'offre qualitative** (*i.e.* l'état de stock qualitatif), définie par :
 - la qualité de l'eau superficielle (bactériologique, biologique et/ou physico-chimique),
 - la qualité de l'eau souterraine (bactériologique, biologique et/ou physico-chimique),
 - la qualité de l'eau de pluie (acidité, aérosols, etc.)

4.2.1.2 Les variables de demande

La demande est, dans son ensemble, définie par les flux de sortie, au travers de quatre variables essentielles (VE), synthétiques et relatives à :

- **La demande anthropique**, correspondant à :
 - l'ensemble des utilisations humaines, qu'elles soient à finalité agricole, industrielle ou domestique.
- **Les besoins environnementaux**, principalement imputables à :
 - la demande du climat (*e.g.* l'évapotranspiration potentielle (ETP)), liée à la température, à l'ensoleillement et au vent,
 - la demande environnementale (*e.g.* le volume à préserver pour une bonne qualité du milieu aquatique),
 - à l'alimentation des aquifères, parfois dans un contexte karstique.

4.2.1.3 Les variables de perception

Si un état de criticité des basses eaux peut être apprécié en fonction de l'inadéquation entre l'offre et la demande environnementale et humaine en eau, une situation de tension sur la ressource ne peut, quant à elle, être évaluée sans la prise en compte de l'évaluation subjective des usagers. En effet, une situation de tension, voire de danger, est susceptible d'émerger lorsque la situation perçue n'est pas en adéquation avec la situation « réelle ». Lorsque les décisions prises par certains acteurs locaux ne semblent pas justifiées, une opposition plus ou moins forte peut se manifester.

Étendre la réflexion sur une situation de basses eaux, pour être en mesure d'appréhender des tensions potentielles sur la ressource, revient donc à rendre compte, à la fois :

- De la **représentation des populations**, c'est-à-dire des attentes et du regard portés par les usagers, au travers de :
 - la fréquentation touristique, et plus particulièrement de celle des sites de baignade,
 - des images de santé et de sécurité, que renvoie la situation évaluée.

- Des **décisions des acteurs publics**, c'est-à-dire de l'évaluation de la situation par les gestionnaires de l'eau, au travers :
 - de recommandations,
 - d'arrêtés de limitation ou d'interdiction provisoire des usages de l'eau.

4.2.2 Le modèle synthétique multiscaleaire

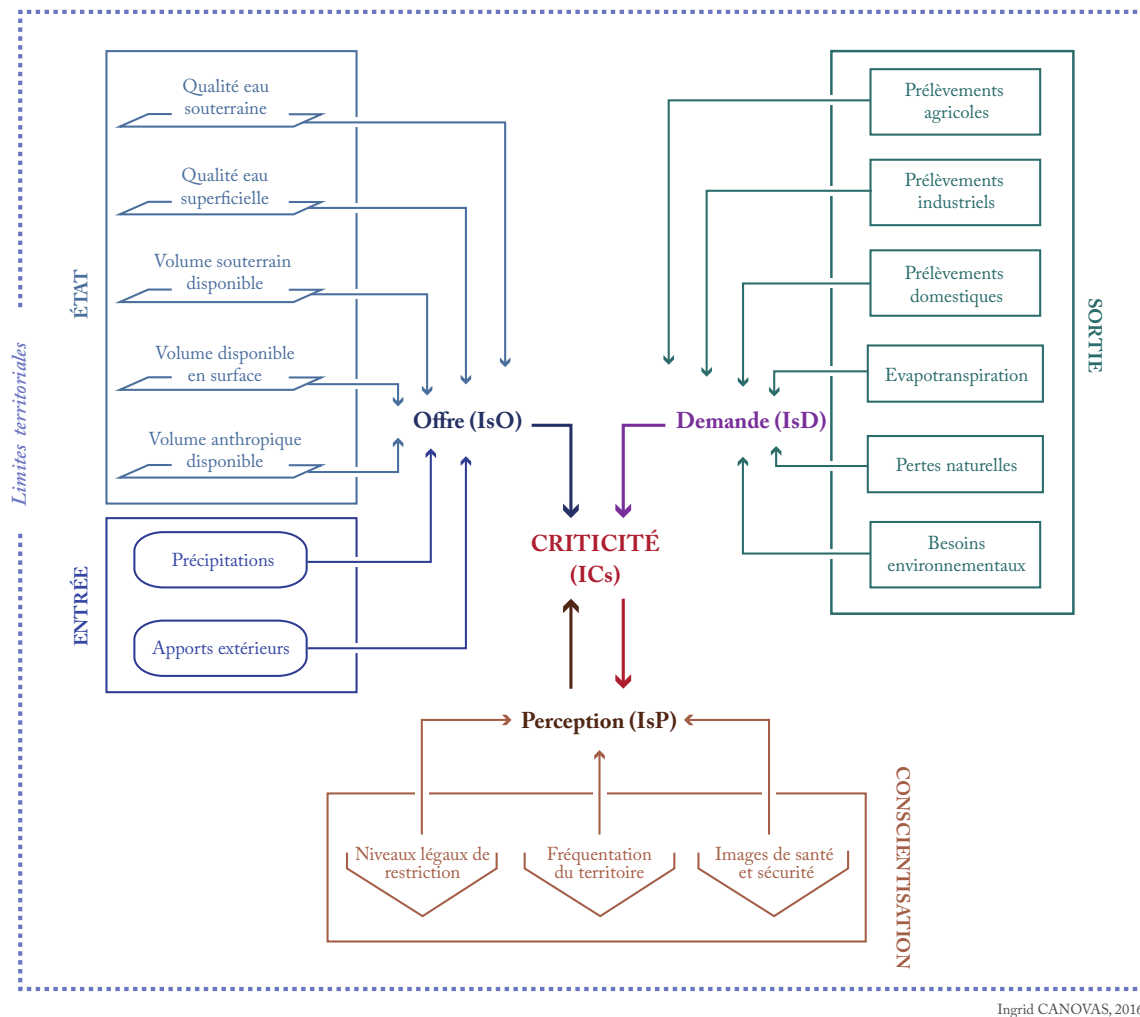
Ainsi, pour l'évaluation d'un état de « basses eaux », intégrant la dimension réflexive (FIGURE 4.8), jusqu'à quatorze variables (en regroupant l'ensemble des prélèvements anthropiques) peuvent être mobilisées, synthétisant :

- La ressource en eau disponible (à la fois qualitative et quantitative), traduite par un indice d'Offre (IsO) ;
- Le besoin sociétal et environnemental en eau, traduit par un indice de Demande (IsD) ;
- Le rapport entre l'offre et la demande socio- environnementale, donné par l'indice de Criticité (ICs), et équivalant à un degré de manque hydrologique ;
- L'état de tension sur la ressource correspondant à l'évaluation de l'état de criticité (ICs) mis en regard de la Perception (IsP), soit au degré d'adéquation entre les niveaux de pénurie en eau « mesuré » et « perçu ».

À partir de ces cadres théoriques, un schéma simplifié de l'évaluation de la criticité de la situation de basses eaux est proposé (FIGURE 4.9). Il structure, selon les enjeux et les problématiques territoriales, cette évaluation :

- À tous les niveaux (*e.g.* local, bassin versant, bassin d'usage, départemental), par le déploiement d'une partie ou de l'ensemble des variables essentielles proposées, voire encore par l'intégration ou le recours à d'autres descripteurs spécifiques aux six sous-branches du modèle (*e.g.* offre qualitative, offre quantitative) ;
- Dans toutes les temporalités (*e.g.* annuelle, saisonnière, mensuelle, décadaire), selon l'objectif fixé par l'étude (*e.g.* détermination de tendances interannuelles, prévision estivale de l'état de la ressource superficielle) et dans la mesure où les informations exploitées (*e.g.* mesures, appréciations) sont renseignées au pas de temps approprié.

Conclusion — Si ce type de modèle constitue un outil utile pour matérialiser le cadre (*i.e.* limites spatiales et contextuelles) et la structure (*i.e.* les éléments constitutifs et leurs relations) du système « basses eaux », il ne permet en aucun cas de définir le poids de chacune de ses composantes (*i.e.* la dynamique interne) sur l'état final de basses eaux. En effet, si des propositions méthodologiques sont établies ultérieurement pour le traitement individuel des variables essentielles (*i.e.* transformation du paramètre mesuré en indicateur avec des seuils), la réflexion devra nécessairement être étendue aux modalités de leur mise en relation (poids, hiérarchie de leur action (*e.g.* successive, concomitante)) pour la définition d'un indice d'état global.



Ingrid CANOVAS, 2016

FIGURE 4.8 : SCHÉMA GÉNÉRIQUE D'ÉVALUATION D'UN ÉTAT DE BASSES EAUX

En plus de la question du choix de la méthode et du modèle à développer pour déterminer et valider la dynamique des éléments au sein du système, de nombreuses autres interrogations sont susceptibles d'émerger. Il est très probable, par exemple, que la force de chaque indicateur sur le système varie en fonction de l'échelle observée, et/ou selon l'usage considéré.

Par ailleurs, il demeure primordial de penser l'étude dans sa globalité et de ne pas perdre de vue l'objectif final de la recherche, même s'il dépasse le cadre de ce travail. En effet, caractériser un état de basses eaux ne constitue qu'une étape préliminaire, dont la finalité est de prévoir des situations à venir. Il faut donc penser parallèlement l'horizon de prévision possible et la fréquence de mise à jour de l'information. Ces conditions orienteront, elles aussi, les choix à prendre tout au long du déroulement de l'analyse développée ici.

Enfin, pour être en mesure de définir des états de basses eaux, il faut également s'assurer que les variables retenues véhiculent une information à la fois homogène à l'échelle considérée, et pertinente pour décrire le phénomène. Une réflexion sur les modalités de changements de niveaux d'observation et d'analyse doit être aussi menée. Cette dernière est d'autant plus importante qu'elle contribuera,

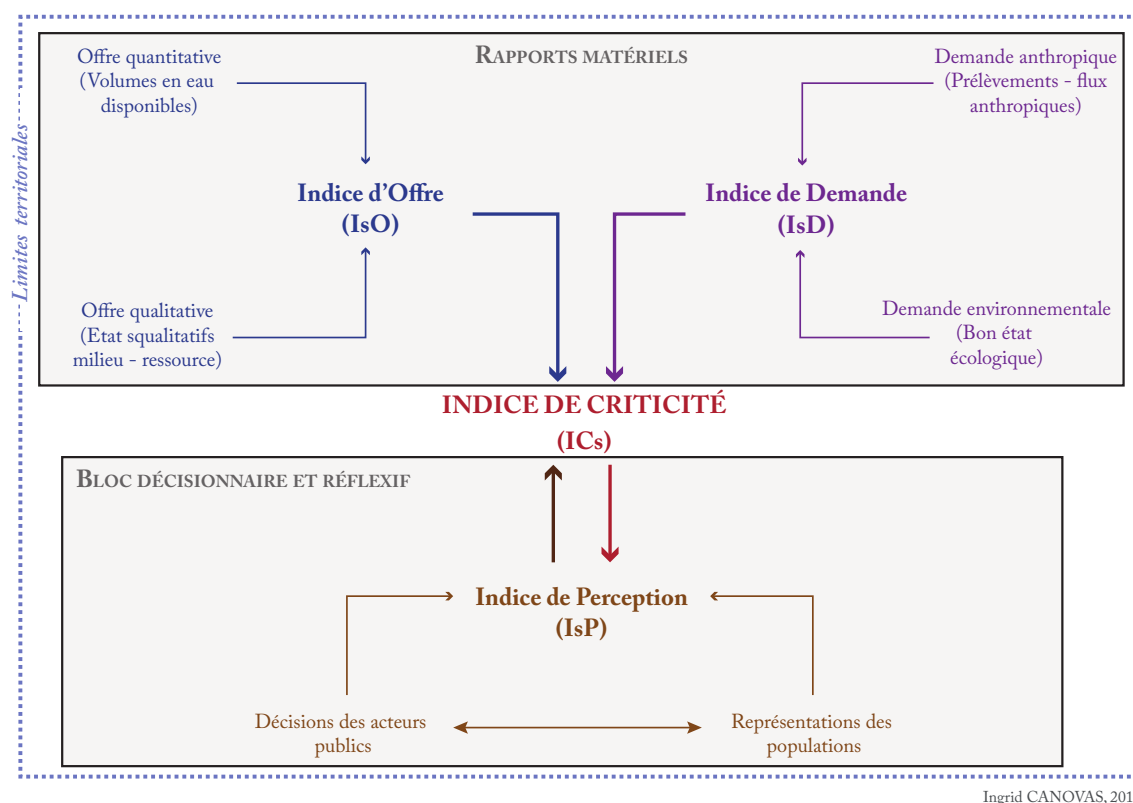


FIGURE 4.9 : SCHÉMA SIMPLIFIÉ D'ÉVALUATION D'UN ÉTAT DE CRITICITÉ DE BASSES EAUX

à terme, à la détermination de la méthode à employer pour définir des seuils de discrimination des différents états de basses eaux, et ce, à tous les niveaux.

4.3 Les modalités associées au changement d'échelle d'analyse et à la résolution spatio-temporelle de l'information

En partant de l'hypothèse que plus l'approche visant à caractériser le phénomène de basses eaux est locale, et plus il est possible d'intégrer des problématiques spécifiques, plus grand sera alors le nombre de variables pouvant être incluses dans l'analyse des basses eaux. Selon cette perspective, et en mettant bout à bout l'ensemble des situations locales, il est donc possible de travailler avec un nombre bien plus élevé (*i.e.* maximal) de variables à l'échelle la plus petite (*i.e.* territoire régional).

Ceci étant, il est à noter que, quelle que soit l'échelle d'observation, une telle étude s'appuie en grande partie sur des mesures ponctuelles. Cet état de fait introduit de nouvelles contraintes, dont les principales concernent :

- La représentativité spatiale de la donnée (ou mesure, appréciation, etc.) ;
- La pertinence de ces informations lorsqu'elles sont traduites par une valeur moyennée ;
- La variabilité des pas de temps ;
- La longueur des périodes d'enregistrements.

Enfin, il n'est pas à exclure que des informations, jugées indispensables pour renseigner les variables essentielles, puissent être indisponibles. Le cas échéant, le recours à des proxys devra être envisagé.

4.3.1 Le nombre de variables essentielles à considérer

Comme cela a été souligné précédemment, les éléments structurants et les forçages pesants dans la genèse des situations de déficit hydrologique sont nombreux et n'opèrent pas tous systématiquement, ni (très vraisemblablement) avec la même force, selon l'aire et l'usage considérés. Les modèles conceptuels proposés ont également mis en évidence que plus l'influence des facteurs de contrôle est grande (*i.e.* spatialement étendue), moins ces derniers sont nombreux à opérer de manière homogène, et plus ils sont caractéristiques d'un contexte particulier (*e.g.* climatique). À l'inverse, plus le territoire est réduit, et si l'on introduit de surcroît la dimension sociale, plus les facteurs deviennent spécifiques à d'autres composantes du système (*e.g.* offre qualitative, demande anthropique) et plus leur champs d'action est localisé (*e.g.* le développement algal sur un site de baignade). Ces facteurs locaux peuvent donc être davantage détaillés (*e.g.* les nombreux critères de qualité de l'eau, telle la salinité de l'eau, la qualité eau de baignade) (ENCADRÉ Eo.1).

De toute évidence, le nombre de variables essentielles à considérer, pour rendre compte de l'état de basses eaux, sera amené à varier en fonction de chaque profil « territoire - usage ».

Selon la démarche ici envisagée, c'est l'échelle spatiale la plus petite (*e.g.* aire régionale) qui comptabilise le nombre maximal de variables. Ce résultat est obtenu à la suite de (1) la sélection de l'ensemble des informations qui agissent à chaque niveau, après avoir préalablement défini leur représentativité spatiale, et (2) de leur intégration progressive (*i.e.* du global au local) dans le modèle final, par le biais des différents indices et indices synthétiques (ENCADRÉ Eo.2).

Pour chaque niveau d'observation (*e.g.* régional, bassin versant), la structure de l'indice de criticité est sous-entendue : trois branches pour les indices d'offre, de demande et de perception ; six sous-branches pour les indices synthétiques d'offre qualitative et quantitative, de demande anthropique et environnementale et de perception des autorités publiques et des populations. À chacun des niveaux considérés, les variables essentielles (qui y exercent une action homogène) sont regroupées pour former un sous-indice synthétique, qui est ensuite rattaché à un des indices synthétiques. La mise en relation de ces derniers conduit à son tour à la définition des indices d'offre, de demande et de perception, qui, combinés, constituent enfin l'indice de criticité. Ce dernier est finalement composé de 1 à n variables, selon le nombre de problématiques locales différentes.

Pour illustrer ces propos, une représentation théorique et schématique de l'évolution du nombre de variables, en lien avec le changement du niveau d'observation, est proposée (ENCADRÉ Eo.2) :

- Au premier niveau, celui de l'aire régionale, les deux variables élémentaires (climatiques) « précipitations » et « pertes évaporatoires » sont retenues. La première est rattachée (par un point dans le schéma) à l'indice synthétique d' « offre quantitative », tandis que la seconde est annexée à l'indice synthétique de « demande environnementale ».

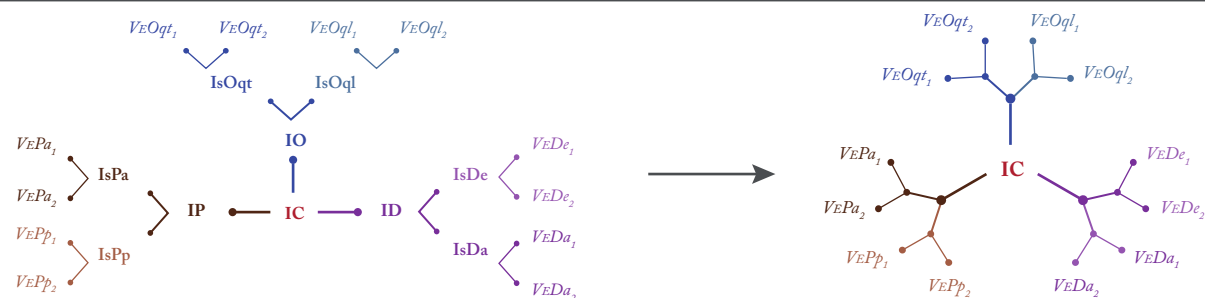
E0.1

ÉVOLUTION DU NOMBRE DE VARIABLES AVEC LE CHANGEMENT D'ÉCHELLE D'OBSERVATION - EXEMPLE SUR TROIS NIVEAUX AVEC QUELQUES VARIABLES ÉLÉMENTAIRES

IC: Indice de Criticité
IO: Indice d'Offre
ID: Indice de Demande
IP: Indice de Perception

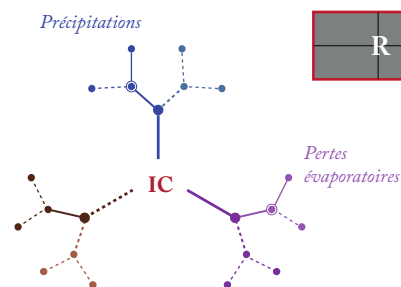
IsOqt: Indice synthétique d'Offre quantitative
IsOql: Indice synthétique d'Offre qualitative
IsDa: Indice synthétique de Demande anthropique
IsDe: Indice synthétique de Demande environnementale
IsPa: Indice synthétique de Perception des autorités publiques
IsPp: Indice synthétique de Perception des populations

Ve: Variable Essentielle



F0.1.1

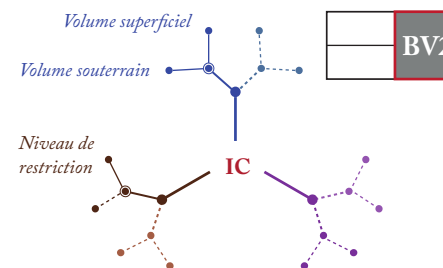
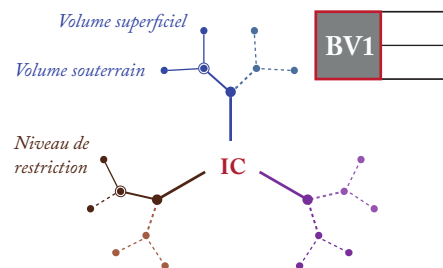
L'AIRE RÉGIONALE - 2 VARIABLES ÉLÉMENTAIRES



Dans cette illustration schématique, l'aire régionale (R) est composée de deux bassins versants, (BV1 et BV2) chacun englobant deux bassins d'usage (BU1 et BU2 relatifs au BV1; BU3 et BU4 relatifs au BV2).

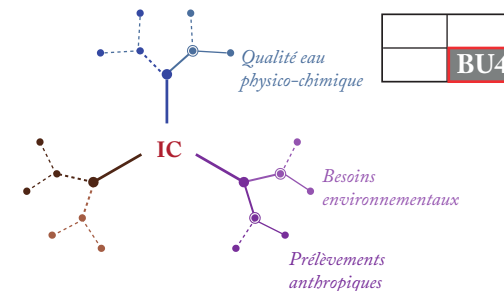
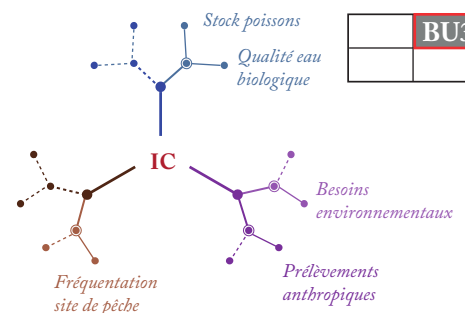
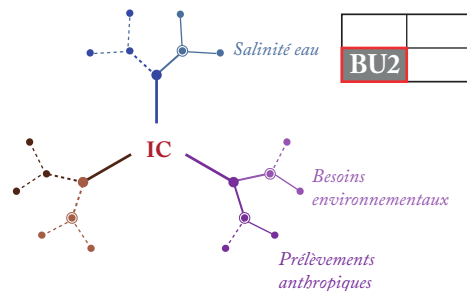
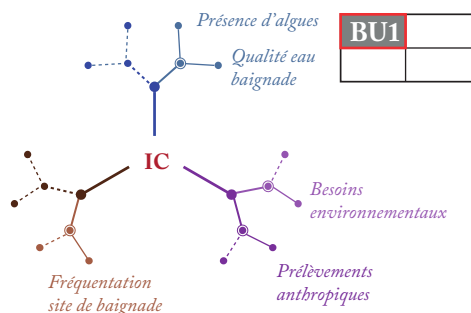
F0.1.2

LE BASSIN VERSANT - 3 VARIABLES ÉLÉMENTAIRES



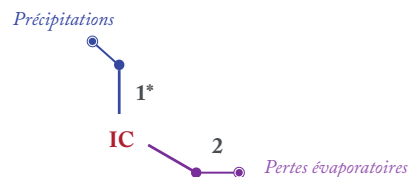
F0.1.3

LE BASSIN D'USAGE - DE 3 À 5 VARIABLES ÉLÉMENTAIRES



ÉVOLUTION DU NOMBRE DE VARIABLES AVEC LE CHANGEMENT D'ÉCHELLE D'OBSERVATION - EXEMPLE SUR TROIS NIVEAUX AVEC QUELQUES VARIABLES ÉLÉMENTAIRES

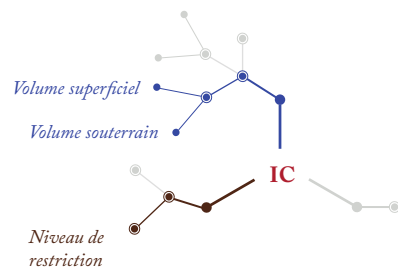
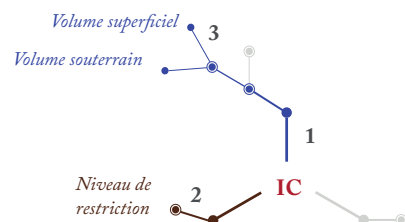
R



NOMBRE DE VARIABLES ÉLÉMENTAIRES: 2

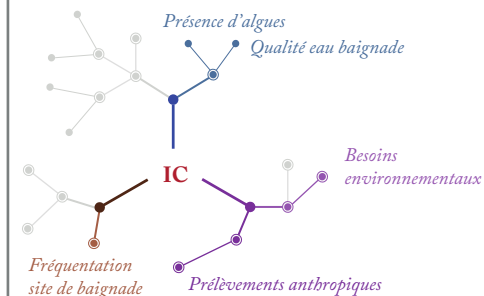
*Niveaux de hiérarchie

BV1

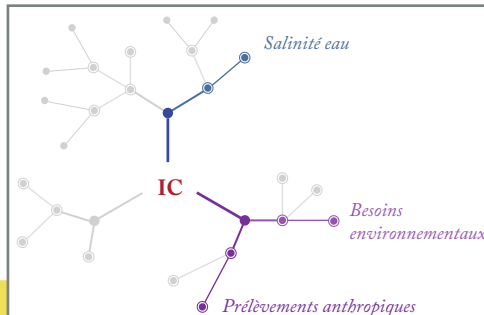


BV2

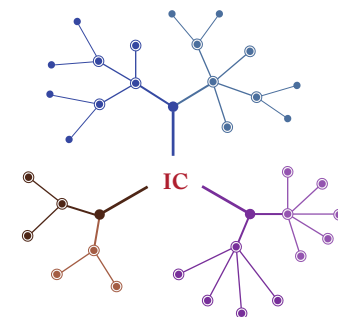
BU1



BU2



R

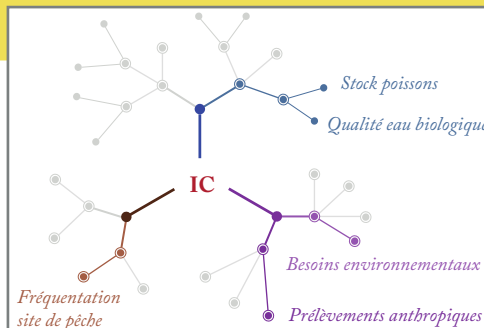


NOMBRE DE VARIABLES ÉLÉMENTAIRES: 15

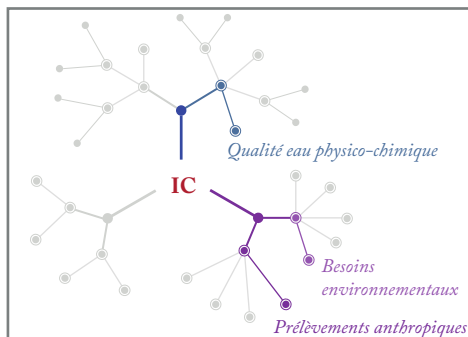
DONT:

- 3 INTÉGRÉES 2 FOIS
- 4 INTÉGRÉES 4 FOIS

BU3



BU4



- Au deuxième niveau, celui du bassin versant (BV1), les trois variables élémentaires (hydrologiques et de perception) « volume superficiel », « volume souterrain » et « niveau de restriction » sont intégrées. Les deux premières, combinées, forment un nouveau point, rattaché à son tour à l'indice synthétique d' « offre quantitative ». La troisième est quant à elle positionnée sur la sous-branche de « perception des autorités publiques ».
- Au dernier niveau, celui du bassin d'usage (BU1), les cinq variables élémentaires (qualitatives et de perception) « présence d'algues », « qualité de l'eau de baignade », « besoins environnementaux », « prélèvements anthropiques » et « fréquentation des sites de baignade » sont ajoutées. Les deux premières vont former un point sur la branche de l' « offre qualitative » ; les deux suivants sont positionnés respectivement sur les branches « demande environnementale » et « demande anthropique » ; la dernière sur la branche de la « perception des populations ».

Les points formés sur chaque branche, dont les influences, les forces, restent à déterminer, constituent l'indice synthétique auquel ils se rapportent : la variable « précipitations », et l'association des variables « volume superficiel » et « volume souterrain », par exemple, représentent les deux composantes finales de l'indice d'offre quantitative, du modèle global (*i.e.* régional) présenté dans l'ENCADRÉ Eo.2.

En d'autres termes, et de manière plus générale, la procédure consiste à progresser du global vers le local (la démarche inverse est également possible), en tentant de définir pour chaque niveau d'observation un indice, lesquels mis bout à bout, donnent une vision plus globale.

Cette procédure permet de limiter la perte de l'information locale, puisque toutes les problématiques, même lorsqu'elles ne sont pas identiques aux mêmes niveaux d'observation ou entre les différents niveaux, sont, dans une certaine mesure, quand même prises en compte. Suivant cette démarche, un indice de qualité de l'eau global peut intégrer, par exemple, le problème de la salinisation de l'eau en Camargue, celui de la prolifération algale en Cévennes, la pollution par pesticides en basse vallée du Rhône, ou encore la présence de cyanobactéries en tête des bassins cévenols, etc.

Dans le détail, l'aire régionale aura donc le nombre maximal de variables, soit 15 dans l'exemple présenté (ou 24 si les doublons sont comptabilisés, certaines variables étant identiques dans les deux bassins versants et les quatre bassins d'usage). Elles ne sont cependant pas toutes représentées de manière homogène sur l'ensemble des niveaux d'observation territoriaux considérés, mais simplement distribuées dans les localités où leur représentativité et leur pertinence sont reconnues.

4.3.2 La résolution temporelle de l'information véhiculée

Avant de s'interroger sur la méthode à développer pour traiter les différentes données, supposées renseigner les variables relatives à l'offre, à la demande et à la perception, il faut s'interroger sur leurs résolutions temporelles. En effet, les enregistrements sont effectués à des pas de temps différents selon le paramètre mesuré (ou estimé, apprécié, etc.), mais également en fonction de l'objectif de la mise en place du système de mesures, etc.

Par ailleurs, si certains paramètres sont mesurés depuis plus d'un demi-siècle, voire plusieurs siècles (*e.g.* la hauteur des précipitations, la température), d'autres sont suivis que depuis peu, en lien avec des problématiques plus actuelles (*e.g.* qualité de l'eau, changement climatique, protection environnementale).

4.3.2.1 Le pas de temps des enregistrements

Le caractère hétérogène des données se retrouve tout d'abord dans les pas de temps des enregistrements, qui varient selon les objectifs à l'origine de la mise en place du système de suivi. La prévision des crues, par exemple, requiert des enregistrements de paramètres hydrométéorologiques (*e.g.* débits et précipitations) à des pas de temps de l'ordre de l'infrahoraire à journalier. L'étude des phénomènes à cinétique plus lente (*e.g.* sécheresse, aridité) se base sur des paramètres météorologiques moyennés à des pas de temps plutôt mensuels ou décennaux (*e.g.* température, évapotranspiration potentielle). D'autres paramètres sont mesurés à des fins économiques (*e.g.* volumes prélevés), ou encore pour améliorer les connaissances sur des tendances générales (*e.g.* évolution démographique). Dans ces derniers cas, les informations sont produites à une fréquence généralement annuelle. Enfin, dans des temporalités intermédiaires (*e.g.* saisonnière), se concentrent les données qualitatives, dont celles se rapportant à l'état de l'eau de baignade en période estivale.

Il faut donc s'attendre à ce que l'ensemble des variables essentielles ne soit pas renseigné de manière équivalente ou comparable : entre une valeur unique par an pour les suivis annuels, à 365 valeurs annuelles pour les mesures journalières, voire au-delà pour les enregistrements (infra) horaires, etc. Cet état de fait souligne la nécessité de procéder, dans certains cas, à une dégradation de l'information (*i.e.* moyenne décennale, mensuelle), pour en augmenter la densité, par exemple, tout en conservant sa représentativité au sein de la dynamique évaluée.

Pour aller plus loin, la question de la pertinence de la moyenne suivant la variable considérée sera naturellement à soulever. Une valeur moyenne permet-elle de discrétiser les états pris par la variable, en particulier à grande échelle (*i.e.* petits territoires), par exemple ? Etc.

Il y a ainsi deux difficultés à prévoir. La première, moindre, concerne le passage des mesures à haute résolution à une moyenne à plus basse résolution. La seconde, plus complexe, repose sur le passage de mesures à basse résolution (*i.e.* moyenne mensuelle) à des valeurs à plus haute résolution (*i.e.* valeur journalière).

Enfin, toutes les informations disponibles ne sont pas quantitatives. En l'absence d'un réseau de mesures pour renseigner une variable essentielle, il faudra alors compter sur des données qualitatives, notamment pour appréhender la dimension réflexive (*i.e.* la perception sociale). Cela devrait introduire une difficulté supplémentaire, relative à la méthode à employer pour homogénéiser l'information (*e.g.* appréciation issue d'enquêtes) et l'intégrer ensuite dans l'analyse, afin de la rendre comparable aux jeux de données quantitatives utilisés pour décrire les autres variables essentielles.

4.3.2.2 La profondeur historique des données

Sans remettre en question, dans un premier temps, la qualité de la mesure et sa fiabilité (*e.g.* technique, matériel), certains paramètres sont mesurés depuis très longtemps. C'est le cas notamment des précipitations, dont les chroniques journalières, sur certains postes, s'étendent sur plus d'un siècle ; certains documents d'archives offrant même plusieurs siècles de données mensuelles. Dans une mesure moindre, la température fait également partie des paramètres les plus suivis (plus d'un siècle de mesures mensuelles).

De manière générale, les séries d'enregistrements des paramètres hydrologiques, anthropiques et environnementaux n'excèdent pas le demi-siècle. Les débits, par exemple, sont enregistrés quotidiennement depuis une soixantaine d'années tout au plus. Les mesures de qualité de l'eau sont, quant à elles, relativement récentes, puisque l'intérêt écologique est apparu réellement qu'il y a une dizaine d'années (une vingtaine tout au plus). Les variables anthropiques (relatives aux usages et pratiques de l'eau) sont certainement les moins renseignées. La majorité des informations les concernant sont extrêmement récentes. Malgré les obligations récentes d'installer un système de comptage de volumes prélevés et de déclarer les forages et les prises d'eau en rivière, et le travail de contrôle régulier effectué par la police de l'eau (ONEMA), ce n'est pas pour autant que l'ensemble des prélèvements est identifié.

La possibilité de devoir faire face à une pénurie d'informations pour renseigner la dimension réflexive n'est pas à exclure non plus. L'intérêt porté sur la question de la raréfaction de la ressource est réellement apparu avec l'épisode de canicule de l'été 2003. Jusqu'alors, très peu de travaux s'étaient consacrés au phénomène de pénurie en eau en France, donc très peu de moyens (*e.g.* réseau de mesures) avaient été mis en place pour l'appréhender. Par ailleurs, parmi les études menées depuis, rares sont celles qui se sont penchées sur la question sociale et sur les attentes des usagers de l'eau, la priorité étant mise sur l'aspect quantitatif, à savoir la prévision des débits estivaux.

De plus, outre le pas de temps de la mesure, la profondeur historique de la donnée contribue à la densité de l'information. En effet, plus cette dernière est importante et plus il est (théoriquement) possible d'accéder à une bonne caractérisation de la distribution statistique de l'information. Par ailleurs, plus la période d'enregistrements est étendue, plus les dynamiques temporelles sont susceptibles d'être prises en compte, et plus fiable devrait être la remise en perspective de la situation à évaluer. À terme, il devrait être plus aisé de mettre en évidence des tendances actuelles et à venir (*e.g.* une accélération, un changement de dynamique), et probablement d'identifier le(s) forçage(s) en cause.

4.3.3 La résolution spatiale de l'information : les postes de référence

Si la question de la temporalité de la donnée se pose, c'est également le cas de sa résolution spatiale. Quelle est l'aire d'influence du paramètre mesuré, ou, en d'autres termes, quelle est la représentativité ou l'emprise spatiale de l'information mesurée ou estimée (*e.g.* ponctuelle, communale,

départementale) ? À quel(s) poste(s) faut-il alors se référer dans chacune des échelles spatiales considérées ?

Ces derniers questionnements soulèvent celui du choix des sources de données à mobiliser. En effet, un des objectifs sous-jacents à ce travail consiste à définir un réseau d'observation adapté à chacune des échelles spatiales considérées. Cela suppose d'identifier les postes, les stations, etc. dont les mesures sont susceptibles de révéler un fonctionnement, une structure, une dynamique homogènes dans un espace défini. Ce réseau permettrait d'éviter de traiter un volume trop important de données, lorsqu'il existe sur l'aire étudiée de nombreuses sources de données ou, à l'inverse, lorsqu'il n'existe aucun poste dans l'espace considéré, de pouvoir se référer à un poste extérieur, mais susceptible de renseigner une variable d'une manière la plus significative possible. Pour illustrer ces propos, l'hypothèse selon laquelle la station de mesure de débit sur la Fontaine de Vaucluse servira de référence pour caractériser l'état des nappes karstiques à l'échelle régionale peut être avancée. Pareillement, le traitement couplé des informations issues des postes pluviométriques de Marseille, Carpentras, Nîmes et Alès (et du Mont Aigoual ?) se révélera certainement pertinent pour appréhender la dynamique climatique méditerranéenne, etc.

4.3.4 Le recours aux proxys

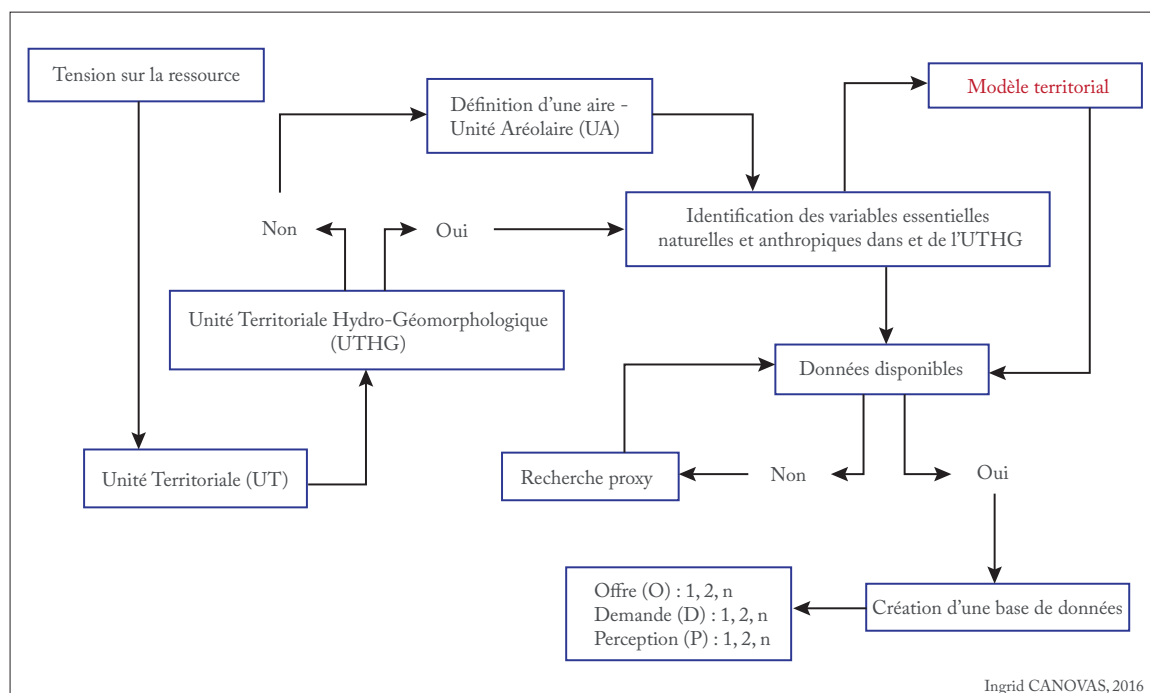
De toute évidence, la mobilisation de proxys (entendus ici comme des variables intermédiaires ou des informations dérivées - indirectes) sera, dans certains cas, inévitable. D'une part, si une variable essentielle ne peut être traduite dans l'unité commune choisie (*e.g.* un volume) et/ou ramenée à la distribution statistique choisie. D'autre part, si les données relatives à l'une des variables essentielles ne sont pas disponibles, que ce soit en quantité (*e.g.* faible profondeur historique), en termes de représentativité (*e.g.* existence de données départementales pour une information locale souhaitée, ou inversement), ou encore si l'une d'elles est renseignée de manière qualitative, etc.

Un exemple peut être donné par le recours à l'Indice Forêt-Météo (IFM), développé et utilisé dans la prévention et la veille des risques d'incendie de forêt. Il pourrait alors décrire les informations relatives à l'ETP ou l'état de la réserve en eau des sols et des plantes, si ces dernières s'avèrent nécessaires, mais indisponibles ou renseignées de manière partielle ou insuffisante.

Conclusion — À partir de la définition établie précédemment de la criticité des basses eaux, un modèle théorique générique a été proposé pour caractériser un état de criticité de la situation en basses eaux. Par ailleurs, afin de soutenir l'hypothèse selon laquelle le phénomène peut être évalué à différentes échelles, plusieurs modèles spécifiques (*e.g.* à un territoire, à un usage) ont été déclinés. La conception de ces systèmes a nécessité la sélection d'un certain nombre d'éléments intervenant à la fois dans leur constitution propre (*e.g.* état, processus), et dans leur dynamique (*e.g.* flux, facteurs externes). Ces éléments, ou variables, diffèrent selon l'échelle d'observation et impliquent la mobilisation d'informations de nature et de résolution spatiale et temporelle diverses pour les renseigner.

Aussi, toute la réflexion doit alors porter sur le moyen de collecter et réunir l'ensemble de ces informations, malgré leur hétérogénéité supposée, et d'en déterminer les conditions optimales d'utilisation pour chaque échelle : quel paramètre mesuré pour quelle variable essentielle, pour quelle échelle spatiale, et à quel pas de temps ?

DE LA CRÉATION DE LA BASE DE DONNÉES « BASSES EAUX » À LA CONSTRUCTION DU MODÈLE TERRITORIAL DES GARDONS



5.1	La création de la base de données pour l'étude des basses eaux sur le bassin des Gardons	136
5.1.1	Les unités territoriales existantes et les informations associées	136
5.1.2	Données nécessaires <i>vs.</i> données disponibles	141
5.1.3	Le besoin nécessaire d'une base de données coopérative	161
5.1.4	Structure de la base de données « basses eaux »	161
5.2	L'élaboration du modèle territorial du bassin versant des Gardons	165
5.2.1	Les modèles spécifiques aux sous-bassins des Gardons	166
5.2.2	Le modèle relatif au bassin des Gardons	172

Le modèle théorique ainsi posé et les variables essentielles identifiées, il convient ensuite d'élaborer le modèle spécifique au territoire d'étude. Cela revient tout d'abord à définir l'échelle spatiale d'analyse la plus appropriée (*i.e.* adaptée à l'objectif de l'étude) puis à sélectionner les informations relatives aux variables retenues dans le modèle.

Cette dernière étape implique qu'une analyse critique des données soit réalisée au préalable. Il est par ailleurs nécessaire que soit déterminée, au moins *a priori*, leur représentativité spatiale. Cela se traduit concrètement par la création d'une base de données qui, d'une part, compile l'ensemble des indices, et des variables (et, à terme, les futurs indicateurs) et, d'autre part, rattache l'échelle et le paramètre (*i.e.* l'information ou la donnée, mesurée ou estimée) supposé renseigner la variable essentielle. Enfin, une réflexion doit être menée sur la temporalité à accorder à l'échelle spatiale d'analyse, en lien avec les caractéristiques du territoire considéré et les problématiques locales. Le développement de cette réflexion et de la trame méthodologique est illustré ici sur le bassin des Gardons.

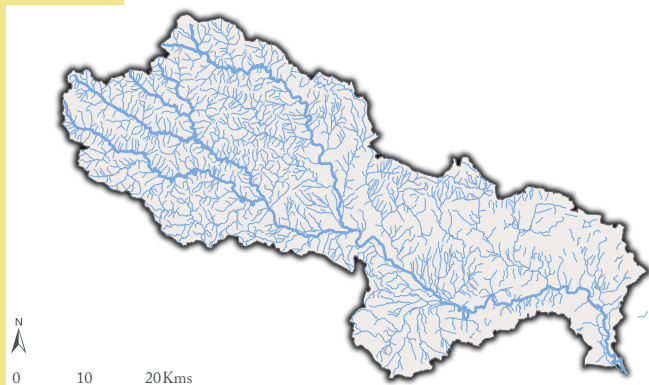
5.1 La création de la base de données pour l'étude des basses eaux sur le bassin des Gardons

Sur la base du modèle global proposé par l'étude conceptuelle des facteurs d'influence sur l'état de basses eaux, un premier temps est dédié à la recherche des paramètres pouvant renseigner les variables essentielles (FIGURE 5.1). Pour cela, il est possible de recourir aux différents découpages spatiaux existants sur le territoire considéré. Ensuite, en fonction des données disponibles et des caractéristiques du territoire étudié, seules certaines variables sont conservées. Cette sélection doit permettre, in fine, la construction d'un modèle spécifique au territoire soumis à l'étude.

5.1.1 Les unités territoriales existantes et les informations associées

Le choix de l'unité territoriale sur laquelle mener l'analyse des basses eaux est porté ici sur les découpages existants (ENCADRÉ E1).

C1.1 LE BASSIN VERSANT

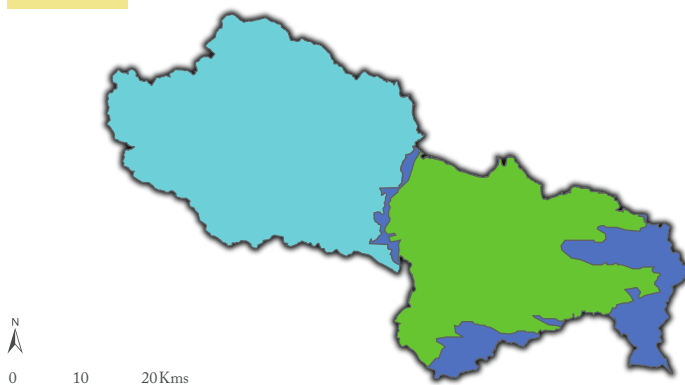


Limites topographiques du bassin versant

Réseau hydrologique

Source: BD CARTHAGE, 2014

C1.2 LES ZONES D'ALERTE



Zone d'alerte eaux superficielles

ZONE 3 Gardons amont

ZONE 4 Gardons aval

Zone d'alerte eaux souterraines

ZONE 11 Karst urgonien de la gardonnenque

Source: DDTM du Gard, 2012

C1.3 LES ZONES HYDROGRAPHIQUES

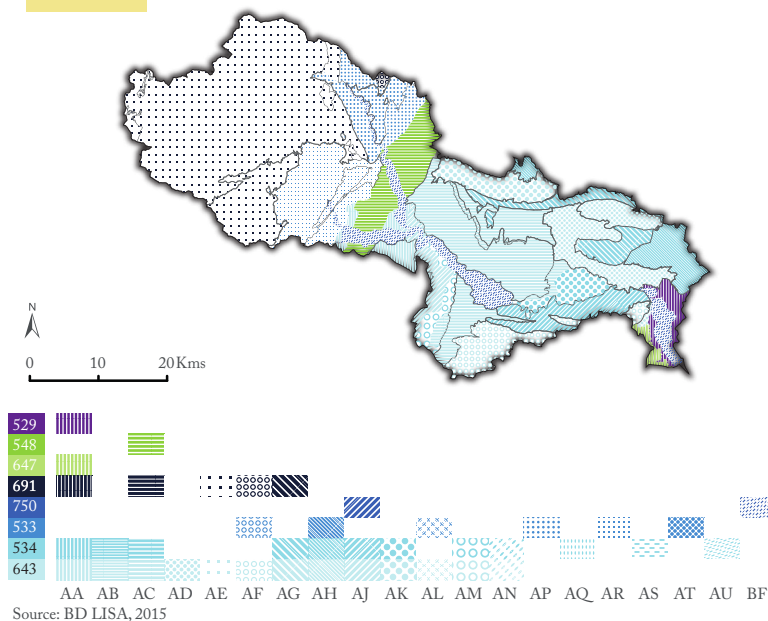


Code des zones hydrographiques

V710	V712	V714	V716	V718
V711	V713	V715	V717	V719

Source: BD CARTHAGE, 2014

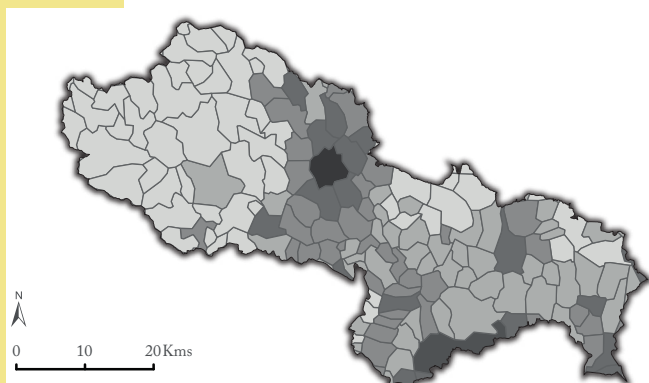
C1.4 LES ENTITÉS HYDROGÉOLOGIQUES



529	548	647	691	750	533	534	643	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AJ	AK	AL	AM	AN	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	BF
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Source: BD LISA, 2015

C1.5 LES COMMUNES



Source: GEOFLA, 2014

C1.6 LES SITES DE MESURE



Station limnimétrique

Poste piézométrique

Sources: Portail ADES, Banque Hydro, 2016

Ingrid CANOVAS, 2016

5. DE LA CRÉATION DE LA BASE DE DONNÉES « BASSES EAUX » À LA CONSTRUCTION DU MODÈLE TERRITORIAL DES GARDONS

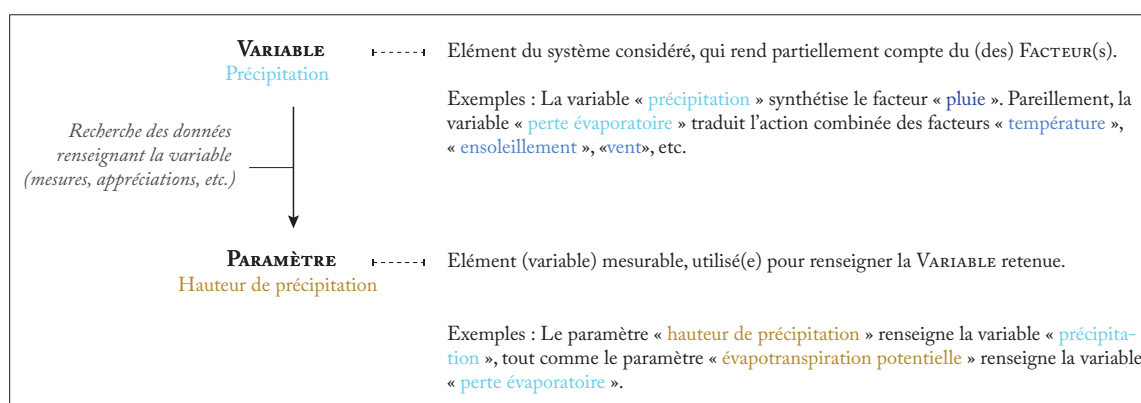


FIGURE 5.1 : DE LA VARIABLE AU PARAMÈTRE : DÉFINITIONS

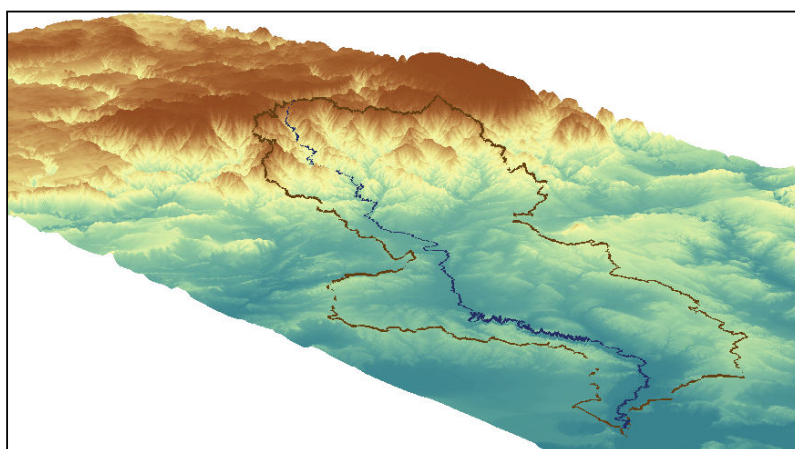


FIGURE 5.2 : LE MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN : STRUCTURE MORPHOLOGIQUE CONTRASTÉE DU BASSIN DES GARDONS

Toutefois, la méthode présentée est transposable à d'autres types de découpages, et peut être adaptée aux besoins de l'étude menée. À chacun des découpages sont rattachées plusieurs informations qu'il faut au préalable identifier.

Cette étape est fondamentale, car, bien souvent, toutes les variables jugées essentielles ne sont pas ou peu renseignées (*e.g.* absence de site de mesure, nombreuses lacunes dans la série de données). Le cas échéant, il sera alors nécessaire de recourir à d'autres variables explicatives voire, parfois, à des proxys.

5.1.1.1 Le zonage hydrographique

De manière générale, les études hydrologiques sont menées à l'échelle du bassin versant. Or, ce territoire ne présente pas toujours d'homogénéité de fonctionnement hydrologique, notamment s'il est très étendu et s'il présente des changements morphologiques marqués, comme le bassin des Gardons (FIGURE 5.2).

C'est la raison pour laquelle il existe un découpage en zones hydrographiques (nomenclature BD CARTHAGE) ; les Gardons en traversent dix. Cette partition s'appuie sur les limites topographiques

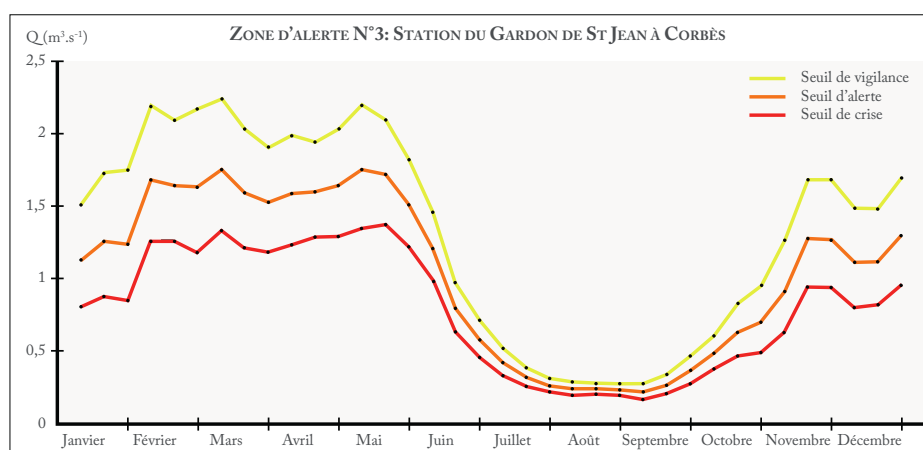


FIGURE 5.3 : DÉTERMINATION DES SEUILS DE VIGILANCE, D'ALERTE ET DE CRISE À LA STATION HYDROMÉTRIQUE DE SAINT JEAN À CORBÈS (SOURCE : ANNEXE 5 DE L'ARRÊTÉ-CADRE SÉCHERESSE DU GARD — ARRÊTÉ PRÉFECTORAL DU 8 JUILLET 2013)

existantes (*i.e.* les sous-bassins versants) au sein de la limite hydrographique du bassin versant, et sert à la délimitation de zones de programmation ou réglementaires diverses (*e.g.* les SDAGE). Sur ces portions de territoires, les descripteurs sont essentiellement physiographiques, mais moyennés (*e.g.* la pente, l'altitude).

5.1.1.2 Le découpage réglementaire

Le plan cadre sécheresse propose des découpages en zones d'alerte, en différenciant également les eaux superficielles et les eaux souterraines, dans lesquelles s'appliquent des mesures de vigilance, de restriction ou d'interdiction provisoire des usages de l'eau.

Dans le département du Gard, 13 zones d'alerte ont été définies, dont trois sont situées dans le bassin des Gardons. Au sein de ces unités réglementaires, les informations sont exclusivement relatives au niveau activé (*e.g.* vigilance, alerte), à sa durée (chaque niveau activé est daté) et aux mesures prises pour chaque type d'usage. À titre d'exemple, lorsque l'état d'alerte est déclenché, une des mesures de limitations des usages de l'eau de niveau 2 interdit l'arrosage des jardins potagers entre 8h00 et 20h00 (Annexe 6 de l'Arrêté-cadre sécheresse du Gard — Arrêté préfectoral du 8 juillet 2013).

L'activation d'un niveau est basée sur des valeurs décadaires de débit et des valeurs de hauteur d'eau dans les nappes au poste choisi comme référent de chaque zone, comme l'illustre le FIGURE 5.1.2.2 pour la zone d'alerte 3, correspondant au Gardon amont.

5.1.1.3 Les limites administratives

Le découpage administratif n'est, quant à lui, pas en adéquation avec les caractéristiques physiques des territoires. Cependant, ces unités territoriales (*e.g.* communale, départementale) possèdent des informations socio-économiques, relatives à la population (*e.g.* démographie, niveau de vie) ou

encore aux activités économiques (*e.g.* pratiques agricoles, tourisme). Ces entités correspondent également à des territoires politiques, dans lesquels sont prises des décisions, mis en place des plans de gestion, etc.

5.1.1.4 Les entités hydrogéologiques

Lors des études menées sur la ressource en eau souterraine, visant essentiellement à en évaluer la vulnérabilité et la possibilité de l'exploiter, l'échelle choisie est généralement celle de l'entité hydrogéologique (BD LISA). Chacune de ces entités renferme essentiellement des informations relatives à la nature géologique, au type d'aquifère (*e.g.* alluvial, socle, karstique), à sa captivité et à sa porosité. Chaque aquifère est donc spécifique en matière de fonctionnement hydrogéologique et de vulnérabilité.

Sur le bassin des Gardons, cinq catégories principales d'aquifères ou de formations géologiques peuvent être distinguées (par ordre de représentativité) : les aquifères sédimentaires non karstiques, les aquifères de socle, les formations intensément plissées (de montagne), les aquifères karstiques et les aquifères alluviaux.

5.1.1.5 Les sites de mesure

À l'échelle ponctuelle, on retrouve l'ensemble des sites de mesure dont :

- La station hydrologique - limnimétrique pour les données de débits des cours d'eau ;
- Le poste pluviométrique pour les hauteurs de précipitations ;
- Les sites de mesure de la qualité de l'eau souterraine et superficielle pour les paramètres physico-chimiques ; bactériologiques et biologiques ;
- Le piézomètre pour la hauteur des nappes, etc.

Chaque point de mesure se situe donc sur un ou plusieurs découpages plus grands (*e.g.* commune, zone hydrographique). Par exemple, le poste de mesure des débits est installé sur le linéaire d'un cours d'eau traversant une commune, elle-même située au sein d'une zone hydrographique, etc. Contrairement aux informations relatives aux précédentes entités territoriales, les données issues des postes de mesure sont ponctuelles. Par conséquent, leur représentativité spatiale n'est pas connue au-delà de celle du site. Il sera donc primordial d'établir leur emprise spatiale afin de déterminer le poste qui sera retenu en référence pour chaque variable, et pour cette échelle.

Outre les précédents, de nombreux découpages supplémentaires existent, auxquels sont annexés d'autres paramètres mesurés. L'unité cartographique (uc) et l'unité de sol (us) de la BD SOL de l'INRA, en sont un exemple. Elles correspondent à des unités pédoclimatiques homogènes au sein desquelles sont renseignées des informations relatives à la nature, la composition, les propriétés et les caractéristiques physiographiques des sols, etc.

Il apparaît donc aisément possible de mener une étude des basses eaux à différentes échelles, selon les besoins en termes de données (*e.g.* recours à un paramètre de niveau d'observation $n-1$

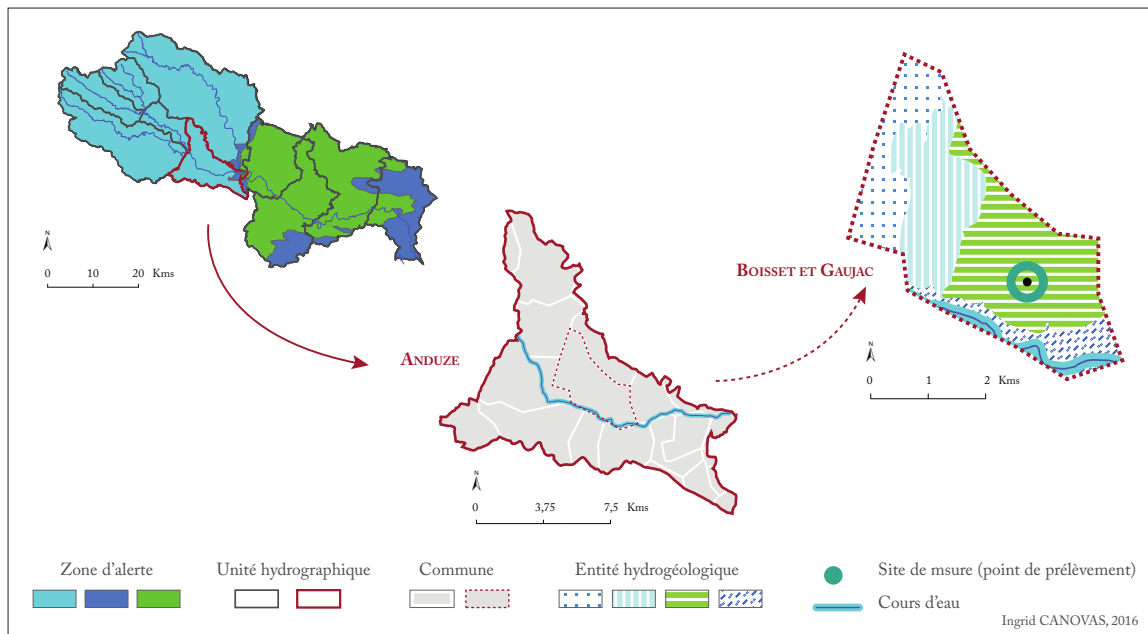


FIGURE 5.4 : EMBOÎTEMENT POSSIBLE DES ÉCHELLES SUR LE BASSIN DES GARDONS, POUR UNE ANALYSE DU TERRITOIRE COMMUNAL

ou $n+1$, si le paramètre souhaité n'est pas mesuré au niveau n), et les objectifs (*e.g.* synthèse de la situation régionale, analyse de la situation pour un usage ou encore étude de la pression exercée sur un réservoir hydrogéologique, etc.).

Au vu des différents découpages existants, l'emboîtement des échelles spatiales semble possible et autoriser, dans une certaine mesure et selon des modalités à définir, l'agrégation des données (FIGURE 5.1.2.2). En effet, il faudra naturellement s'interroger sur la manière de synthétiser une information obtenue à l'échelle locale (*e.g.* ponctuelle, commune) à une échelle plus large (*e.g.* sous bassin versant, bassin versant, région) et *vice versa*.

Les échelles spatiales étant définies pour traiter la question des basses eaux sur le bassin des Gardons, il faut ensuite procéder à la collecte et à l'agrégation des données ou des informations susceptibles de décrire les variables essentielles, au sein d'une base spécifique « basses eaux ».

5.1.2 Données nécessaires *vs.* données disponibles

Une des contraintes de ce travail repose sur le recours exclusif aux informations existantes. En effet, l'hypothèse de départ se fonde sur l'existence d'une quantité très importante de données, de nature variée (*e.g.* mesures, estimations, appréciations), générées pour diverses finalités (*e.g.* prévision des crues, veille climatique, suivi du milieu aquatique). Le postulat d'une richesse actuelle de l'information induit alors la possibilité d'alimenter les modèles proposés sans avoir à produire des données spécifiques pour soutenir cette étude. En d'autres termes, une analyse des basses eaux devrait pouvoir être menée à partir de la seule mobilisation des seules données disponibles.

Dans cette optique, l'approche développée implique :

- (1) l'inventaire des renseignements nécessaires (*i.e.* recherche des paramètres mesurés) dans les bases de données présentes et, dans la mesure du possible, disponibles en accès libre ;
- (2) leur bancarisation au sein d'une nouvelle base de données propre à l'étude des basses eaux.

5.1.2.1 Les paramètres retenus pour renseigner les variables essentielles

Les bases de données, dont l'accès n'est pas limité (*i.e.* gratuites), mises en ligne par de grands organismes de gestion et de collecte d'informations (*e.g.* Agence de l'Eau), ont permis de renseigner une grande partie des variables essentielles retenues. La seule exception faite concerne les données pluviométriques de Météo France, pour lesquelles l'accès requiert un financement et une convention particulière.

Pour mettre en œuvre la démarche, encore à un stade très théorique, des choix de simplification ont été opérés. Ainsi, seul un paramètre mesuré est retenu par variable essentielle. Par ailleurs, sur les six indices synthétiques, seuls cinq seront développés ici : l'indice d'offre quantitative, l'indice d'offre qualitative, l'indice de demande anthropique, l'indice de demande environnementale et l'indice de perception de l'autorité publique.

En effet, afin de faciliter le développement méthodologique (encore exploratoire), il s'avère judicieux de le mettre en œuvre avec un minimum de composantes. Après validation, le modèle pourra alors être complexifié, par l'intégration progressive de nouveaux éléments, afin d'en améliorer la robustesse et d'augmenter l'exhaustivité de l'étude.

En conséquence, sur les quatorze variables essentielles recensées *a priori* (voir *supra* 4.2.1), seules neuf d'entre elles sont retenues dans ce travail (en regroupant les prélèvements anthropiques) pour l'élaboration de l'indice de criticité (ENCADRÉ E2) :

- L'offre quantitative, correspondant aux volumes en eau disponibles dans les réserves superficielles, souterraines et anthropiques, est renseignée respectivement par :
 - le débit des cours d'eau,
 - le niveau des nappes,
 - le volume stocké dans les barrages.
- L'offre qualitative, définie par le niveau de pollution de l'eau, est quant à elle renseignée par :
 - l'état chimique et biologique de l'eau superficielle,
 - l'état chimique et biologique de l'eau souterraine,
 - la qualité de l'eau de baignade, soit l'état bactériologique de l'eau.
- La demande anthropique correspond :
 - aux prélèvements agricoles, industriels (économiques) et domestiques.
- La demande environnementale inclue les besoins environnementaux (assurer et maintenir la vie des milieux aquatiques) et la demande évaporatoire, par le biais de :

- l'évapotranspiration potentielle (ETP), qui sera déterminée à partir de la température, l'ETP étant toujours supérieure ou égale l'évapotranspiration réelle (ETR) qui mobilise la réserve utile très mal connue des sols.
- Les décisions des autorités publiques sont déterminées par :
 - le niveau d'alerte et les mesures de restrictions prises par arrêté préfectoral, à la suite de l'évaluation de la situation par le comité de sécheresse départemental.

Toutefois, et comme supposés, tous ces paramètres ne sont pas renseignés de manière homogène. D'une part, l'historique des mesures est extrêmement différent, certaines séries d'enregistrements ou d'informations couvrant des périodes inférieures à 10 ans (*e.g.* les niveaux d'alerte activés), d'autres s'étalant sur plus d'un siècle (*e.g.* les hauteurs de précipitations). Le pas de temps et le nombre de mesures effectuées sont eux aussi très variés. En effet, tandis que plusieurs paramètres sont renseignés par une valeur annuelle (*e.g.* les indices de qualité de l'eau de baignade), d'autres sont relevés quotidiennement (*e.g.* les débits).

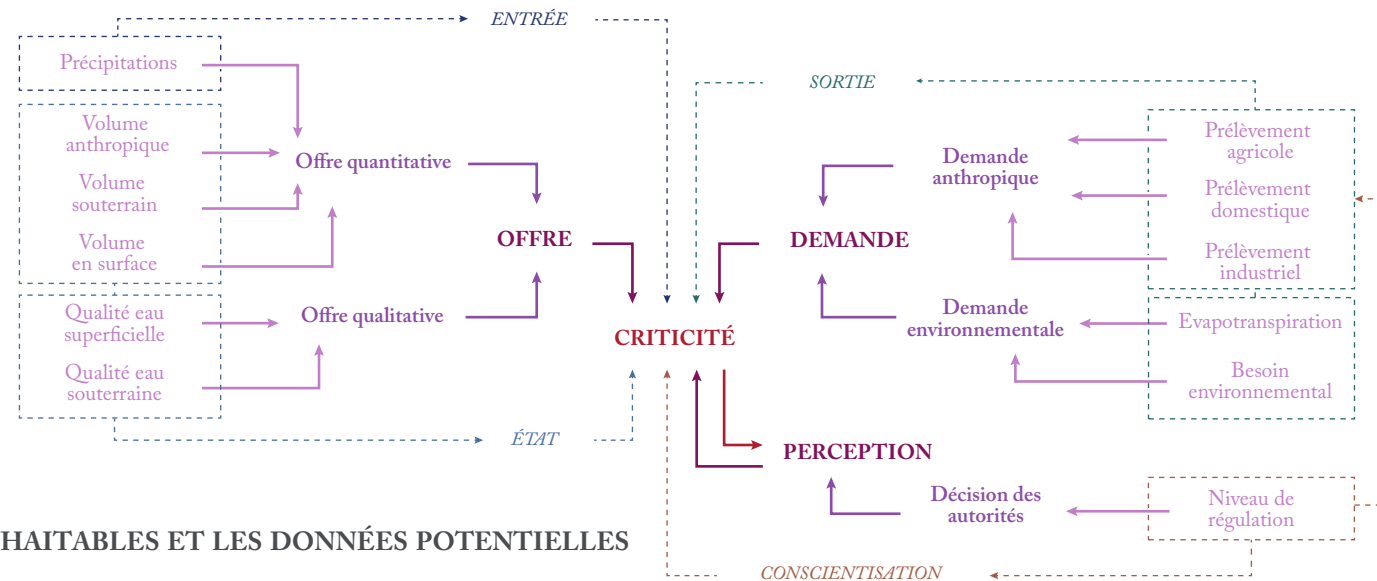
De plus, si certaines données sont brutes (*e.g.* les volumes prélevés), d'autres sont calculées (*e.g.* les indices de qualité chimique et biologique de l'eau), voire parfois estimées (*e.g.* le débit réservé). Enfin, toutes les informations disponibles ne se réfèrent pas systématiquement à la période estivale (*e.g.* le volume prélevé), ce qui limite la pertinence et la validité de certains paramètres dans le cadre de l'étude des basses eaux.

5.1.2.2 Critique de l'information disponible

Les exigences de la présente approche, en matière de qualité de l'information requise, reposent essentiellement sur leur densité et leur représentativité spatiale et temporelle. La précision de la mesure, par exemple, ne constitue pas un critère disqualifiant, puisque l'objectif ne réside pas dans la détermination ou la prévision d'un volume juste à un moment donné, sinon dans une caractérisation plus englobante et synthétique de l'état de la ressource. De plus, le recours à des informations plus générales et de qualité contestable sera très certainement inévitable, notamment pour apprécier les variables non mesurables (*e.g.* de perception). Il n'y a donc pas d'intérêt particulier à rechercher des données d'une extrême précision puisqu'elles seront assurément confrontées à des informations plus grossières.

Cela étant, et suivant ces critères, une analyse critique de l'information demeure indispensable, en particulier pour la sélection des postes de référence, en vue de la définition d'un réseau d'observation des basses eaux, sur les territoires méditerranéens. Les séries de données, relatives à chacun des paramètres souhaités, sont détaillées dans ce qui suit, suivant le domaine auquel elles se rapportent.

Les données hydrologiques — Les données hydrologiques disponibles, choisies pour renseigner les variables essentielles « volume disponible en surface » et « volume souterrain disponible », correspondent respectivement aux enregistrements des débits des cours d'eau et des niveaux piézométriques.



Ingrid CANOVAS, 2016

T.2 LES DONNÉES SOUHAITABLES ET LES DONNÉES POTENTIELLES

DONNÉES SOUHAITABLES				DONNÉES POTENTIELLES				
Id_INDICE	Id_INDICE2	Id_INDICE_SYNTHÉTIQUE	Id_VARIABLE	Id_VARIABLE_MESURÉE	UNITÉ	PÉRIODE	PAS_DE_TEMPS	SOURCE_DONNÉES
- Offre	- Etat	- Offre quantitative	- Volume en surface	- Débit	- Litre/seconde	- 1955 - 2014	- Journalier	- Banque Hydro
- Offre	- Etat	- Offre quantitative	- Volume souterrain	- Niveau Piézométrique	- Hauteur en mètre	- 1984 - 2014	- Journalier	- Agence RMC (http://sierm.eaurmc.fr)
- Offre	- Etat	- Offre quantitative	- Volume anthropique	- Taux de remplissage	- Pourcentage	- 2005 - 2014	- Mensuel	- DIREN
- Offre	- Entrée	- Offre quantitative	- Précipitation	- Hauteur de précipitations	- Millimètre	- 1900 - 2014	- Journalier	- Météo France
- Offre	- Etat	- Offre qualitative	- Qualité eau superficielle	- Indice biologique eau superficielle	- Indice	- 2005 - 2014	- Annuel	- Portail ADES
- Offre	- Etat	- Offre qualitative	- Qualité eau superficielle	- Indice chimique eau superficielle	- Indice	- 2005 - 2014	- Annuel	- Portail ADES
- Offre	- Etat	- Offre qualitative	- Qualité eau superficielle	- Indice qualité eau de baignade	- Indice	- 2005 - 2014	- Annuel	- ARS (http://baignades.sante.gouv.fr)
- Offre	- Etat	- Offre qualitative	- Qualité eau souterraine	- Indice chimique eau souterraine	- Indice	- 2005 - 2014	- Annuel	- Portail ADES
- Demande	- Sortie	- Demande anthropique	- Prélèvement agricole	- Volume prélevé irrigation et alimentation canaux	- Millier de mètres cubes	- 1988 - 2014	- Annuel	- Agence RMC (http://sierm.eaurmc.fr)
- Demande	- Sortie	- Demande anthropique	- Prélèvement industriel	- Volume prélevé industrie et usage économique	- Millier de mètres cubes	- 1988 - 2014	- Annuel	- Agence RMC (http://sierm.eaurmc.fr)
- Demande	- Sortie	- Demande anthropique	- Prélèvement domestique	- Volume prélevé AEP et autre usage domestique	- Millier de mètres cubes	- 1988 - 2014	- Annuel	- Agence RMC (http://sierm.eaurmc.fr)
- Demande	- Sortie	- Demande environnementale	- Besoin écologique	- Débit (réserve)	- Litre/seconde	- 1955 - 2014	- Journalier	- Banque Hydro
- Demande	- Sortie	- Demande environnementale	- Evapotranspiration Pot.	- Température	- Degré Celsius	- 1920 - 2014	- Mensuel	- Infoclimat (http://www.infoclimat.fr)
- Perception	- Conscientisation	- Décision autorité publique	- Niveau de régulation	- Niveau d'alerte activé	- Indice	- 2002 - 2014	- Journalier	- Agence RMC (http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/)

Les chroniques de débit Sur les 17 postes de mesure de débit disponibles, et répartis de manière relativement homogène sur le linéaire des Gardons, 11 sont encore en service (ENCADRÉ E3). Les longueurs des chroniques d'enregistrement (débit moyen journalier en l.s^{-1}), centralisées au sein de la Banque Hydro, sont très variables (entre 5 années disponibles à la station de Remoulins et 58 années à la station de Générargues). Par ailleurs, très peu d'entre elles concordent sur plusieurs années, ce qui rend difficile la comparaison des états de la variable « volume disponible en surface » sur le temps long entre les différents sites. En revanche, le pas de temps est journalier, ce qui signifie jusqu'à 365 données par an, pouvant théoriquement favoriser la révélation d'une structure statistique particulière (*e.g.* dynamique hydrologique), au moins localement.

Certaines chroniques souffrent de lacunes, ce qui peut représenter une sérieuse contrainte, notamment lorsque les données manquantes correspondent aux débits estivaux (*i.e.* extrêmes), lesquels présentent précisément un intérêt, en particulier pour la définition des seuils. C'est le cas notamment des stations de Russan et de Saumane, qui accusent respectivement 25,8 % et 73,4 % de valeurs manquantes sur la période comprise entre début juin et fin septembre de chaque année disponible. Les lacunes ne constituent toutefois qu'un biais relatif dans une approche statistique probabiliste, dont la pertinence et la robustesse dépendent majoritairement de la quantité de valeurs disponibles, mais dans la mesure où un véritable échantillon de l'information (*i.e.* toutes les gammes de valeurs, dont les plus extrêmes) est représenté. Il n'est par conséquent pas exclu que ce dernier point constitue une limite à la justesse de l'analyse, les séries de quelques dizaines d'années ne constituant probablement pas un échantillon suffisant des situations possibles (*e.g.* historiques - passées).

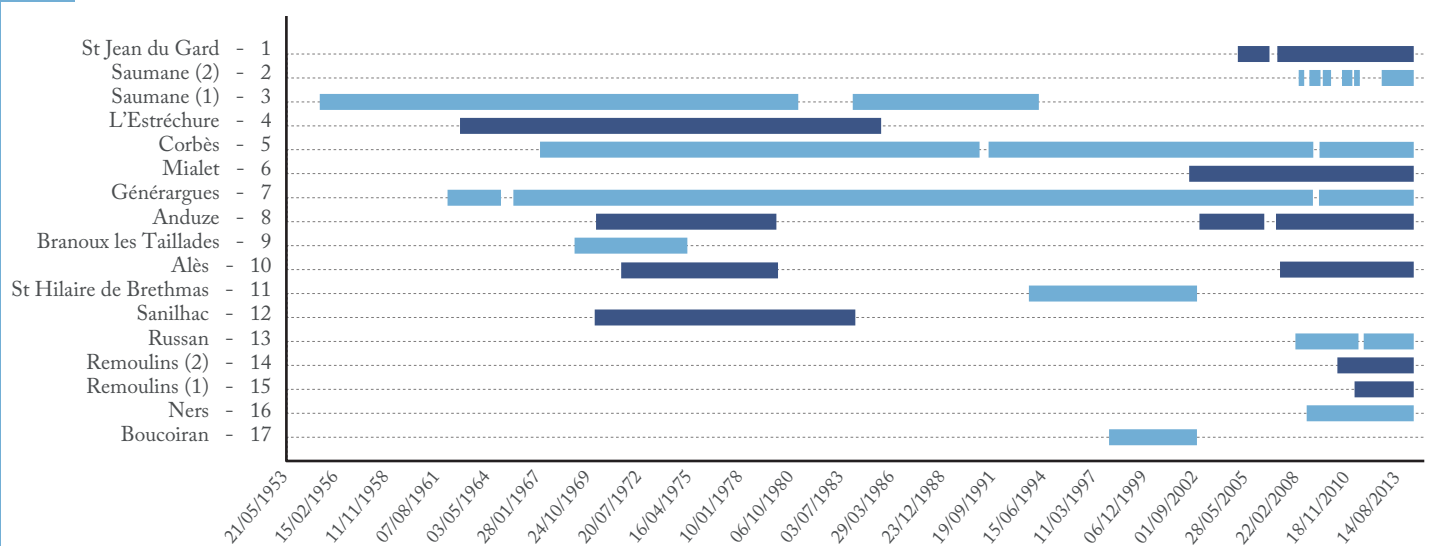
Dans le cas présent, les pourcentages de lacunes demeurent assez faibles pour la plus grande partie des chroniques (inférieurs à 10 % pour 13 des 17 postes). Le nombre d'enregistrements qui varie ainsi d'un peu plus de 1 100 à plus de 18 500 sur l'ensemble des chroniques disponibles, et de quelques centaines à plus de 6 000 sur l'ensemble des périodes estivales. Le choix des postes est naturellement fondé sur ce critère, et ne seront ainsi retenus que ceux offrant la plus grande quantité de données (totales et estivales).

Il n'est pas non plus sans compter sur les erreurs d'enregistrement (*i.e.* valeurs aberrantes), le déplacement des postes par les crues, etc. Les méthodes employées pour construire la courbe de tarage, l'entretien des stations, etc. sont également autant d'éléments déterminants dans la fiabilité des données, dont il faut tenir compte. En effet, la qualité et la fiabilité de la mesure dépendent, indirectement et en partie, de la finalité de la mise en place du système de mesures : les stations servant de référence pour les alertes (*e.g.* la station du Gardon de Saint Jean à Corbès, pour le suivi des étiages sur le bassin amont des Gardons), sont assurément mieux suivies et donc potentiellement plus fiables, par exemple.

À ce propos, un dernier point peut être souligné. Si, dans le cas présent, la précision des mesures n'est pas une exigence, il faut garder à l'esprit que la majorité des stations hydrométriques sont relativement peu adaptées aux étiages marqués. Le bassin des Gardons ne compte qu'une seule station d'étiage (*i.e.* la station du Gardon à Remoulins implantée à l'aval du bassin), donc plus sensible aux faibles débits (*e.g.* moins de marges d'erreur). Toutefois, sa mise en service est trop récente (2008)



G3 PROFONDEUR HISTORIQUE DES ENREGISTREMENTS DE DÉBITS SUR LE BASSIN DES GARDONS



T3 LACUNES DES CHRONIQUES DE DÉBITS DISPONIBLES SUR LE BASSIN DES GARDONS

	Date début	Date fin	Nb enregistrements ¹	Lacunes ²	Nb enregistrements ³	Lacunes ⁴
St Jean du Gard - 1	11/02/2005	30/04/2014	3 245	3.6	1 079	1.7
Saumane (2) - 2	21/04/2008	30/04/2014	882	59.9	195	73.4
Saumane (1) - 3	09/03/1955	12/01/1994	13 039	8.1	4 344	8.7
L'Estréchure - 4	01/09/1962	31/08/1985	8 375	0.3	2 806	0
Corbès - 5	01/01/1967	30/04/2014	16 894	2.3	5 644	1.6
Miallet - 6	01/03/2002	30/04/2014	4 441	0.1	1 464	0
Généragues - 7	01/02/1962	30/04/2014	18 558	2.7	6 127	3.4
Anduze - 8	01/01/1970	30/04/2014	7 714	52.4	2 410	7
Branoux les Taillades - 9	01/01/1969	31/12/1974	2 166	1.1	732	0
Alès - 10	05/07/1971	30/04/2014	5 741	63.3	1 918	0.2
St Hilaire de Brethmas - 11	23/07/1993	08/09/2002	3 335	0	1 146	3.7
Sanilhac - 12	01/01/1970	28/02/1984	5 102	1.4	1 693	0.9
Russan - 13	03/04/2008	27/04/2014	1 963	11.4	543	25.8
Remoulins (2) - 14	20/01/2010	30/04/2014	1 562	0	488	0
Remoulins (1) - 15	06/01/2011	31/03/2014	1 181	0	366	0
Ners - 16	03/04/2008	30/04/2014	2 219	0	732	0
Boucoiran - 17	01/01/1998	31/08/2002	1 704	0	580	0

¹ Nombre de données disponibles sur la série totale de mesures (début - fin enregistrement)

² Pourcentage de données manquantes sur la série totale de mesures

³ Nombre de données disponibles sur la période estivale (début juin à fin septembre)

⁴ Pourcentage de données estivales manquantes sur l'ensemble des années mesurées

Source: Banque Hydro, 2014

Ingrid CANOVAS, 2016

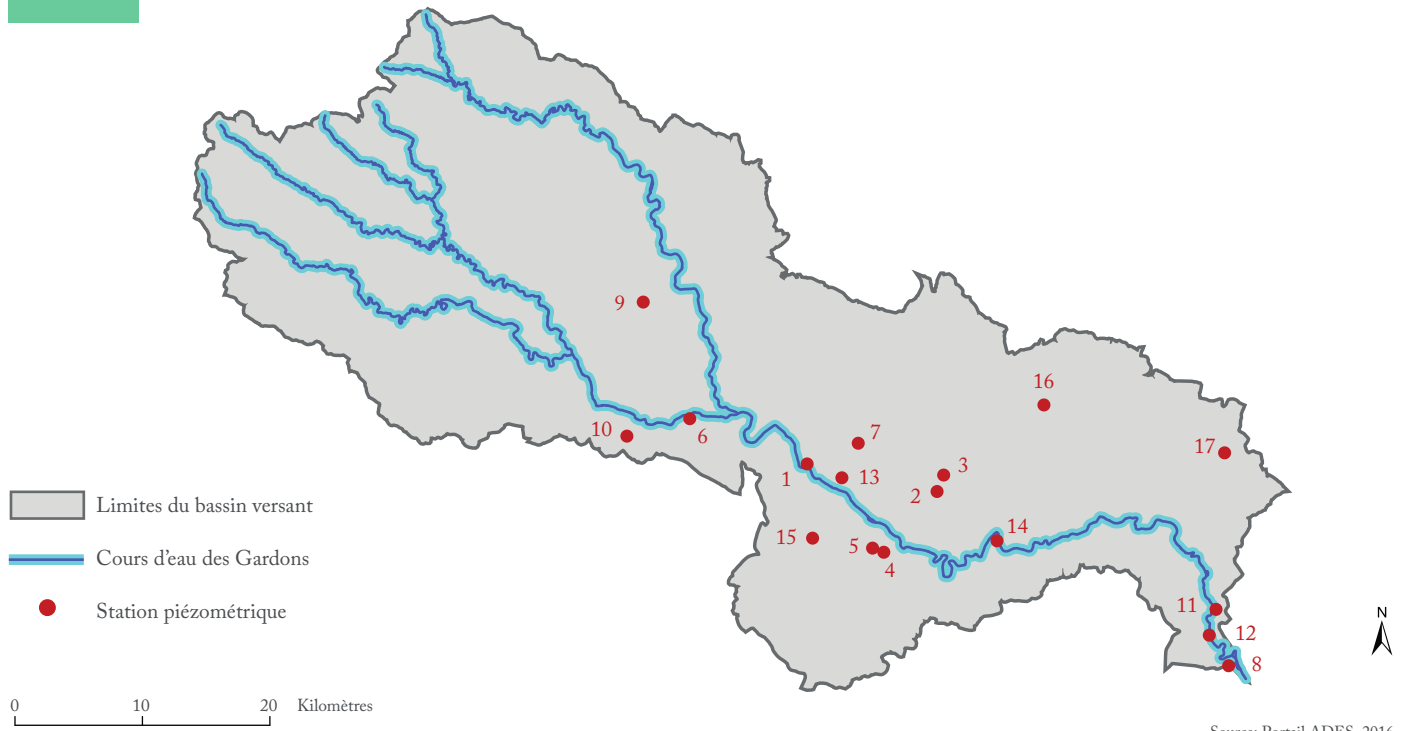
pour permettre l'exploitation de la série d'enregistrements via une analyse statistique probabiliste (*i.e.* faible nombre de valeurs de débit).

Globalement, et au vu des données, seront retenus en priorité les postes de Saumane, Générargues, Corbès, Anduze, Alès, Ners-Boucoiran (deux postes différents pouvant fournir une chronique unique, car situés à quelques centaines de mètres) et Sanilhac. En couvrant les différentes sections des Gardons, sur une période espérée suffisante (*i.e.* entre une vingtaine d'années et un peu plus de soixante ans d'enregistrements journaliers), le recours à ces stations devrait autoriser une analyse spatiale intéressante et révéler des dynamiques, probablement marquées de l'amont vers l'aval du bassin.

Le suivi piézométrique Des constats similaires peuvent être faits pour les postes de mesure des niveaux piézométriques (ENCADRÉ E4). Sur les 16 postes de mesures exploitables sur le bassin des Gardons, 11 sont encore en service. La distribution spatiale de ce réseau est cependant moins homogène que celle du réseau de suivi des débits. D'une part, plusieurs postes se situent sur une même entité hydrogéologique et sur des communes voisines (*e.g.* les postes de Cardet et de Massillargues - Attuech), voire parfois sur la même commune (*e.g.* deux postes sur la commune de La Calmette). Une telle disposition peut soit présenter l'avantage de compléter la chronique lacunaire d'un des postes concernés, soit faire doublon. D'autre part, il apparaît un déséquilibre amont - aval très marqué. Le réseau, plus dense et concentré sur la partie centre-aval du bassin, est quasi inexistant sur la partie amont. Selon toute vraisemblance, cette configuration doit se justifier, au moins partiellement, par la présence de socle en amont (*i.e.* faible réserve souterraine, et localisée) et d'aquifères sédimentaires (parfois karstiques) et alluviaux en aval (*i.e.* fort potentiel de réserve souterraine plus étendu).

Les données des séries de mesures sont exprimées en hauteur moyenne journalière (mètres NGF), mais la fréquence des relevés est très disparate. Durant la période 1983 à 1998, en moyenne, seules deux valeurs journalières par mois sont relevées, ce qui explique les nombreuses lacunes et l'effet « pointillé » de certaines séries illustrées par l'ENCADRÉ E4. À partir des années 2000, les enregistrements sont plus réguliers et plus fréquents (majoritairement journaliers), mais le nombre de lacunes n'en demeure pas moins important. En faisant donc abstraction des données antérieures à 1998, entre 11 années (*e.g.* postes de Valliguières et de Bourdic) et 19 années (*e.g.* poste de Sainte Anastasie) de données journalières (plus ou moins lacunaires) sont exploitables.

L'offre est certes loin d'être équivalente à celle proposée par les stations de mesure de débit, que ce soit en termes de longueur des chroniques ou de densité de valeurs : sans compter le poste de Montfrin (1), on dénombre entre 3000 et plus de 6000 valeurs sur les périodes d'enregistrement totales, et entre 1000 et 2000 valeurs sur les saisons estivales. Ces conditions devraient néanmoins s'avérer suffisantes pour mener une approche statistique des données. Cela étant, cette dernière sera sans doute moins fiable et robuste, puisqu'un nombre plus limité de cycles hydrologiques, donc de situations extrêmes, sera pris en compte.



G4 PROFONDEUR HISTORIQUE DES ENREGISTREMENTS PIÉZOMÉTRIQUES SUR LE BASSIN DES GARDONS



T4 LACUNES DES CHRONIQUES DE HAUTEUR PIÉZOMÉTRIQUE DISPONIBLES SUR LE BASSIN DES GARDONS

	Date début	Date fin	Nb enregistrements ¹	Lacunes ²	Nb enregistrements ³	Lacunes ⁴
Boucoiran Nozières - 1	28/07/2000	27/07/2015	3 909	28.6	1 394	19.8
Bourdic (1) - 2	28/07/2000	31/08/2015	4 668	15.3	1 189	11.4
Bourdic (2) - 3	13/01/2005	10/02/2016	3 560	12	1 598	8.1
La Calmette (1) - 4	04/10/2000	01/02/2016	5 339	4.6	1 369	6.5
La Calmette (2) - 5	19/01/1984	10/02/2016	4 627	60.5	1 637	7.5
Cardet - 6	14/11/2003	17/02/2016	4 255	5	1 346	8.1
Castelnau Valence - 7	24/07/2000	31/12/2014	4 529	14.1	1 408	3.8
Comps - 8	14/03/2004	17/02/2016	4 000	8.2	1 531	55.2
La Grand Combe - 9	12/12/2003	17/02/2016	4 072	8.5	1 686	7.9
Massillargues Attuech - 10	13/11/2003	10/02/2016	4 028	9.9	1 333	8.9
Monfrin (1) - 11	01/02/1984	18/11/1997	4 353	62.8	63	96.3
Monfrin (2) - 12	19/01/1984	17/02/2016	204	96	1 408	53.8
Moussac (1) - 13	10/01/2001	31/08/2015	4 146	22.5	1 370	23.9
Ste Anastasie - 14	05/02/1997	17/02/2016	6 441	7.4	1 579	15.2
St Geniès de Malgoirès - 15	13/08/2000	31/08/2005	4 842	11.9	1 204	17.8
St Quentin la Poterie - 16	11/12/2003	17/02/2016	3 895	12.5	2 080	10.3
Valliguières - 17	08/11/2004	08/02/2016	3 165	23	1 061	20.9

¹ Nombre de données disponibles sur la série totale de mesures (début - fin enregistrement)

² Pourcentage de données manquantes sur la série totale de mesures

³ Nombre de données disponibles sur la période estivale (début juin à fin septembre)

⁴ Pourcentage de données estivales manquantes sur l'ensemble des années mesurées

Comme pour les stations limnimétriques, les erreurs d'enregistrements sont à prévoir et le type de matériel, l'entretien des postes, etc. constituent des facteurs non négligeables qui influent sur la qualité de l'information recueillie. À ce titre, le poste piézométrique de Sainte Anastasie, par exemple, est certainement à privilégier, puisqu'il est utilisé pour le déclenchement des seuils d'alerte, tels que définis dans l'arrêté-cadre sécheresse du Gard. Il est clair qu'une analyse de l'effectivité de ce réseau de mesure (et du réseau de mesure des débits des cours d'eau) se pose. Certainement, faudrait-il aller vers moins de stations de mesure, mais mieux réparties et mieux suivies, qui offriraient des mesures plus fiables en basses eaux pour certaines, et en moyennes et hautes eaux pour d'autres.

De ces constats, tous les postes seront retenus dans un premier temps. Puis, selon les résultats obtenus, un poste par unité hydrogéologique sera conservé. Cette sélection devrait permettre de mener une analyse sur les périodes les plus étendues possible, sans doubler l'information piézométrique, et en couvrant au maximum les différentes entités hydrogéologiques présentes sur le bassin versant.

Les données climatiques — Les données climatiques disponibles, retenues pour renseigner les variables essentielles « précipitations » et « perte évaporatoire », correspondent respectivement aux mesures hauteurs de précipitations et de température.

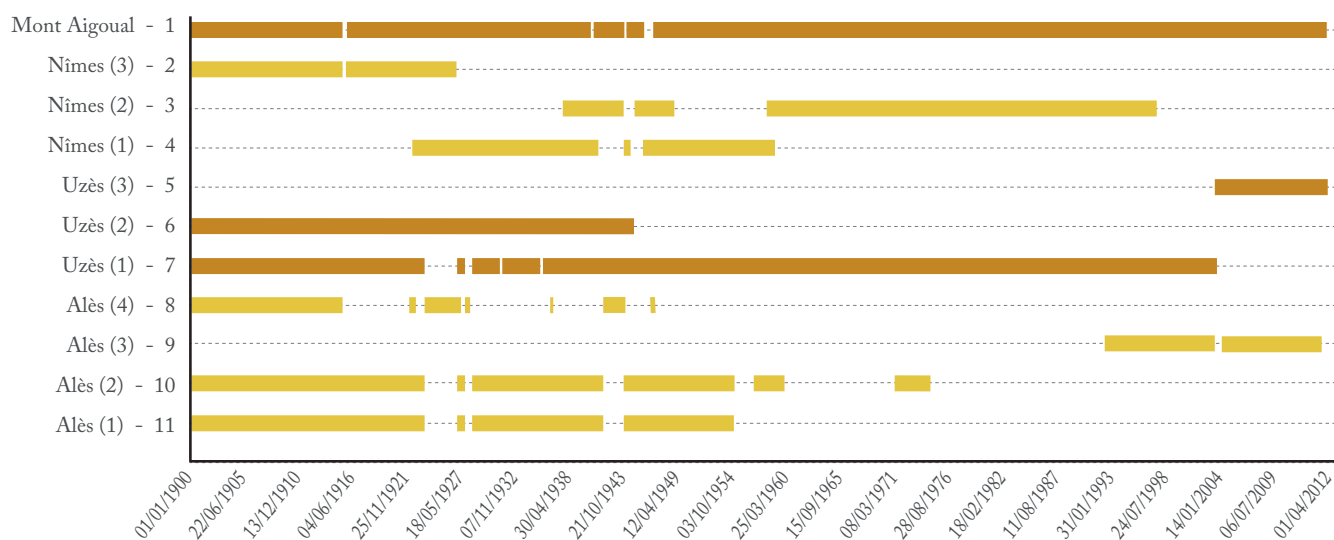
Les chroniques de pluie De nombreux postes pluviométriques sont présents sur le bassin des Gardons, puisqu'il s'agit d'un paramètre mesuré depuis très longtemps (FIGURE 5.5). Parmi ces derniers, 4 postes pluviométriques disponibles semblent intéressants et pertinents pour le territoire étudié, bien qu'ils ne soient pas tous situés dans le bassin (ENCADRÉ E5). Les postes de Nîmes, Uzès, Alès et de Valleraugue (Mont Aigoual) possèdent effectivement les chroniques les plus longues (jusqu'à plus d'un siècle, en recréant la chronique de chaque poste à partir des différents postes d'une même commune). En plus de concorder avec les périodes de mesure des données hydrologiques, l'ensemble des postes couvre relativement bien le bassin, la dynamique des pluies étant plus large que celle des débits ou des piézomètres. Il est donc inutile d'avoir recours à un réseau plus dense et d'augmenter inutilement la charge de données à traiter.

Outre une période de mesure très étendue, les séries pluviométriques retenues ont l'avantage d'offrir un nombre très faible de lacunes, comparativement aux informations hydrologiques. Moins de 5 % de données manquantes sont à déplorer pour les séries totales d'enregistrement. Ce pourcentage devrait être toutefois revu à la baisse, après reconstitution d'une chronique unique et propre aux postes de Nîmes, d'Uzès et d'Alès, à l'aide des trois séries disponibles à Nîmes et à Uzès et des quatre séries à Alès.

Pareillement aux données hydrologiques, les informations pluviométriques sont journalières (*i.e.* hauteur moyenne journalière, exprimée en millimètre), particularité qui devrait assurément permettre une analyse statistique intéressante. Ajoutée à cela, la grande profondeur historique de l'information pluviométrique devrait, sans conteste, contribuer à l'établissement d'une structure robuste (*i.e.* régime pluviométrique) et la définition de seuils pertinents, puisqu'un nombre important (suffisant ?) de cycles et de situations extrêmes sont supposés inclus.



G5 PROFONDEUR HISTORIQUE DES ENREGISTREMENTS DE PRÉCIPITATIONS RETENUS SUR LES GARDONS



T5 LACUNES DES CHRONIQUES DE PRÉCIPITATIONS RETENUS POUR LE BASSIN DES GARDONS

	Date début	Date fin	Nb données ¹	Lacunes ²	Nb données ³	Lacunes ⁴
Mont Aigoual - 1	01/01/1900	31/12/2012	40 448	0.6	13 608	1.3
Nîmes (3) - 2	01/01/1900	31/03/1926	9 586	0	2 976	6.2
Nîmes (2) - 3	01/01/1937	31/12/1995	17 618	0.6	5 948	17.4
Nîmes (1) - 4	01/01/1922	31/12/1957	11 655	0	3 843	12.5
Uzès (3) - 5	01/01/2002	31/12/2012	3 990	0.7	1 342	0
Uzès (2) - 6	01/01/1900	30/11/1943	15 480	3.5	4 991	7
Uzès (1) - 7	01/01/1900	31/12/2001	34 282	3	11 100	10.8
Alès (4) - 8	01/01/1900	31/12/1945	7 458	4.2	2 348	58.2
Alès (3) - 9	01/01/1991	31/05/2012	7 488	0.4	2 470	3.6
Alès (2) - 10	01/01/1900	31/05/1973	19 076	2.8	6 312	29.1
Alès (1) - 11	01/01/1941	31/12/1990	17 259	0	5 734	6
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-

¹ Nombre de données disponibles sur la série totale de mesures (début - fin enregistrement)

² Pourcentage de données manquantes sur la série totale de mesures

³ Nombre de données disponibles sur la période estivale (début juin à fin septembre)

⁴ Pourcentage de données estivales manquantes sur l'ensemble des années mesurées

Source: Météo France, 2012

Ingrid CANOVAS, 2016

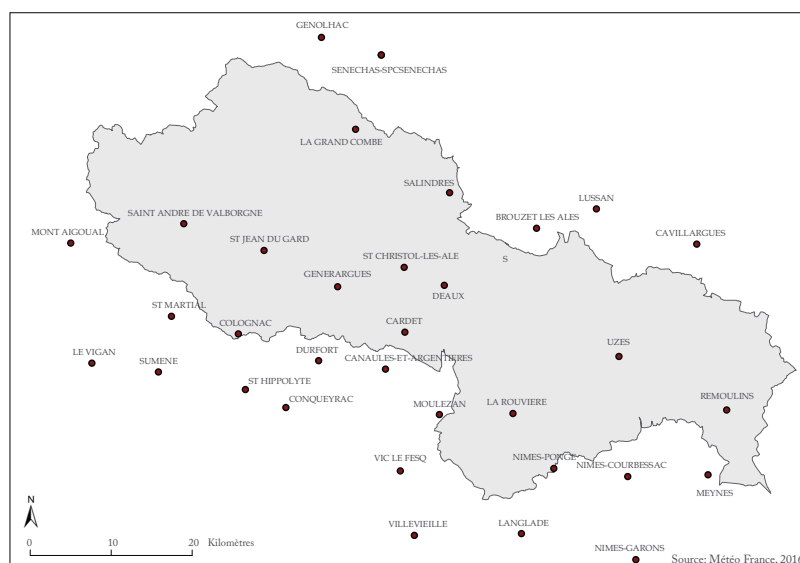


FIGURE 5.5 : LOCALISATION DES POSTES DE MESURE EN SERVICE, SUSCEPTIBLES DE RENSEIGNER L'INFORMATION CLIMATIQUE SUR LE BASSIN DES GARDONS

Le seul inconvénient à noter est l'accès réglementé aux données.

Les données de température Comme pour les précipitations, les données d'évapotranspiration potentielle (ETP) ne sont pas en accès libre et gratuit. Une des solutions consiste donc à faire appel aux données de température.

Sur le site Internet infoclimat.fr, deux postes de mesures, hors bassin (mais concordant avec deux des postes pluviométriques retenus), offrent des chroniques satisfaisantes : les stations du Mont Aigoual et de Nîmes. Les valeurs traduisent des moyennes mensuelles (exprimées en degré Celsius), et les séries correspondantes ne présentent aucune lacune. De plus, les chroniques ont la particularité d'être relativement longues, 95 et 93 années respectivement pour Le Mont Aigoual et Nîmes, ce qui permet de les confronter aisément aux données hydrologiques et pluviométriques.

En revanche, il sera très probablement indispensable d'opérer un changement de résolution de l'information, afin de cadrer avec la résolution de l'information pluviométrique, et de pouvoir mener une analyse statistique plus solide. La donnée mensuelle devra nécessairement être transcrite en valeur journalière.

Les données anthropiques — Les données anthropiques disponibles, retenues pour renseigner les variables essentielles relatives aux « prélèvements anthropiques » et au « volume anthropique disponible », correspondent respectivement aux mesures des volumes prélevés et du volume stocké dans les barrages (ou à leur taux de remplissage).

Le volume prélevé pour les usages anthropiques Les données afférentes aux prélèvements anthropiques pour la satisfaction des usages agricoles (*i.e.* irrigation et alimentation des canaux d'irrigation), domestiques (*e.g.* alimentation en eau potable (AEP), remplissage des piscines, arrosage des jardins) et industriels (*i.e.* usage économique essentiellement, en l'absence de centrales hydroélectriques dans le secteur d'étude) sont beaucoup moins denses (ENCADRÉ E6).

Depuis janvier 2015, elles font l'objet d'un regroupement et d'une harmonisation au sein d'une base unique (Banque Nationale des Prélèvements (BNP)), qui recense l'ensemble des ouvrages déclarés et les informations qui s'y rapportent (*e.g.* volume prélevé, usage, source prélevée).

Les données de prélèvements anthropiques présentent un certain nombre de contraintes. Tout d'abord, elles sont renseignées à une fréquence annuelle, puisqu'elles résultent du comptage annuel des volumes nets prélevés par poste (exprimés en milliers de mètres cubes). De plus, malgré les obligations récentes de déclaration des ouvrages de prélèvements et de comptabilisation du volume de la ressource soutiré, renforcées par des contrôles réguliers, il n'est pas à exclure que le recensement des ouvrages et des volumes prélevés ne soit pas, aujourd'hui encore, totalement exhaustif, et que des prises d'eau, en rivière notamment, s'opèrent encore sans comptage ni déclaration (en particulier pour l'irrigation de cultures et de jardins privés).

Cette dernière hypothèse trouve confirmation dans les séries de données disponibles sur le portail ADES⁸. Ces dernières montrent clairement une progression continue du nombre d'ouvrages en service chaque année, depuis 1988. Elles révèlent par ailleurs, en 2008, une hausse nette et considérable des volumes prélevés sur le bassin des Gardons. Cet écart ne semble pas uniquement résulter d'une exploitation accrue de la ressource, la population n'ayant pas augmenté de manière significative et les surfaces agricoles (SAU) accusant même une sensible diminution (FIGURE 5.6). Par conséquent, la tendance observée s'avère plutôt imputable à l'augmentation des postes recensés. Cela laisse sous-entendre que la demande ne s'est pas nécessairement intensifiée, sinon que les connaissances sur les volumes prélevés n'étaient certainement que très partielles avant 2008.

À l'heure actuelle, elles sont encore probablement incomplètes, mais elles tendent néanmoins, et de plus en plus, vers une réalité plus acceptable.

Sur cette seule base de données disponible (*i.e.* une valeur par an, sur 26 années non exhaustives, et sans variabilité interannuelle hormis le « boom » de 2008), il paraît extrêmement difficile de proposer une analyse statistique qui ait du sens. De plus, la donnée annuelle, correspondant à une somme, ne permet pas de décrire la variabilité intra-annuelle de la dynamique des prélèvements anthropiques, ni d'apprécier la part effectuée en période estivale. De gros efforts doivent donc être fournis dans ce domaine.

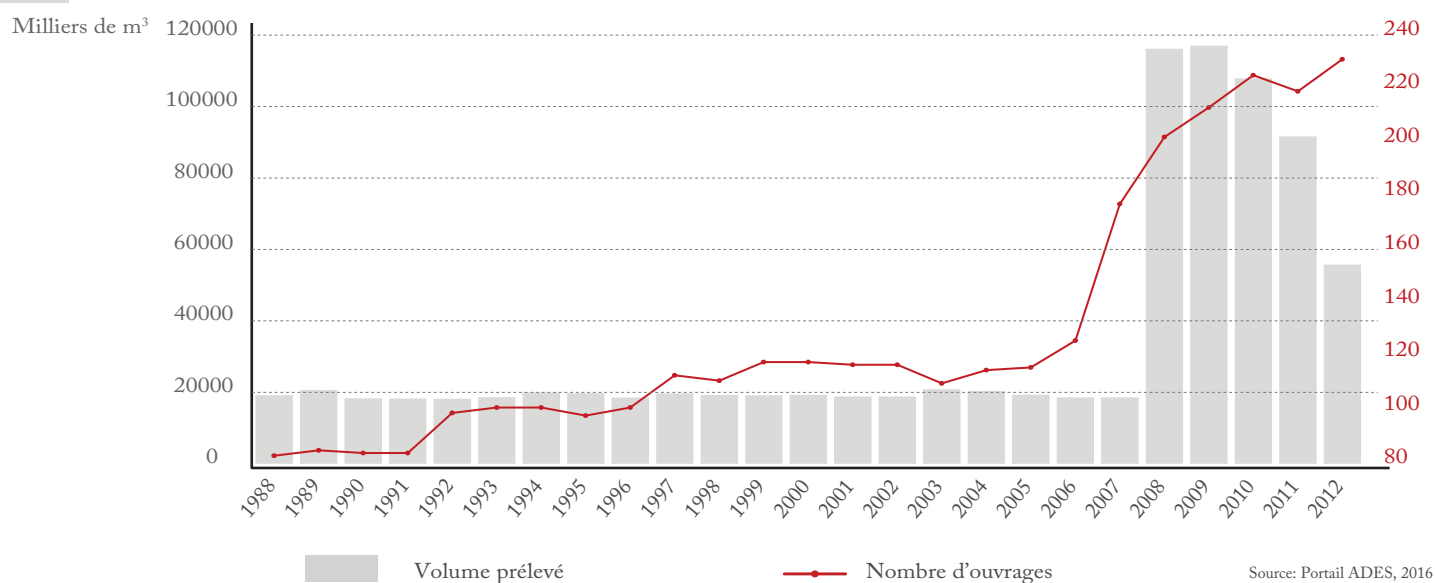
Le volume stocké dans les barrages Les informations relatives au volume contenu dans les réserves anthropiques sont disponibles dans les rapports hydrologiques réalisés par la DREAL du Lan-

8. URL : <www.adeseaufrance.fr>



Sources: BNP, 2016; SMAGE, 2016

G6 EVOLUTION DU NOMBRE D'OUVRAGES ET DU VOLUME ANNUEL PRÉLEVÉ SUR LE BASSIN DES GARDONS



Source: Portail ADES, 2016

T6 CHRONIQUES DES VOLUMES PRÉLEVÉS ET DU NOMBRE D'OUVRAGE SUR LE BASSIN DES GARDONS

Année	Volume Prélevé (Mm³) ¹	Nb ouvrages ²	Année	Volume Prélevé (Mm³) ¹	Nb ouvrages ²
1988	19 204,8	80	2005	19 348,5	114
1989	20 634,9	84	2006	18 585	117
1990	18 350,7	82	2007	18 585,3	165
1991	18 263,1	82	2008	116 201,9	176
1992	18 230,3	97	2009	117 055,6	191
1993	18 674,2	96	2010	107 893,3	203
1994	20 001,3	97	2011	9 1615,7	203
1995	19 759,1	89	2012	55 753,8	220
1996	18 520,5	94	-	-	-
1997	19 702,3	105	-	-	-
1998	19 300,5	104	-	-	-
1999	19 179,4	107	-	-	-
2000	19 304,1	106	-	-	-
2001	18 890,9	106	-	-	-
2002	18 851,2	106	-	-	-
2003	20 845,2	104	-	-	-
2004	20 391,4	111	-	-	-

¹ Volume annuel prélevé en milliers de m³ (tous usages confondus)

² Nombre d'ouvrages ayant servi à produire le volume annuel prélevé. Exemple: 19 204,8 milliers de m³ d'eau ont été prélevés par 80 ouvrages en 1988.

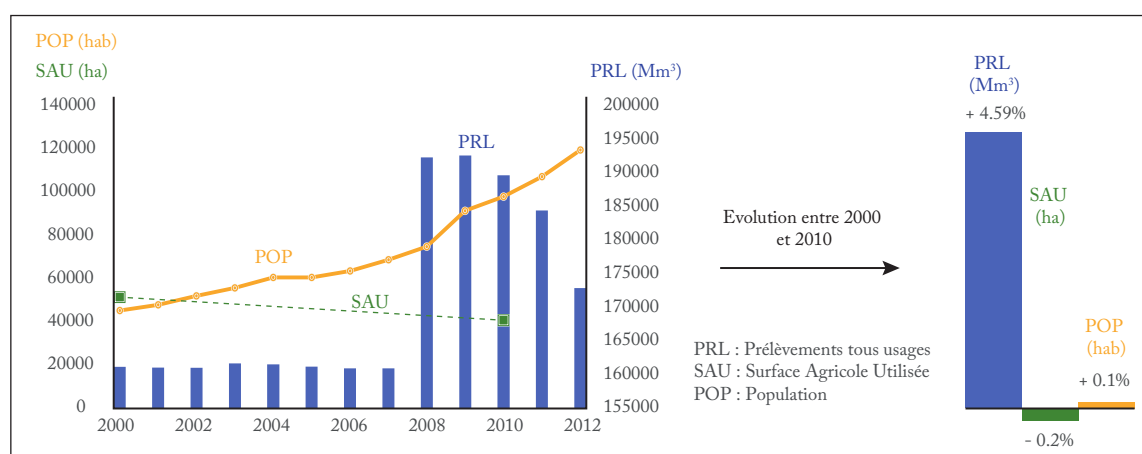


FIGURE 5.6 : COMPARAISON DE L'ÉVOLUTION DES VOLUMES ANNUELS PRÉLEVÉS SUR LE BASSIN DES GARDONS, DE LA POPULATION ET DES SURFACES AGRICOLES (SOURCES : RECENSEMENT AGRICOLE 2010, AGRESTE ET COLLECTIVITÉS LOCALES.GOUV.FR)

guedoc-Roussillon⁹. Ces bulletins (mensuels ou bimensuels) ont vocation à faire une synthèse régionale de la situation hydrologique mensuelle.

Parmi les variables décrites, sont spécifiés les taux de remplissage et les volumes stockés dans les barrages de Sainte Cécile d'Andorge et des Cambous (ENCADRÉ E7). Les informations sont disponibles depuis juillet 2004, et couvrent ainsi une période d'un peu plus de 11 années. Cela ne constitue malgré tout qu'une série de 84 valeurs (de volume exprimé en milliers de mètres cubes, ou de taux de remplissage exprimé en pourcentage), la fréquence des bulletins étant variable selon les années (mensuelle à bimestrielle).

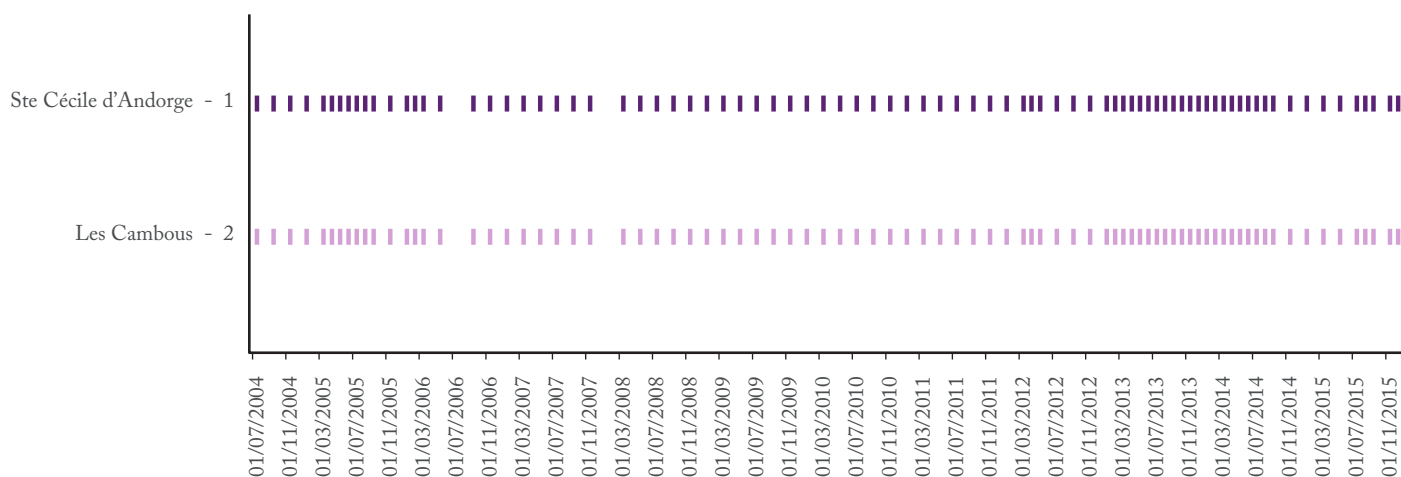
Ceci étant, les mois estivaux sont renseignés sur la quasi-totalité de la période 2004 - 2015. Dans le cas où une étude statistique n'offrirait pas de résultats probants, ces informations seront employées comme renseignement annexe pour la validation du modèle. À titre d'exemple, un pourcentage très faible du taux de remplissage des barrages pourrait confirmer une situation évaluée (par l'indice de criticité) comme très problématique. En témoignant d'une très forte mobilisation du stock anthropique, le taux de remplissage traduit partiellement et indirectement le degré de sévérité de la situation évaluée.

Les données de qualité — Les informations portant sur la qualité de l'eau, retenues pour renseigner les variables essentielles propres à la qualité biologique et chimique des eaux superficielle et souterraine, ainsi qu'à la qualité de l'eau de baignade, correspondent à des indices calculés par des autorités compétentes, sur des critères réglementaires. Le recours aux indices existants a été ici préféré aux données brutes par souci d'homogénéité de l'information véhiculée. En effet, tous les paramètres ne font pas l'objet d'un suivi régulier (*i.e.* suppression et/ou introduction de certains paramètres dans l'analyse de l'état qualitatif de la ressource), notamment parce que la réglementation évolue.

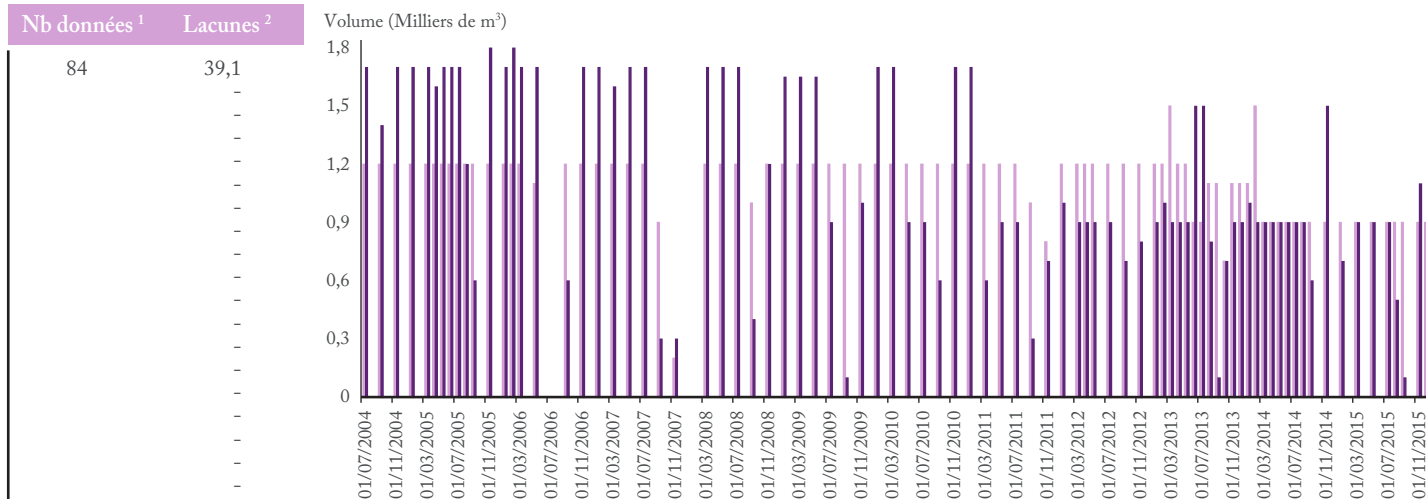
9. URL : <<http://www.languedoc-roussillon.developpement-durable.gouv.fr/>>



G7 PROFONDEUR HISTORIQUE DES DONNÉES RELATIVES AU REMPLISSAGE DES BARRAGES SUR LE BASSIN DES GARDONS



T7 LACUNES DES SÉRIES DE DONNÉES SUR LE REMPLISSAGE DES BARRAGES SUR LE BASSIN DES GARDONS



¹ Nombre de données disponibles sur la série totale de mesures (une valeur par mois)

² Pourcentage de données manquantes sur la série totale de mesures

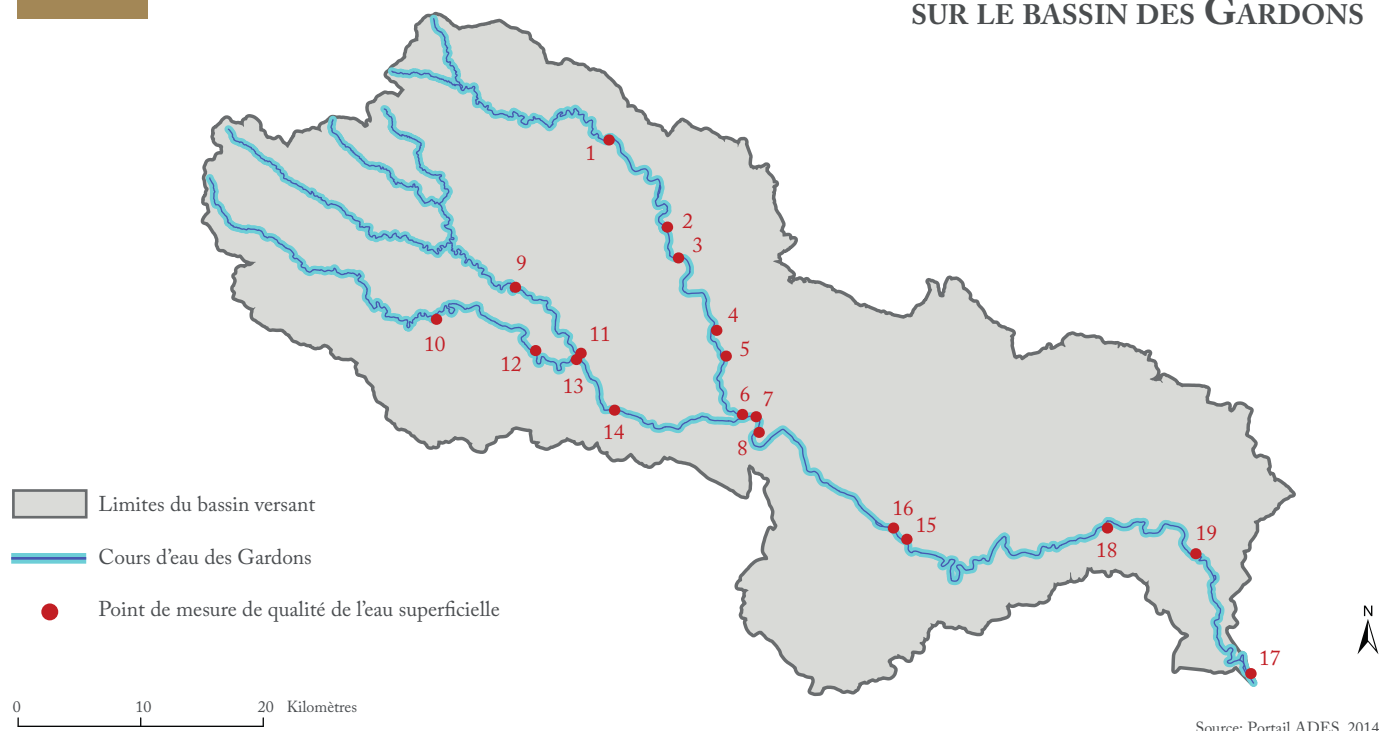
Qualité des eaux superficielles et souterraines Un certain nombre de sites fait l'objet d'un suivi qualitatif tant superficiel que souterrain (ENCADRÉS E8 et E9). Toutefois, comme pour les données de prélèvements, une seule valeur par an, relative à la qualité des cours d'eau (biologique et chimique) et de l'eau souterraine (chimique), renseignées toutes deux par un indice calculé (*e.g.* très bon, bon) à partir de mesures de paramètres spécifiques (*e.g.* oxygène, température) est disponible. De plus, la date à laquelle les mesures sont effectuées n'est pas précisée (en période de hautes ou de basses eaux?), ce qui a une importance significative puisque plus il y a d'eau, et plus le potentiel de dilution est important, et meilleure est la qualité. Ainsi, pour caractériser un état qualitatif en période de basses eaux, ces informations sont peu pertinentes. Au minimum, la date de la mesure devrait être connue et une valeur par mois serait utile.

Dans le détail, la Directive européenne 2000/60/CE (DCE) impose de mettre en place des programmes de surveillance permettant de connaître l'état des milieux aquatiques et d'identifier les causes de leur dégradation, de façon à orienter les actions à mettre en œuvre pour que ces milieux atteignent le bon état. Cela se traduit concrètement par la mise en place de réseaux de surveillance sur les masses d'eau souterraines et sur les cours d'eau, et à y effectuer des contrôles réguliers (*i.e.* de la surveillance) de paramètres spécifiques (*e.g.* oxygène dissout, concentration en nitrate).

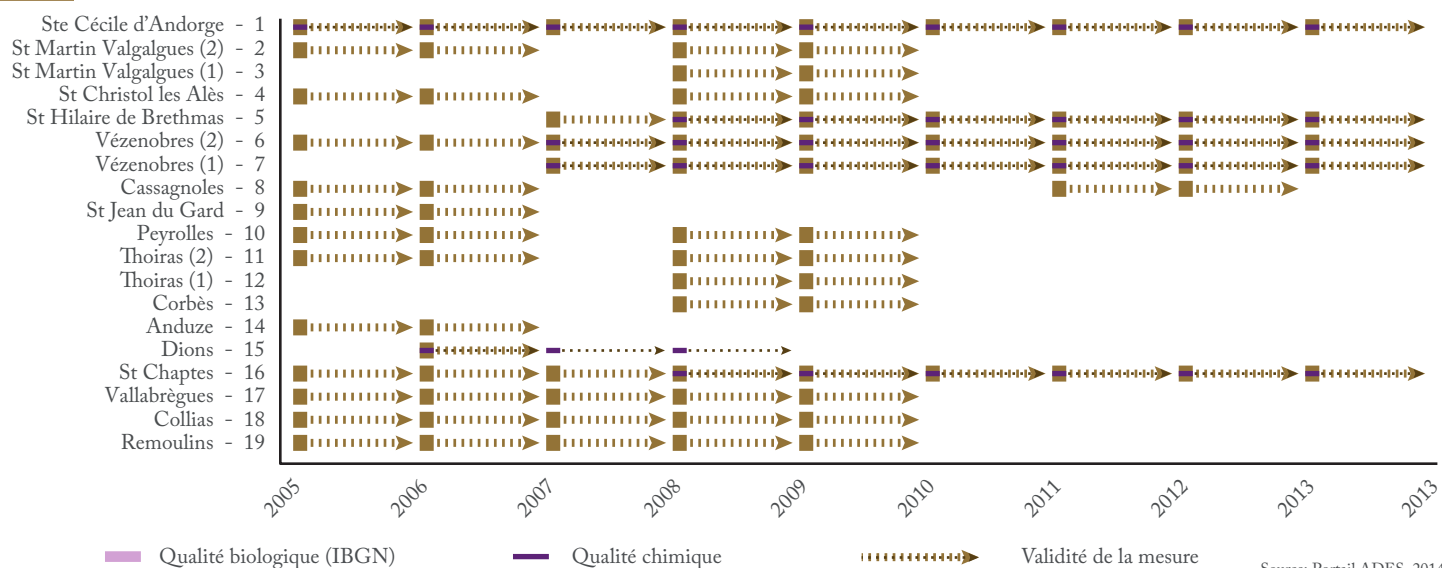
Pour les eaux souterraines, la maîtrise d'ouvrage de ces réseaux est principalement assurée par l'Agence de l'eau RM et C, mais aussi par des collectivités locales. Les données brutes de la qualité des eaux souterraines (*i.e.* état chimique et biologique) sont consultables et téléchargeables sur la banque ADES. Les seuils fixés sont détaillés dans l'Arrêté du 17 décembre 2008, qui établit les critères d'évaluation et les modalités de détermination de l'état des eaux. Mais globalement, pour chaque année, un indice calculé qui s'échelonne sur quatre niveaux : Très bon état, Bon état, État moyen, État insuffisant.

Concernant les eaux superficielles, la maîtrise d'ouvrage des réseaux est assurée par l'Agence de l'eau RM et C, les DREAL du bassin Rhône-Méditerranée et l'ONEMA. Les résultats sont présentés conformément à Arrêté du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface pris en application des articles R. 212-10, R. 212-11 et R. 212-18 du code de l'environnement. Ainsi, les résultats pris en compte pour l'évaluation des éléments biologiques et physicochimiques de l'état écologique de l'année n sont ceux des années n et $n-1$. Les résultats pris en compte pour l'évaluation de l'état chimique et des polluants spécifiques de l'état écologique de l'année n sont les derniers connus des années $n-2$, $n-1$ et n . L'ancien système d'évaluation de la qualité des eaux, le SEQ-Eau, n'est plus en vigueur depuis mars 2009. Les niveaux définis sont identiques à ceux se rapportant aux indices de qualité des eaux souterraines (*e.g.* Très bon état, Bon état).

Qualité de l'eau de baignade La qualité de l'eau de baignade représente un facteur de santé, mais aussi un élément important de développement touristique. C'est la raison pour laquelle de nombreux points de contrôle sont suivis sur l'ensemble du linéaire des Gardons (ENCADRÉ E10).



G8 PROFONDEUR HISTORIQUE DES MESURES DE QUALITÉ DE L'EAU SUPERFICIELLE SUR LES GARDONS

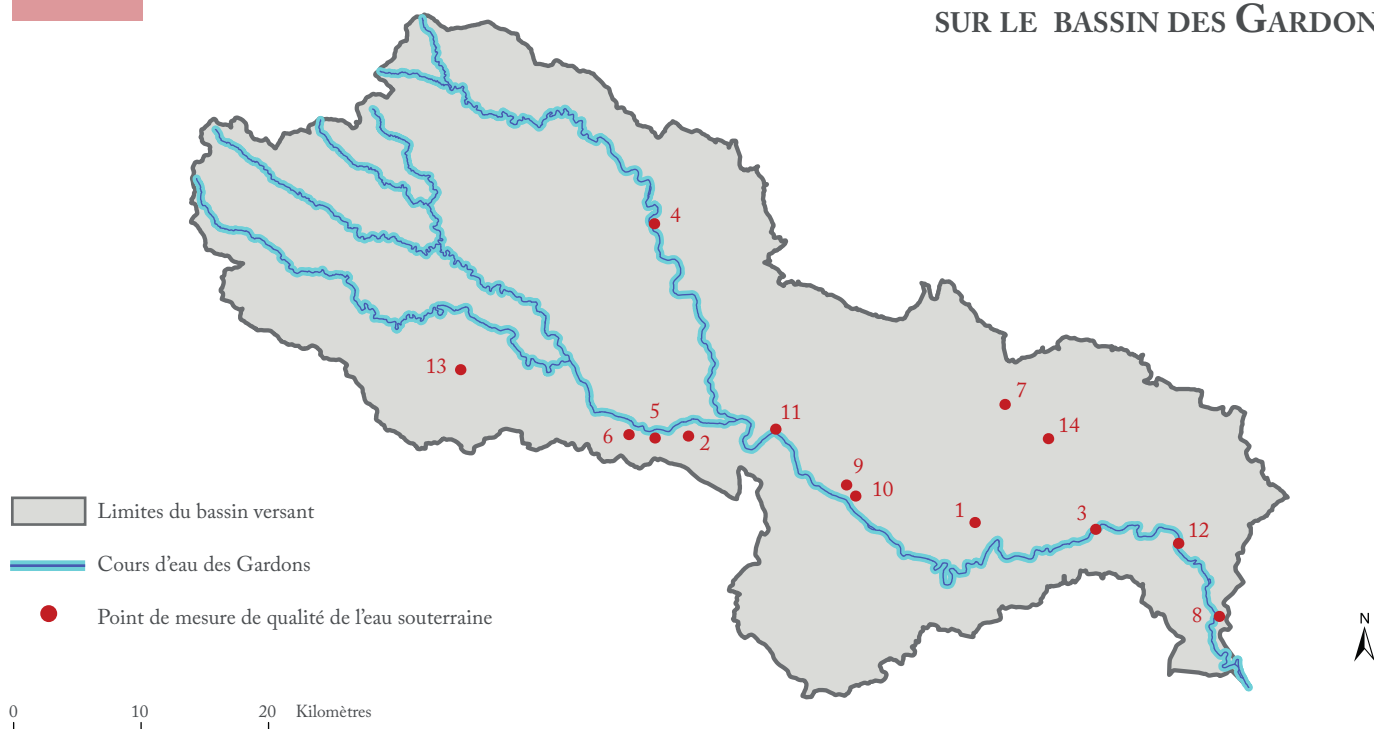


T8 LACUNES DES SÉRIES DE MESURES DE QUALITÉ DE L'EAU SUPERFICIELLE SUR LE BASSIN DES GARDONS

	Période	Nb données ¹	Lacunes ²		Période	Nb données ¹	Lacunes ²
Ste Cécile d'Andorge - 1	2005 - 2013	9	-		2005 - 2013	9	-
St Martin Valgalgues (2) - 2	-	-	-		2005 - 2009	4	-
St Martin Valgalgues (1) - 3	-	-	-		2008 - 2009	2	-
St Christol les Alès - 4	-	-	-		2005 - 2009	4	-
St Hilaire de Brethmas - 5	2008 - 2013	6	-		2007 - 2013	7	-
Vézenobres (2) - 6	2007 - 2013	7	-		2005 - 2013	9	-
Vézenobres (1) - 7	2007 - 2013	7	-		2007 - 2013	7	-
Cassagnoles - 8	-	-	-		2005 - 2012	4	-
St Jean du Gard - 9	-	-	-		2005 - 2007	2	-
Peyrolles - 10	-	-	-		2005 - 2009	4	-
Thoiras (2) - 11	-	-	-		2005 - 2009	4	-
Thoiras (1) - 12	-	-	-		2008 - 2009	2	-
Corbès - 13	-	-	-		2008 - 2009	2	-
Anduze - 14	-	-	-		2005 - 2006	2	-
Dions - 15	2006 - 2008	3	-		2006 - 2007	2	-
St Chaptes - 16	2008 - 2013	6	-		2005 - 2013	9	-
Vallabrègues - 17	-	-	-		2005 - 2009	5	-
Collias - 18	-	-	-		2005 - 2009	5	-
Remoulins - 19	-	-	-		2005 - 2009	5	-

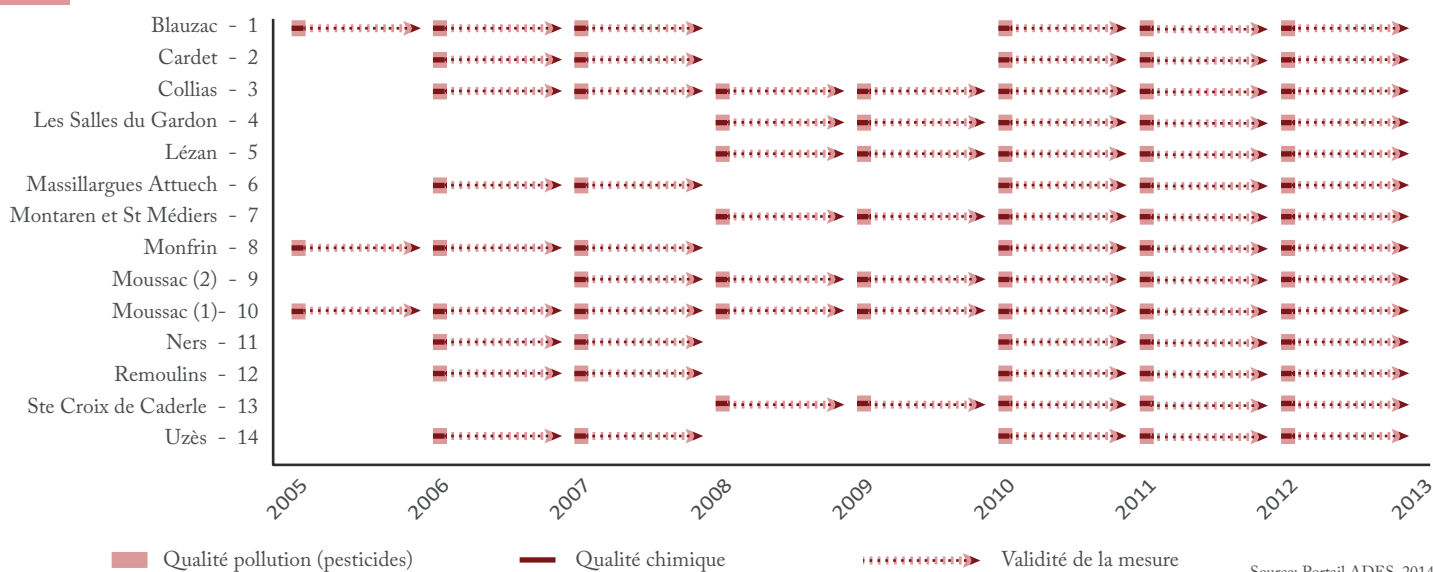
¹ Nombre de données disponibles sur la série totale de mesures (une valeur par an)

² Pourcentage de données manquantes sur la série totale de mesures à chaque poste



Source: Portail ADES, 2016

G9 PROFONDEUR HISTORIQUE DES MESURES DE LA QUALITÉ SOUTERRAINE SUR LE BASSIN DES GARDONS

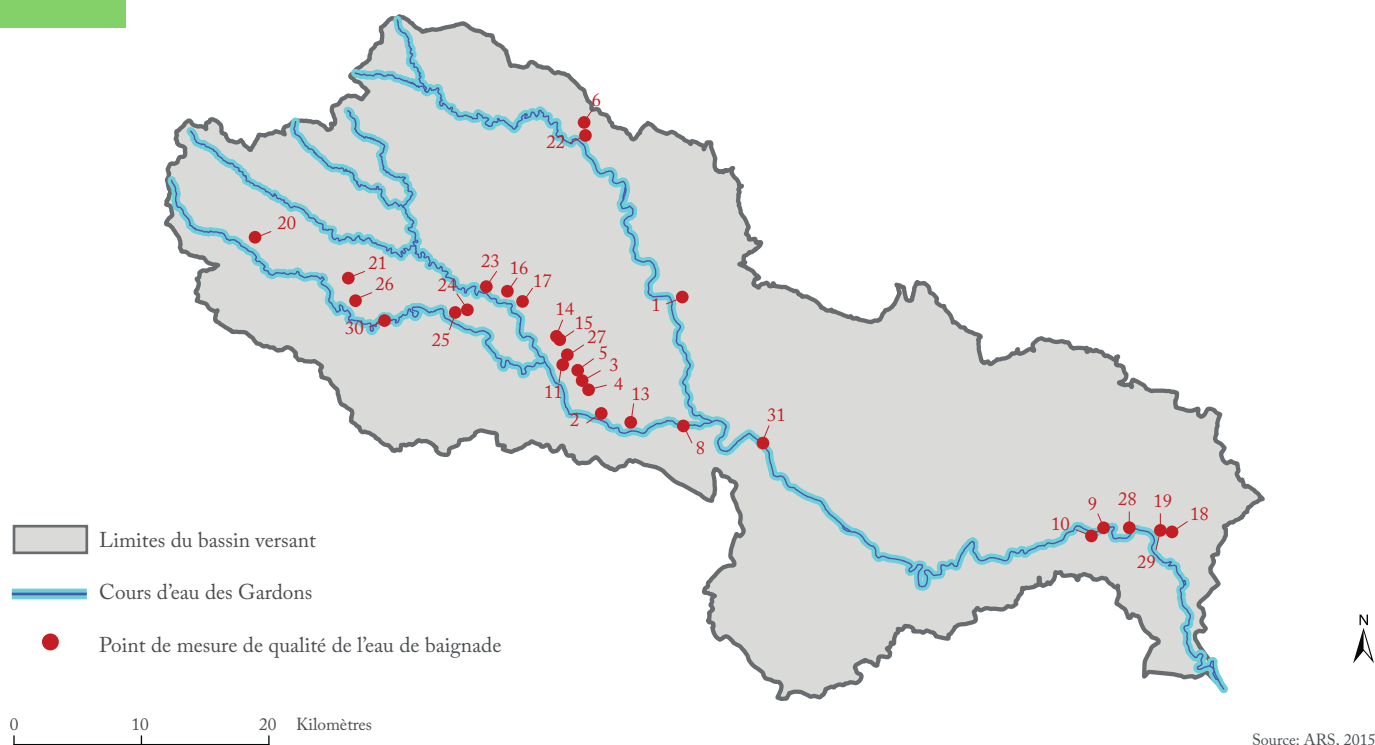


Source: Portail ADES, 2014

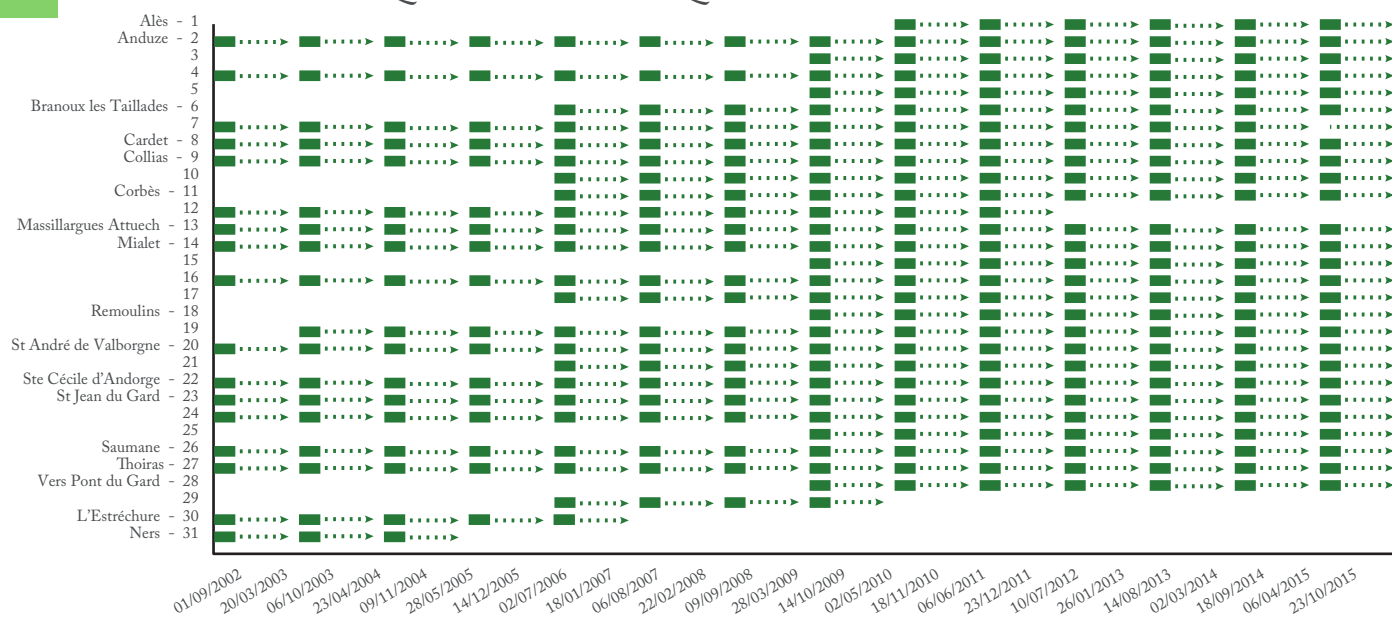
T9 LACUNES DES SÉRIES DE MESURES DE QUALITÉ DE L'EAU SOUTERRAINE SUR LE BASSIN DES GARDONS

	Période	Nb données ¹	Lacunes ²	Période	Nb données ¹	Lacunes ²
Blauzac - 1	2005 - 2013	6	33,3	2005 - 2013	6	33,3
Cardet - 2	2006 - 2012	6	14,3	2006 - 2012	6	14,3
Collias - 3	2006 - 2012	7	-	2006 - 2012	7	-
Les Salles du Gardon - 4	2008 - 2012	5	-	2008 - 2012	5	-
Lézan - 5	2008 - 2012	5	-	2008 - 2012	5	-
Massillargues Attuech - 6	2006 - 2012	5	28,6	2006 - 2012	5	28,6
Montaren et St Médiers - 7	2008 - 2012	5	28,6	2008 - 2012	5	28,6
Monfrin - 8	2005 - 2012	6	14,3	2005 - 2012	6	14,3
Moussac (2) - 9	2006 - 2012	7	-	2006 - 2012	7	-
Moussac (1) - 10	2005 - 2012	8	-	2005 - 2012	8	-
Ners - 11	2006 - 2012	5	28,6	2006 - 2012	5	28,6
Remoulins - 12	2006 - 2012	5	28,6	2006 - 2012	5	28,6
Ste Croix de Caderle - 13	2008 - 2012	5	-	2008 - 2012	5	-
Uzès - 14	2006 - 2012	5	28,6	2006 - 2012	5	28,6

¹ Nombre de données disponibles sur la série totale de mesures (une valeur par an)² Pourcentage de données manquantes sur la série totale de mesures à chaque posteSource: Portail ADES, 2014
Ingrid CANOVAS, 2016



G10 PROFONDEUR HISTORIQUE DES MESURES DE QUALITÉ DE BAINADE SUR LE BASSIN DES GARDONS



T10 LACUNES DES SÉRIES DE MESURES DE QUALITÉ DE L'EAU DE BAINADE SUR LE BASSIN DES GARDONS

Nb données ¹ Lacunes ²			Nb données ¹ Lacunes ²		
Alès - 1	6	-	Remoulins - 18	7	-
Anduze - 2	14	-	19	13	-
3	7	-	St André de Valborgne - 20	14	-
4	14	-	21	10	-
5	7	-	Ste Cécile d'Andorge - 22	14	-
Branoux les Taillades - 6	10	-	St Jean du Gard - 23	14	-
7	14	-	24	14	-
Cardet - 8	14	-	25	7	-
Collias - 9	14	-	Saumane - 26	14	-
10	10	-	Thoiras - 27	14	-
Corbès - 11	10	-	Vers Pont du Gard - 28	7	-
12	10	-	29	4	-
Massillargues Attuech - 13	14	-	L'Estréchure - 30	5	-
Mialet - 14	14	-	Ners - 31	3	-
15	7	-			
16	14	-			
17	10	-			

¹ Nombre de données disponibles sur la série totale de mesures: une valeur par an synthétisant l'état qualitatif estival de l'eau.

² Pourcentage de données manquantes sur la période enregistrée à chaque poste

Depuis juin 2002, les résultats du contrôle sanitaire de la saison balnéaire en cours sont presque accessibles quasiment en temps réel sur le site Internet du ministère des Solidarités, de la Santé et de la Famille¹⁰. La fréquence de prélèvements requise par la directive européenne est bimensuelle durant la saison balnéaire (*i.e.* la période comprise entre le 1er Juillet et le 31 Août pour la baignade en eau douce), un premier prélèvement devant être effectué avant le début de la saison. Dans le département du Gard, entre 5 et 10 prélèvements sont effectués par site de baignade, donnant lieu à un indice unique de qualité pour la saison balnéaire.

Le contrôle, organisé jusqu'en 2009 par les Directions départementales des affaires sanitaires et sociales (DDASS), services déconcentrés du ministère chargé de la santé, est depuis le 1^{er} avril 2010 sous la responsabilité des Agences régionales de santé (ARS).

Par ailleurs, évolution réglementation et des modalités de contrôle : avant 2010, entre 2010 et 2012, depuis 2013. Les paramètres physico-chimiques appréciés visuellement ou olfactivement (*i.e.* huiles minérales, substances tensioactives (mousses) et odeurs de phénols) et mesurés (*e.g.* le pH, la transparence, les résidus goudronneux, les matières flottantes) ne font désormais plus l'objet d'un relevé. Aujourd'hui, l'état qualitatif de l'eau de baignade est défini en utilisant uniquement les valeurs seuils et impératives des paramètres E. Coli et entérocoques intestinaux.

Le classement en qualité, spécifié par la nouvelle directive 76/106CCE, s'établit suivant quatre niveaux :

- E : « excellente » ;
- B : « bonne » ;
- S : « suffisante » ;
- I : « insuffisante ».

Comme pour les indices de qualité des eaux superficielles et souterraines, une seule valeur annuelle est disponible. Mais à la différence qu'elle est issue de mesures effectuées en période estivale. Toutefois, une valeur unique pour la saison balnéaire ne permet pas de mettre en évidence la variabilité de l'état durant la saison estivale, qui doit nécessairement exister. En effet, un contrôle peut être opéré après une petite crue, et passer ainsi sous silence une période antérieure de forte concentration en éléments bactériologiques préjudiciables, par exemple.

Les données de perception Si la disponibilité des données hydrologiques et anthropiques de qualité semble parfois limitée, il est encore moins aisé d'acquérir des informations relatives à la perception des différents usagers de l'eau sur l'état de la ressource. Toutefois, il est possible d'évaluer l'appréciation de la situation par les autorités publiques par les arrêtés préfectoraux, soit à partir des niveaux d'alerte activés (et/ou des mesures de restrictions associées).

Le pas de temps de ce type d'information peut être considéré comme journalier, puisque les périodes d'activation de chaque niveau sont bornées par des dates spécifiées. En revanche, les données ne sont disponibles que depuis 2002 et, au cours de ces 15 dernières années, les niveaux et les

10. URL : <<http://baignades.sante.gouv.fr>>

modalités d'activation ont évolué, ce qui constitue un niveau de difficulté supplémentaire pour l'homogénéisation et le traitement de cette information. Il faudra donc réfléchir à la méthode à employer pour la traduire en information quantitative, et de sorte à pouvoir opérer un traitement statistique comparable aux autres variables. Cela reviendrait, par exemple, à comptabiliser le nombre de jours d'activation de chaque niveau d'alerte (dans une approche annuelle ou mensuelle), ou encore à afficher le niveau d'alerte activé au jour de l'analyse (dans une approche journalière) (voir *infra* 9.2).

5.1.3 Le besoin nécessaire d'une base de données coopérative

Le travail d'investigation et d'inventaire des informations existantes, et susceptibles de renseigner les variables essentielles retenues dans cette étude, a permis de rendre compte de la diversité et la richesse des bases de données en accès libre. À l'inverse, ce recensement a également fait ressortir les lacunes, les manques (*e.g.* d'informations, de représentativité) et l'imperfection (*i.e.* qualité médiocre ou douteuse) de certaines données.

Il faut cependant préciser que l'investigation s'est uniquement concentrée sur les grandes structures nationales, ou très largement connues, et spécialisées de surcroît dans des domaines propres à ceux dans lequel s'inscrit ce travail (*e.g.* hydrologie, climatologie). À l'évidence, il existe de nombreuses autres structures créatrices de données, plus locales, et dont les compétences et les spécialités sont étrangères à celles sur lesquelles repose cette étude. L'indisponibilité ou la non-visibilité de certaines informations (*e.g.* données non publiées ou mises en ligne) ne signifie pas systématiquement que ces dernières n'existent pas. Il est donc raisonnable de présupposer la présence d'une quantité considérable d'informations, distribuées dans d'innombrables bases de données, et qui ne sont pas suffisamment valorisées.

C'est en particulier le cas de données collectées à des fins de recherche, qui commencent à être systématiquement stockées au sein de bases de données d'organismes de recherche, comme le CNRS, l'IRSTEA, etc.

De ce constat, et à juste titre, il ressort l'intérêt, de plus en plus urgent, de créer une base de données collaborative, coopérative, et pourquoi pas participative. Les bénéfices engendrés par une telle démarche ne sont pas négligeables : mobilisation de moyens financiers pour instrumentaliser des sites non suivis au lieu de recréer une information déjà existante, gain de temps, accès à des informations anciennes (historiques), etc.

5.1.4 Structure de la base de données « basses eaux »

Les informations recueillies, il faut ensuite les bancariser au sein d'une base de données, qui sera alors spécifique à l'étude des basses eaux. La structure de la base doit permettre de répondre à un des objectifs sous-jacents à ce travail, qui consiste à définir un réseau d'observation adapté à chacune des échelles spatiales considérées. Cela revient, en d'autres termes, à :

- Annexer aux variables les données (issues des paramètres mesurés, et retenus) censées les décrire ;

- Rattacher les variables aux indices qu'elles renseignent ;
- Attribuer l'échelle spatiale de représentativité du poste de mesure, donc, par extension, de la variable essentielle et, à terme, de l'indicateur qui en résulte.

Cette dernière condition suppose d'avoir identifié au préalable les postes, les stations, etc. dont les mesures sont susceptibles de révéler un fonctionnement, une structure, une dynamique qui soient homogènes dans un espace défini.

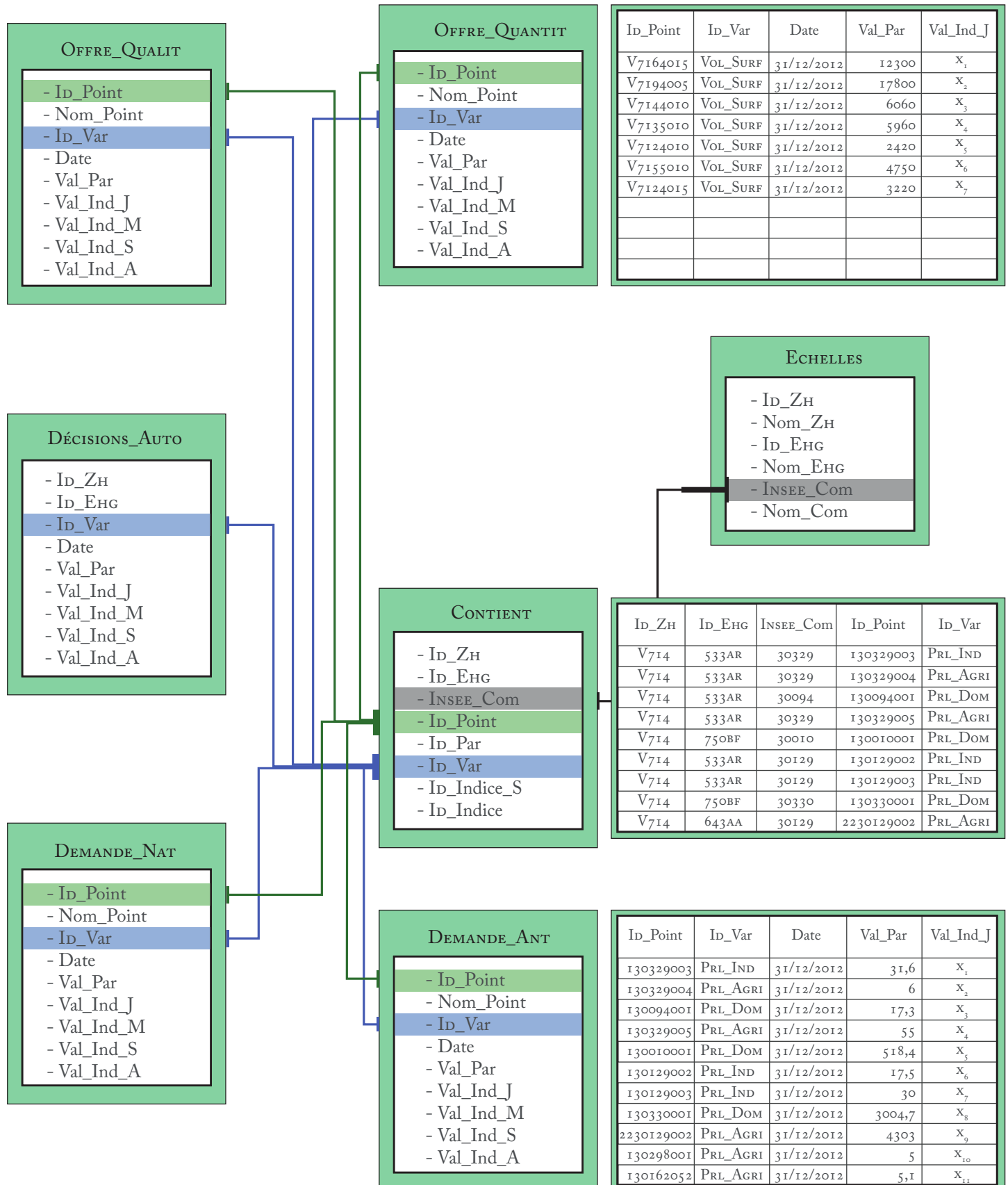
Enfin, la structure doit être établie de sorte à autoriser et faciliter l'implémentation de la base. En d'autres termes, sa mise à jour, par l'ajout de données supplémentaires (de toute source, de tous pas de temps, de toute nature, etc.) doit non seulement être possible, mais également aisée. L'organisation de la base doit donc être simple et ne pas nécessiter l'utilisation de logiciels trop complexes et coûteux, dans un premier temps. Enfin, elle doit pouvoir être étendue, non seulement quantitativement (*e.g.* ajout de nouvelles données, extension de chroniques existantes, changement de résolutions), mais aussi spatialement, jusqu'à englober l'aire méditerranéenne française. Cela suppose, de surcroît, de pouvoir intégrer sans trop de difficultés d'autres niveaux d'observation (*i.e.* découpages territoriaux intermédiaires et plus petits).

Dans ce travail, la base de données a ainsi été élaborée suivant ces critères. Concrètement, elle consiste en plusieurs tables (*i.e.* feuilles Excel) indépendantes, reliées entre elles par des identifiants simples (*e.g.* code INSEE de la commune, identifiant du point de mesure) (ENCADRÉ E11). L'obtention des informations contenues dans le(s) table(s) se fait ensuite via un processus classique de requêtes.

Dans le détail, la première table « ÉCHELLES » rattache les différents découpages spatiaux et précise leur identifiant et leur nom. Par exemple, les communes identifiées sous les codes INSEE 30329 et 30094 sont situées dans l'entité hydrogéologique (EHG) 553 AR, elle-même située dans la zone hydrographique (ZH) 714.

La table « CONTIENT » relie chaque point de mesure (*e.g.* poste pluviométrique, station limnimétrique) à chacune des échelles. Elle spécifie par ailleurs pour chacun d'eux le paramètre utilisé pour caractériser la variable correspondante, l'indice synthétique auquel contribue cette dernière, et l'indice auquel se rapporte l'indice synthétique. Par exemple, le point de mesure 130330001, relatif au paramètre « volume prélevé pour l'AEP », renseigne la variable « prélèvement domestique. Ce poste est situé sur la commune 30330, au sein de l'Ehg 750BF, dans la ZH 714. Il sert par ailleurs à définir l'indice synthétique « DEMANDE ANTHROPIQUE » pour, à terme, le calcul de l'indice de « DEMANDE ».

Les tables spécifiques aux indices synthétiques annexent les points de mesure aux variables essentielles, et pour chacune d'elles, la date, la valeur brute du paramètre correspondant et, le cas échéant, la valeur de l'indicateur (*e.g.* journalier, mensuel, saisonnier, annuel). Par exemple, la table propre à l'indice synthétique « DEMANDE ANTHROPIQUE » contient la variable « prélèvement domestique », estimée à partir du poste 1303300001. Ce dernier mesure le paramètre « volume prélevé pour l'AEP », dont la valeur brute, au 31/12/2012 est égale à 3004,7 milliers de mètres cubes. La valeur de l'indicateur qui en résulte est $\times 8$.



- Id_ZH: Code de la zone hydrographique
- Nom_ZH: Nom de la zone hydrographique
- Id_EHG: Code de l'entité hydrogéologique
- Nom_EHG: Nom de l'entité hydrogéologique
- INSEE_Com: Code INSEE de la commune
- Nom_Com: Nom de la commune
- Id_Point: Code du point de mesure (Code Station)
- Nom_Point: Nom du point de mesure (Nom Station)
- Date: Date de la mesure

- Id_Par: Nom du paramètre mesuré
- Id_Var: Nom de la variable renseignée par le paramètre
- Id_Indice_S: Nom de l'indice synthétique renseigné par la variable
- Id_Indice: Nom de l'indice renseigné par l'indice synthétique
- Val_Par: Valeur du paramètre mesuré
- Val_Ind_J: Valeur de l'indicateur journalier renseignant la variable, issu du paramètre
- Val_Ind_M: Valeur de l'indicateur mensuel renseignant la variable, issu du paramètre
- Val_Ind_S: Valeur de l'indicateur saisonnier renseignant la variable, issu du paramètre
- Val_Ind_A: Valeur de l'indicateur annuel renseignant la variable, issu du paramètre

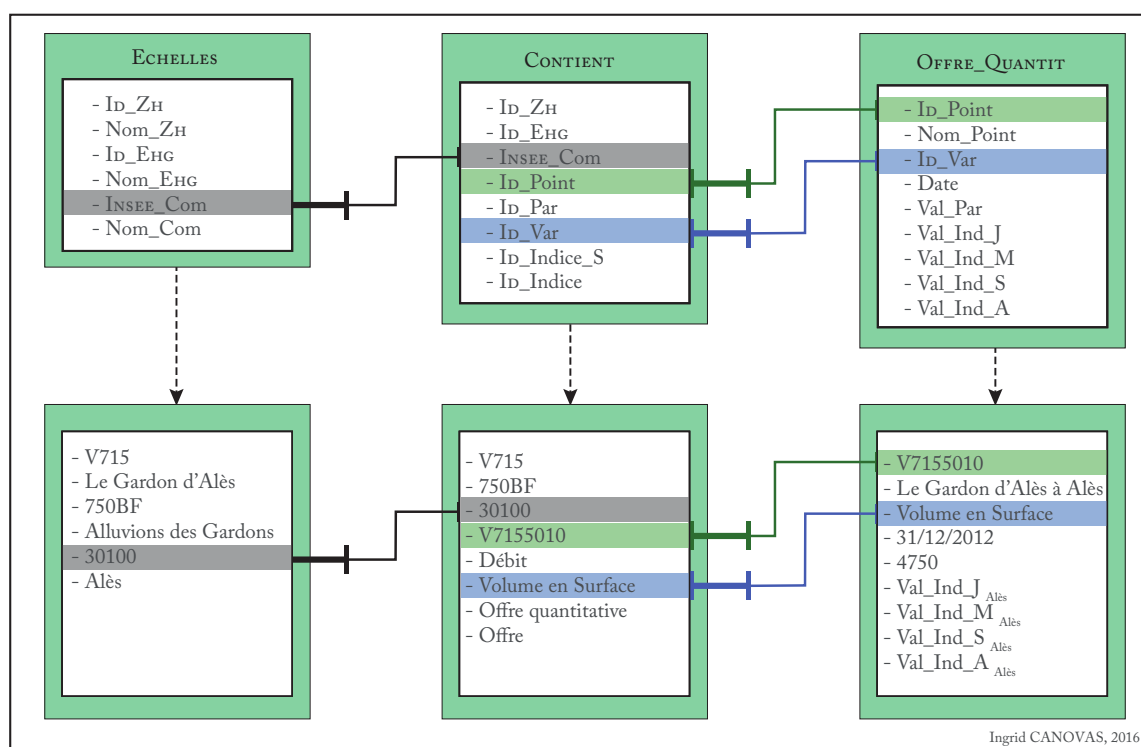


FIGURE 5.7 : EXEMPLE D'UNE REQUÊTE DANS LA BASE DE DONNÉES « BASSES EAUX »

À partir de l'ensemble de ces tables, il est possible de réaliser des requêtes, que ce soit pour définir un indice de criticité sur le territoire souhaité, ou simplement connaître l'état d'une variable précise. Ce dernier propos peut être illustré par un exemple simple, dans lequel l'objectif est de connaître l'état de la variable « volume disponible en surface » sur la commune d'Alès, au 31/12/2012 (FIGURE 5.7).

- 1. Dans la table « ÉCHELLES » : sélection du nom de la commune. Son code INSEE apparaît.
- 2. Dans la table « CONTIENT » : sélection de la variable « volume disponible en surface » par son identifiant. Le code (V7155010) du point de mesure correspondant apparaît, ainsi que le paramètre mesuré et l'indice synthétique auquel il se rapporte. Dans ce cas, il s'agit respectivement du « débit » et de l'« OFFRE QUANTITATIVE ».
- 3. Dans la table « OFFRE QUANTITATIVE » : sélection de la date (31/12/2012). La valeur brute du paramètre (4750 l.s^{-1}) et la valeur de l'indicateur calculé apparaissent enfin et peuvent alors être extraites.

En plus de répondre aux exigences de simplicité et d'accessibilité, et de rattachement de l'ensemble des informations entre elles et entre niveaux d'observation, cette structure permet un accès à l'information finale (*i.e.* l'indicateur renseignant une variable essentielle), à une échelle donnée, extrêmement rapide, puisqu'il s'effectue en seulement trois temps.

Enfin, chaque point de mesure peut être localisé de manière précise, ses coordonnées géographiques étant également renseignées dans la base de données.

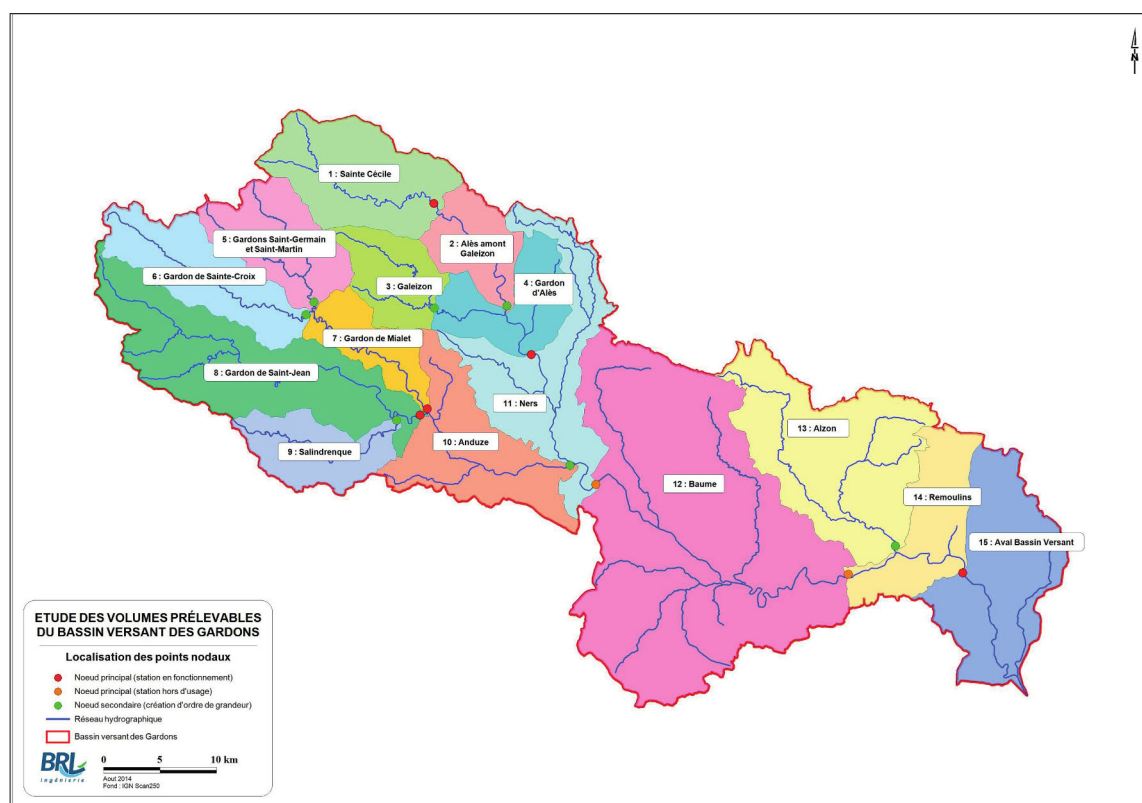


FIGURE 5.8 : SOUS-BASSINS DÉLIMITÉS PAR LES POINTS NODAUX RETENUS POUR LE CALCUL DES VOLUMES PRÉLEVABLES (SOURCE : SMAGE, 2016))

5.2 L'élaboration du modèle territorial du bassin versant des Gardons

L'analyse des découpages existants a révélé l'existence d'un grand nombre d'informations, toutes échelles confondues. La nature des informations ou des paramètres mesurés au sein de chaque division territoriale peut ainsi orienter en partie le choix à faire sur le découpage optimal selon les besoins et objectif de l'étude.

À ce titre, le découpage en sous-bassins au droit des postes de débits, utilisé pour l'étude des volumes prélevables (EVP) sur le bassin des Gardons (SMAGE, 2015), a été retenu et adapté dans le présent travail. D'une part parce qu'il est établi à partir des zones hydrographiques de la BD CARTHAGE, de sorte à diviser le bassin versant en sous-bassins élémentaires, présentant un fonctionnement homogène (FIGURE 5.8). D'autre part parce qu'il constitue un niveau d'observation intermédiaire entre le bassin versant et la commune, ce qui devrait potentiellement limiter les biais lors du changement de résolution de l'information, le cas échéant.

Il faut ensuite identifier parmi les variables retenues comme essentielles, celles qui agissent au sein de l'unité territoriale retenue. À l'issue de ce travail d'investigation et de recensement, un modèle territorial spécifique pourra être conçu. La démarche est illustrée à deux niveaux : à l'échelle des sous-bassins des Gardons dans un premier temps, puis à celle du bassin versant.

5.2.1 Les modèles spécifiques aux sous-bassins des Gardons

À l'échelle des sous-bassins, jusqu'à neuf variables peuvent être décrites (ENCADRÉS E12.1 à E12.3), relatives à (1) la qualité de l'eau de surface ; (2) la qualité de l'eau souterraine ; (3) la qualité de l'eau de baignade ; (4) le volume disponible en surface ; (5) le volume souterrain disponible ; (6) les précipitations ; (7) les pertes évaporatoires ; (8) les prélèvements anthropiques et naturels (*i.e.* ensemble des usages anthropiques et des besoins environnementaux) ; (9) le volume anthropique disponible (*i.e.* le volume contenu dans les barrages).

Il est à noter que certains des modèles finaux pourront compter davantage de variables, après l'intégration ultérieure de la dimension réflexive (voir *infra* 10.2).

5.2.1.1 Les sous-bassins en tête des Gardons amont

Les bassins de Mialet, de Saint Germain - Saint Martin et de Sainte Croix sont caractérisés par une occupation du sol essentiellement forestière. Les terres agricoles et les zones urbanisées sont quant à elles peu étendues. Les prélèvements à finalité domestique et agricole sont donc peu importants, mais demeurent les principaux. Ils sont par ailleurs majoritairement effectués sur la ressource superficielle ou sur les béals cévenols (*i.e.* canaux d'irrigation).

Le soutirage de l'eau de surface se justifie par le contexte hydrogéologique des bassins, caractérisés essentiellement par des formations de socle. Ces formations métamorphiques (faiblement altérées en surface) offrent en effet très peu de réserve en eau souterraine, du fait de leur faible épaisseur d'altérites. Sur ces territoires, les informations relatives à la qualité et au niveau de l'eau souterraine ne sont donc pas indispensables, contrairement à celles se rapportant à la qualité et au niveau de l'eau superficielle.

Cette même configuration se retrouve sur la partie amont du bassin de Saint Jean. En revanche, sur sa partie aval, les terres agricoles et les prélèvements souterrains y sont plus nombreux. Cela s'explique notamment par la présence d'une formation sédimentaire (aquifères sédimentaires et karstiques), qui constitue généralement une réserve en eau souterraine importante et favorise, de par sa morphologie moins accidentée, l'implantation de cultures.

Sur les bassins de Mialet et de Saint Jean, l'usage ludique de l'eau (*i.e.* sites de baignade) est également très développé. Aussi, la qualité de l'eau de baignade, en plus de la disponibilité quantitative en eau de surface, y est un facteur à prendre en compte dans l'état global de basses eaux.

L'identification des caractéristiques propres à chacun des 4 bassins autorise ensuite l'élaboration d'autant de modèles spécifiques (FIGURES F12.1 et F12.2, ENCADRÉS E12.1 et E12.2). Les plus simples (Saint Germain - Saint Martin et Sainte Croix), qui ne comptent pas de prélèvement souterrain (ou du moins de manière très anecdotique) ni d'usage ludique de l'eau, sont décrits par cinq variables :

E12.1

LES MODÈLES «BASSES EAUX» À L'ÉCHELLE DES SOUS-BASSINS HYDROGRAPHIQUES

GARDONS DE ST GERMAIN ET DE ST MARTIN

GARDON DE STE CROIX

GARDON DE MIALET

Sous-bassin hydrographique



Source: SMAGE, 2016

C12.1.1 L'OCCUPATION DU SOL

Forêt
Landes - Garrigues
Pelouse naturelle
Prairie agricole
Culture
Culture non irriguée
Zone urbanisée
Roche nue



Source: CORINE LAND COVER, 2016

C12.1.2 LE CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

533AR - Sédimentaire
691AE - Socle



Source: BD LISA, 2016

C12.1.3 LES PRATIQUES LUDIQUES DE L'EAU

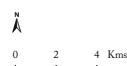
Site baignade



Source: ARS, 2016

C12.1.4 LES USAGES ÉCONOMIQUE ET DOMESTIQUE DE L'EAU

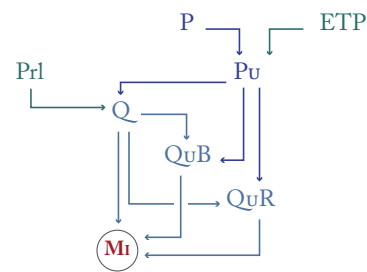
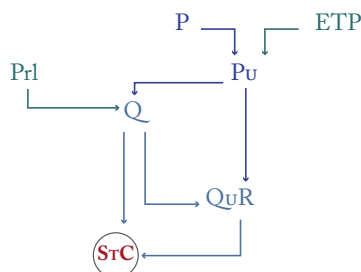
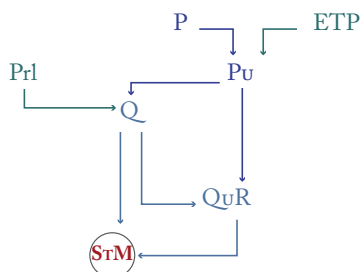
AEP surface
AEP souterrain
Agricole surface
Agricole souterrain



Source: SMAGE, 2016

F12.1 LES MODÈLES «BASSES EAUX» SPÉCIFIQUES AUX SOUS-BASSINS

Prl Prélèvements naturels et anthropiques
Q Volume eau surface
QuR Qualité eau surface
QuB Qualité eau baignade
P Précipitations
ETP Pertes évaporatoires
Pu Pluie - ETP
StM Etat Basse Eau



Ingrid CANOVAS, 2016

GARDON DE ST JEAN

GARDON D'ANDUZE

GARDON D'ALÈS

Sous-bassin hydrographique

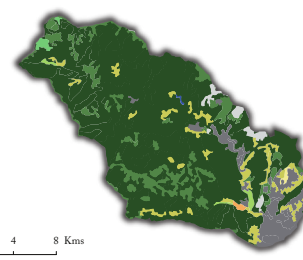
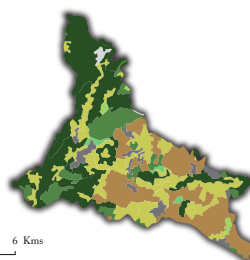
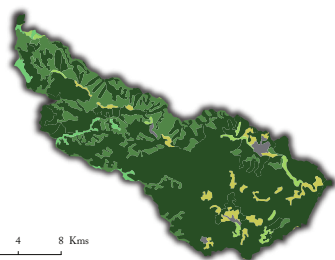


Source: SMAGE, 2016



C12.2.1 L'OCCUPATION DU SOL

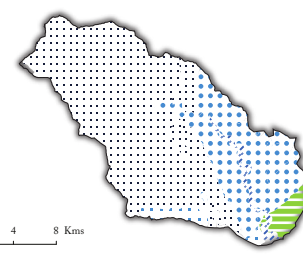
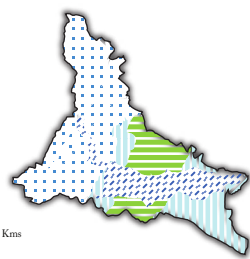
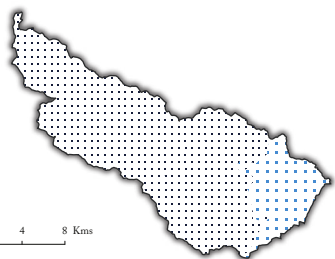
Forêt
Landes - Garrigues
Pelouse naturelle
Prairie agricole
Vignoble
Culture
Verger - Oliveraie
Culture non irriguée
Zone urbanisée
Roche nue
Barrage



Source: CORINE LAND COVER, 2016

C12.2.2 LE CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

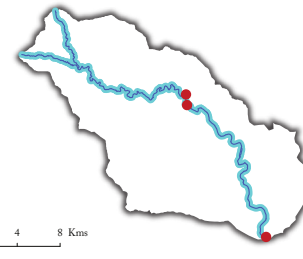
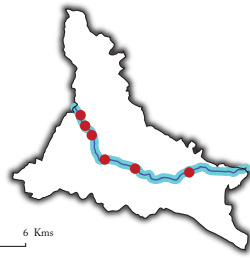
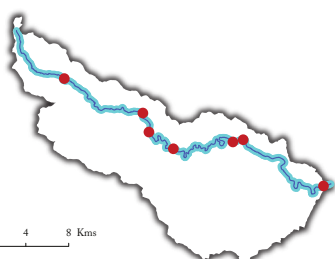
691AE - Socle
548AC - Plissé
750BF - Alluvial
533AR - Sédimentaire
643AJ - Sédimentaire
643AA - Sédimentaire
533AP - Sédimentaire



Source: BD LISA, 2016

C12.2.3 LES PRATIQUES LUDIQUES DE L'EAU

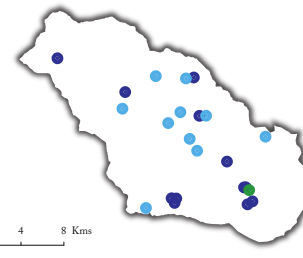
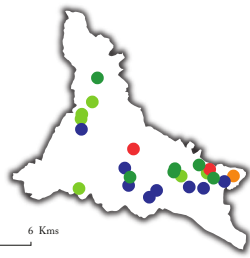
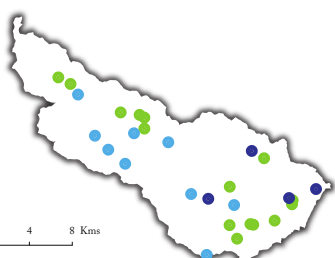
Site baignade



Source: ARS, 2016

C12.2.4 LES USAGES ÉCONOMIQUE ET DOMESTIQUE DE L'EAU

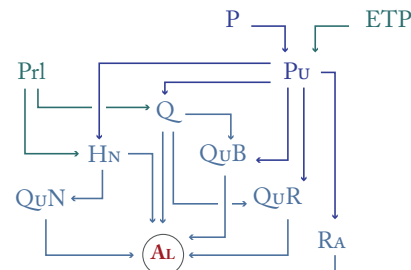
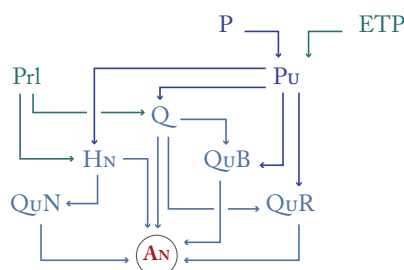
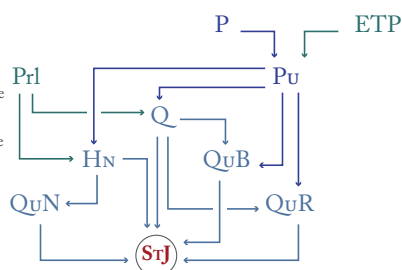
AEP surface
AEP souterrain
Agricole surface
Agricole souterrain
Industriel surface
Industriel souterrain



Source: SMAGE, 2016

F12.2 LES MODÈLES «BASSES EAUX» SPÉCIFIQUES AUX SOUS-BASSINS

PrI Prélèvements naturels et anthropiques
Q Volume eau surface
HN Volume eau souterraine
QuR Qualité eau surface
QuN Qualité eau souterraine
QuB Qualité eau baignade
RA Réserve anthropique
P Précipitations
ETP Pertes évaporatoires
Pu Pluie - ETP
StJ Etat Basses Eaux



Ingrid CANOVAS, 2016

E12.3

LES MODÈLES «BASSES EAUX» À L'ÉCHELLE DES SOUS-BASSINS HYDROGRAPHIQUES

GARDON DE NERS

GARDON DE LA BAUME

GARDON AVAL

Sous-bassin hydrographique

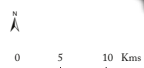


Source: SMAGE, 2016

C12.3.1 L'OCCUPATION DU SOL

- Forêt
- Landes - Garrigues
- Pelouse naturelle
- Prairie agricole
- Vignoble
- Culture
- Verger - Oliveraie
- Culture non irriguée
- Plage - Sable
- Zone urbanisée
- Roche nue
- Plan d'eau

Source: CORINE LAND COVER, 2016



C12.3.2 LE CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

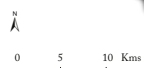
- 533AP
- 534AH
- 643AL
- 533AR
- 691AE
- 643AC
- 643AJ
- 643AA
- 643AK
- 534AG
- 534AJ
- 691AF
- 643AM
- 534AM
- 534AK
- 529AA
- 647AA
- 548AC
- 750BF

Source: BD LISA, 2016



C12.3.3 LES PRATIQUES LUDIQUES DE L'EAU

Site baignade

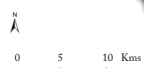


Source: ARS, 2016

C12.3.4 LES USAGES ÉCONOMIQUE ET DOMESTIQUE DE L'EAU

- AEP surface
- AEP souterrain
- Agricole surface
- Agricole souterrain
- Industriel surface
- Industriel souterrain

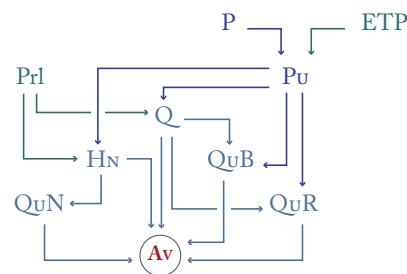
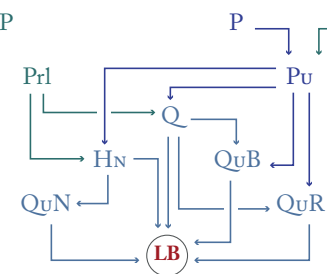
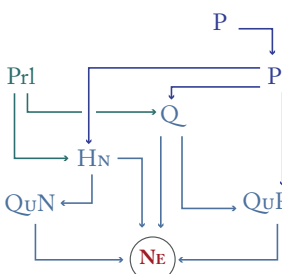
Source: SMAGE, 2016



F12.3

LES MODÈLES «BASSES EAUX» SPÉCIFIQUES AUX SOUS-BASSINS

- PrI Prélèvements naturels et anthropiques
- Q Volume eau surface
- HN Volume eau souterraine
- QuR Qualité eau surface
- QuN Qualité eau souterraine
- QuB Qualité eau baignade
- RA Réserve anthropique
- P Précipitations
- ETP Pertes évaporatoires
- Pu Pluie - ETP
- NE Etat Basse Eaux



Ingrid CANOVAS, 2016

- Les précipitations et les pertes évaporatoires¹¹ (la pluie utile est utilisée pour en exprimer la combinaison et simplifier le schéma) ;
- Le volume et la qualité de l'eau superficielle ;
- Les prélèvements (domestiques, agricoles et environnementaux).

Le modèle du bassin de Mialet compte quant à lui six variables, puisqu'il intègre la qualité de l'eau de baignade, pour renseigner l'usage ludique de l'eau. Enfin, le bassin de Saint Jean, plus complexe, est représenté par un modèle à huit variables, puisqu'il inclut également le niveau et la qualité de l'eau souterraine

5.2.1.2 Les bassins amont - centre

Comme les bassins trois bassins amont, le bassin d'Alès est dominé par la couverture forestière. En revanche, les bassins situés au centre des Gardons (*i.e.* Anduze et Ners) le sont dans une proportion bien moindre, voire mineure.

Ces bassins sont beaucoup plus urbanisés, notamment Alès et Ners, et l'agriculture y est beaucoup plus présente. Les prélèvements pour les usages domestiques et agricoles sont donc plus importants et majoritaires, même si l'usage économique est également présent (*e.g.* alimentation de la Bambouseraie d'Anduze). Contrairement aux bassins amont, les prises d'eau sont effectuées en majorité sur la ressource souterraine.

En effet, du point de vue hydrogéologique, les formations sédimentaire et alluviale le long du Gardon sont dominantes. En contribuant à une réserve importante en eau, ces formations autorisent les prélèvements souterrains, plus particulièrement dans la plaine alluviale. Cela explique aussi le développement de l'agriculture dans ces zones. Contrairement aux bassins amont, les informations de qualité et quantité de l'eau souterraine sont, sur ces bassins, indispensables pour définir un état de basses eaux.

Enfin, si sur le bassin d'Anduze, l'usage ludique de l'eau est très développé, il est présent, dans une moindre mesure, sur la partie amont du bassin d'Alès, mais s'avère absent sur celui de Ners. Aussi, sur les deux premiers, la qualité de l'eau de baignade, en plus de la disponibilité quantitative en eau de surface, y est un facteur de satisfaction à prendre en compte dans l'état global de basses eaux.

Par ailleurs, la présence d'un barrage en amont d'Alès, offre à ce bassin une réserve en eau supplémentaire (soutien d'étiage de 200 l.s⁻¹ environ). Il resterait à déterminer si son influence est significative ou négligeable sur les bassins situés à l'aval, tel Ners.

Les modèles qui découlent de l'analyse territoriale des trois bassins sont décrits par sept à neuf variables (F12.2, ENCADRÉ E12.2) :

- Les précipitations et les pertes évaporatoires ;

11. Ces variables climatiques, qui interviennent à tous les niveaux, sont automatiquement incluses dans l'ensemble des modèles finaux, contrairement aux autres variables qui nécessitent le recours à une analyse territoriale pour les identifier.

- Le volume et la qualité de l'eau superficielle ;
- Le volume et la qualité de l'eau souterraine ;
- Les prélèvements (domestiques, agricoles, industriels et environnementaux) ;
- Le cas échéant : la qualité de l'eau de baignade et/ou la réserve anthropique.

5.2.1.3 Les sous-bassins centre - aval

Plus on se dirige vers l'aval du bassin des Gardons, plus la proportion d'espaces boisés diminue, comme cela peut s'observer sur les bassins Aval et de La Baume. À l'inverse, les surfaces en garrigues et la part occupée par l'agriculture augmentent sensiblement. Cette dernière domine plus particulièrement dans le bassin de La Baume.

L'urbanisation s'étend, quant à elle, dans une proportion moins importante que dans les bassins alésien et de Ners. Les usages domestique et agricole sont donc à l'origine des principaux prélèvements. En effet, malgré la présence de l'usage économique, ce dernier reste très minoritaire. La configuration de ces bassins est inverse à celle identifiée sur les bassins amont, puisque l'eau est quasi exclusivement soutirée des réserves souterraines.

Comme pour les bassins centre-amont, cela se justifie par la présence de formations sédimentaire et alluviale le long du Gardon, mais aussi de karst. Cela explique également le développement de l'agriculture dans ces zones. Sur ces bassins, les informations de qualité et quantité de l'eau souterraine sont donc tout aussi indispensables pour définir un état de basses eaux.

Enfin, sur le bassin Aval, l'usage ludique de l'eau est également très représenté, notamment dans les gorges du Gardon. Aussi, la qualité de l'eau de baignade doit nécessairement être intégrée dans le modèle d'évaluation de l'état global de basses eaux. Dans ce secteur, le Gardon est par ailleurs fréquemment en état d'assez, entre Russan (ou Dions, en période très sèche) et les sources de La Baume (entre Sanilhac et Poulx). Au-delà, le Gardon est généralement pérenne.

Sur ces deux bassins, deux modèles à huit variables et identiques sont obtenus (F12.3, ENCADRÉ 12.3) :

- Les précipitations et les pertes évaporatoires ;
- Le volume et la qualité de l'eau superficielle, car il n'est pas exclu, notamment avec la forte présence de l'agriculture, que des prises d'eau soient aussi effectuées en surface ;
- Le volume et la qualité de l'eau souterraine ;
- Les prélèvements (domestiques, agricoles, industriels et environnementaux) ;
- La qualité de l'eau de baignade.

L'analyse territoriale a permis de construire neuf modèles spécifiques à chaque sous-bassin, selon leurs caractéristiques propres et les profils d'usage présents. À ce stade de l'étude, sans compter la dimension réflexive, et tous prélèvements confondus, le modèle le plus simple se compose de cinq variables (*e.g.* Saint Germain - Saint Martin) tandis que le plus complexe en compte neuf (*i.e.* Alès). Cela étant, ces nombres seront sans doute amenés à évoluer, selon les données disponibles (paramètres mesurés), et l'intégration ultérieure des variables de perception.

5.2.2 Le modèle relatif au bassin des Gardons

Suivant une logique similaire, un modèle territorial plus global peut être pensé à l'échelle du bassin versant des Gardons. Pour ce faire, deux approches sont théoriquement envisageables, à partir des neuf modèles de sous-bassins (ENCADRÉ E13). La première considère l'échelle du bassin versant comme étant la synthèse (*i.e.* la moyenne) des neuf sous-bassins qui la composent, tandis que la seconde considère ce même territoire comme étant un espace dans lequel sont distribués les différents sous-modèles. Dans ce dernier cas, le modèle global consiste en neuf sous-modèles, ou en un modèle spatialisé.

5.2.2.1 Le modèle simplifié du bassin des Gardons

Un modèle global peut être pensé comme étant la synthèse des modèles spécifiques (ou locaux) qui le composent. Suivant cette logique, le modèle propre au bassin versant des Gardons résulte naturellement de la combinaison des neuf sous-modèles tout juste conçus.

Le principe consiste alors à créer une nouvelle structure, à l'aide de l'ensemble des composantes des sous-modèles afférents. Pour simplifier la représentation schématique du modèle ainsi obtenu, les composantes identiques entre les sous-modèles sont préalablement combinées entre elles, afin d'obtenir un état moyen pour chaque composante. Par exemple, la variable « qualité de l'eau souterraine » du modèle global correspond à la combinaison (*e.g.* moyenne simple, moyenne pondérée) des états pris par cette même variable, dans les sous-modèles dans lesquels elle intervient (F13.1, ENCADRÉ E13).

Finalement, le modèle synthétique du bassin versant des Gardons est élaboré à partir de neuf variables synthétiques. Dans ce cas précis, il possède une structure identique à celle du modèle du sous-bassin d'Alès, à ceci près que chacune des variables synthétiques qui le composent est elle-même issue de la combinaison de n variables de même nature.

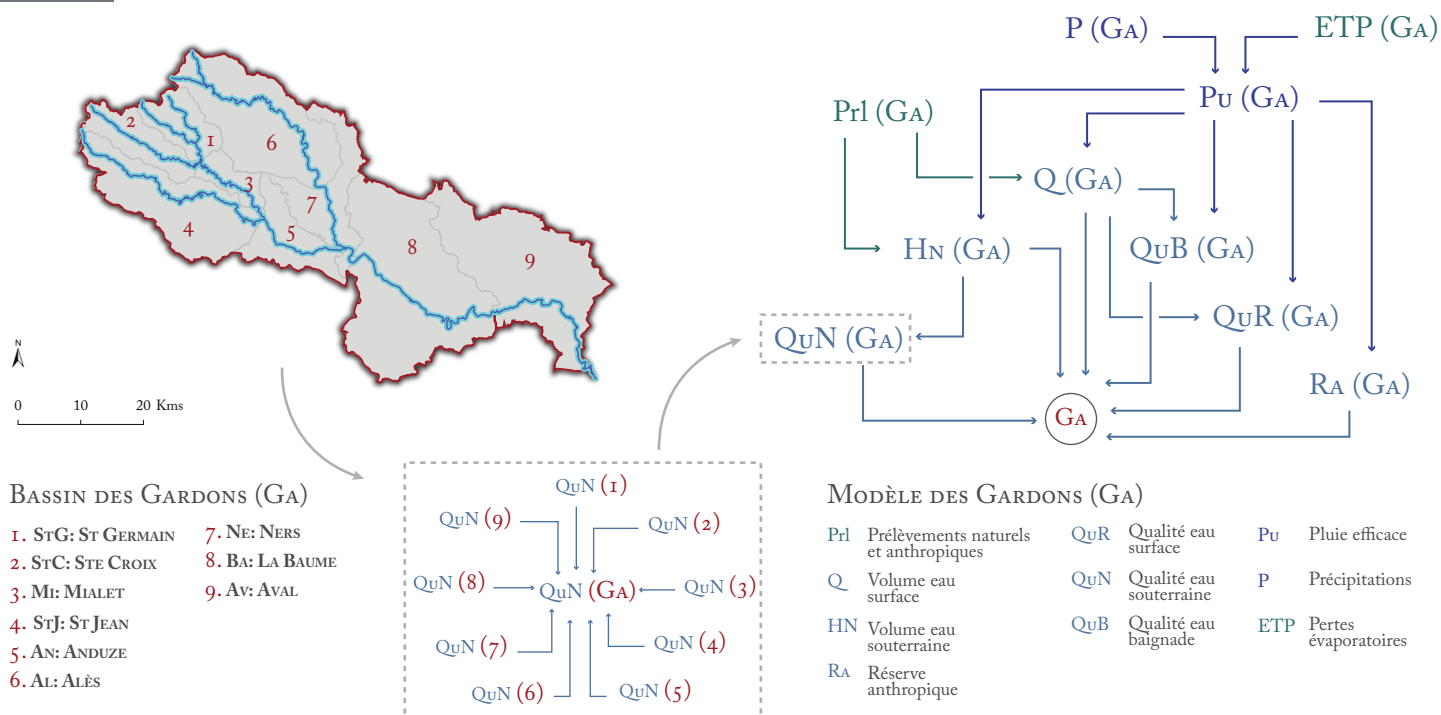
Si cette démarche, quelque peu simpliste, est relativement intuitive, pour autant, elle ne permet pas de clarifier la question des pondérations, dont les modalités restent à définir, à la fois :

- Au sein même du modèle global (*i.e.* du bassin versant) : quel poids pour quelle variable ?
- Pour la combinatoire des variables identiques issues des sous-modèles (*e.g.* Q_{Mi} , Q_{An} , Q_{Al}) pour la définition de la variable synthétique propre au modèle du bassin versant (*e.g.* Q_{Gar}) : Faut-il affecter une pondération particulière, spécifique à chaque sous-bassin ?
- Au sein des sous-modèles : quel poids pour quelle variable ? Faut-il appliquer les mêmes règles que celles définies au sein du modèle global ? Le système de pondération doit-il différer au sein de chaque sous-bassin ? Etc.

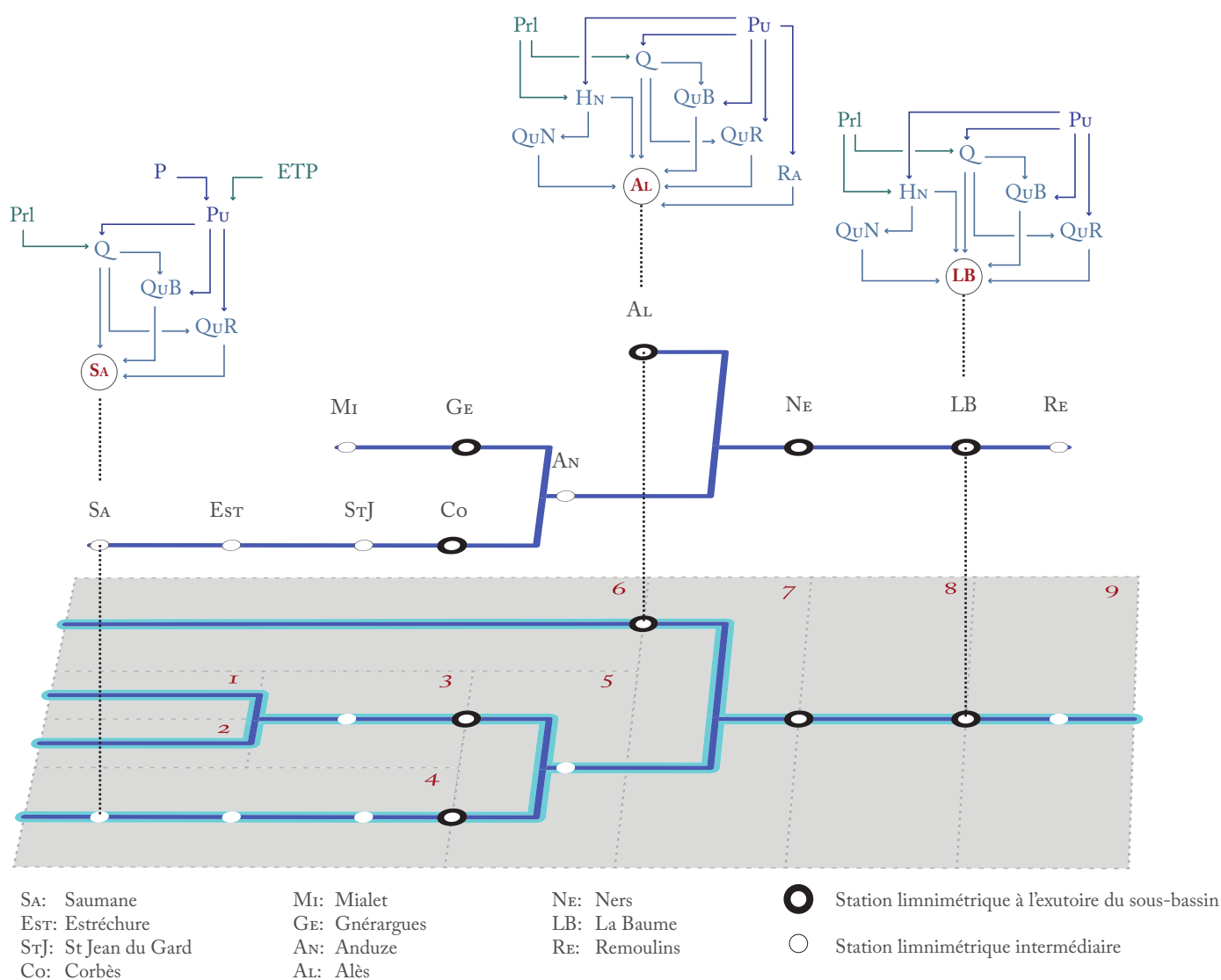
5.2.2.2 Le modèle spatialisé du bassin des Gardons

Selon une tout autre perspective, qui postule que l'état de basses eaux ne peut être apprécié par la simple combinaison (*e.g.* moyenne, moyenne pondérée) des états des différentes variables issues

F13.1 LE MODÈLE SIMPLIFIÉ DU BASSIN DES GARDONS



F13.2 LE MODÈLE SPATIALISÉ DU BASSIN DES GARDONS



des sous-bassins, un modèle global peut être conçu, de sorte à faire valoir la distribution spatiale de ces différents états (F13.2, ENCADRÉ E13).

La démarche qui supporte ce point de vue est relativement simple et présente, de surcroît, l'avantage appréciable d'écarter la question de la pondération entre les différents sous-modèles. Elle propose en effet de positionner chaque sous-système (*i.e.* sous-modèle, sous-bassin) sur le territoire du bassin versant et d'établir pour chacun son état de criticité. Cela revient, en quelque sorte, à effectuer un quadrillage du territoire (*i.e.* du bassin versant), et à appliquer une couleur par case, représentant chacune un sous-bassin.

Les modalités de pondérations entre les éléments de chaque modèle sont toutefois, dans cette démarche également, à définir, et sont par ailleurs susceptibles de varier entre les différents sous-modèles, selon les spécificités locales, dont le(s) type(s) d'usage dominant(s) (*e.g.* domestique, agricole) par exemple.

Si ce type d'approche semble satisfaisant pour une représentation détaillée (*i.e.* analytique), de territoires relativement peu étendus, elle ne l'est sans doute pas pour la description d'un état de criticité à l'échelle de la région méditerranéenne. Pour cela, il faudrait passer, de préférence, par une représentation spatiale des modèles simplifiés des bassins versants, par exemple. En d'autres termes, cela suggérerait de combiner les deux approches évoquées, la première permettant de définir un état synthétique de chaque bassin versant à partir des sous-bassins qui les constituent, et la seconde, d'établir ensuite la distribution spatiale de ces états au sein de l'aire régionale.

Conclusion : Quelle(s) échelle(s) spatio-temporelle(s) optimale(s) ? — Une fois les échelles spatiales d'analyse définies, et le(s) modèle(s) théorique(s) spécifique(s) au(x) (sous-) bassins des Gardons élaboré(s), la question des exigences à avoir en matière de résolution temporelle pour le(s) renseigner se pose. En effet, au-delà de la nature des variables à considérer et de l'information qu'elles véhiculent, il faut réfléchir au découpage temporel au sein duquel porter l'analyse du phénomène, ce qui implique de choisir une résolution (*i.e.* pas de temps) de l'information adaptée. En d'autres termes, l'information à l'échelle mensuelle est-elle suffisante ? Faut-il passer au décadaire ? Dans quel cas ? Pour quel gain ? Etc.

La réflexion doit donc en premier lieu être conduite sur le choix du découpage temporel de l'analyse. Pour étudier le phénomène de basses eaux, il est envisagé ici de recourir à deux grandeurs temporelles significatives, qui s'appuient sur le régime des cours d'eau et des aquifères : le cycle hydrologique et la récession de fin de cycle.

Par ailleurs, la méthode exploratoire développée ici se destine à une mise en œuvre opérationnelle, pour permettre un suivi de l'évolution du phénomène, et prévoir les situations de tension. Il est donc nécessaire de recourir au maximum à des informations à haute résolution (journalière), qui pourront être dégradées ou lissées, au besoin, à des intervalles de temps plus longs (3 jours, 6 jours, 10 jours, etc.).

Sur ces bases, l'étude du phénomène pourra être conduite sur la structure du phénomène dans les deux temporalités — saisonnière (récession de fin de cycle) et annuelle (cycle hydrologique) — desquelles des indicateurs pourront être pensés et conçus : journaliers d'abord, pour une mise en œuvre opérationnelle, et annuels ensuite pour une étude du phénomène dans une historicité plus longue, afin de dégager des tendances vers un maintien ou une aggravation de la situation globale.

Au regard de la qualité et de la quantité des informations disponibles (*e.g.* nature différente, source variable, stations mises en place suivant des objectifs différents, lacunes), ces questions seront traitées suivant une méthode statistique, toute autre approche semblant peu réaliste, sauf à traiter de la question à l'échelle d'un pays et à une résolution annuelle.

Le phénomène ne sera donc pas ici approché de sorte à effectuer une estimation (*i.e.* un bilan) de l'état de tension (valeur exacte de débit ou de volume disponible), mais par le biais des probabilités, soit d'une analyse fréquentielle plus englobante.

Troisième partie

À LA RECHERCHE D'INDICATEURS STATISTIQUES POUR LA DÉTERMINATION D'UN ÉTAT DE CRITICITÉ DES BASSES EAUX

Le découpage territorial retenu pour le développement méthodologique de la présente démarche est issu de l'étude des volumes prélevables. Neuf sous-bassins ont été décrits, à partir desquels neuf modèles théoriques ont été élaborés à l'aide de 5 à 9 variables, chacune d'elles traduisant l'offre ou la demande en eau. Les variables n'étant pas toutes initialement des indicateurs, il s'agit à présent de les renseigner, et donc d'extraire les informations des données disponibles (*e.g.* des paramètres mesurés), issues de la base précédemment créée, afin de produire une nouvelle information capable de synthétiser les dynamiques à évaluer (FIGURE 5.9).

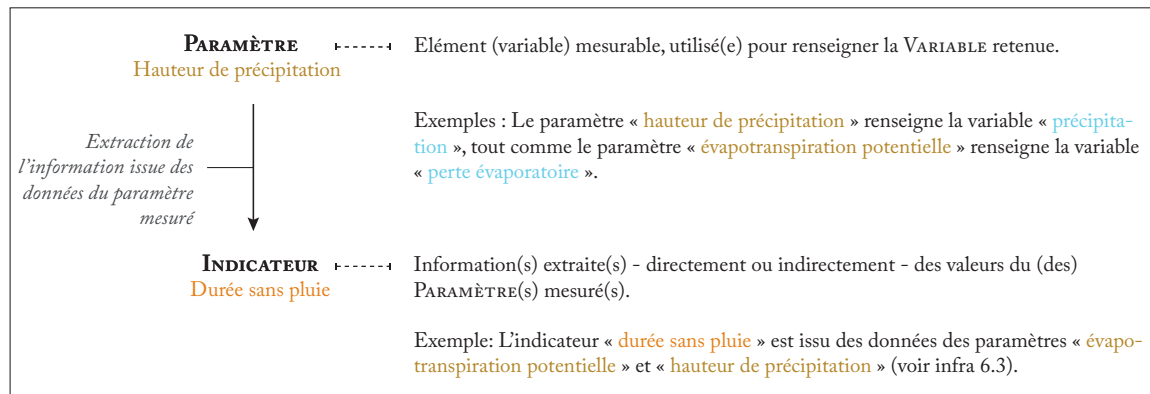


FIGURE 5.9 : DU PARAMÈTRE À L'INDICATEUR : DÉFINITIONS

Pour cela, une approche probabiliste est retenue. L'objectif repose alors sur la caractérisation préalable de la distribution statistique des valeurs de chaque nouvelle chronique (*i.e.* la série de valeurs de chaque indicateur) afin de l'ajuster à une loi statistique connue. La priorité est mise sur la reconstruction d'une distribution gaussienne (*e.g.* détermination de la probabilité des extrêmes par ajustement de la loi de Gauss), qui présente l'avantage d'autoriser la définition de seuils en termes d'écart-types, ou de période de retour (*i.e.* inverse de la fréquence).

Toutefois, si, pour certains indicateurs, l'ajustement d'une droite de Henri à la distribution est possible, pour d'autres, il faudra procéder à une nouvelle transformation de l'information (*e.g.* anamorphose), afin de modifier la distribution, de façon à la rendre gaussienne. Enfin, il est à prévoir que, dans le cas de variables peu renseignées ou trop particulières (*i.e.* présentant une variabilité inter et/ou intra-annuelle suffisamment spécifique), aucun ajustement ne sera possible. Le cas échéant, des solutions seront proposées.

Par ailleurs, il est évident que le but n'est pas de transformer pour transformer, sinon d'obtenir une information simple et utilisable, gaussienne si possible. Par ailleurs, l'information extraite de la chronique de données brutes doit également avoir un sens pour la détermination d'un état de basses eaux. Il y a donc ici une double réflexion à mener en parallèle.

À cela s'ajoute le problème de la résolution de la donnée, soit de la validité des pas de temps et des échelles spatio-temporelles proposés pour mener une telle analyse. Cela conduira sans doute à des traitements différents de l'information selon la résolution choisie.

Pour illustrer cette démarche exploratoire, la méthodologie générale défendue (*i.e.* approche probabiliste et multi-scalaire) est, dans un premier temps, développée au pas de temps journalier et

sur les périodes de récession. Elle est d'abord conduite sur sept des neufs sous-bassins des Gardons, à partir desquels une analyse globale à l'échelle du bassin versant sera ensuite proposée. Enfin, pour compléter la démarche et en vérifier la reproductibilité et la validité, pour définir des indicateurs pertinents dans différents niveaux spatio-temporels d'observation, la méthode est dupliquée sur les cycles hydrologiques, et envisagée, par ailleurs, au pas de temps annuel.

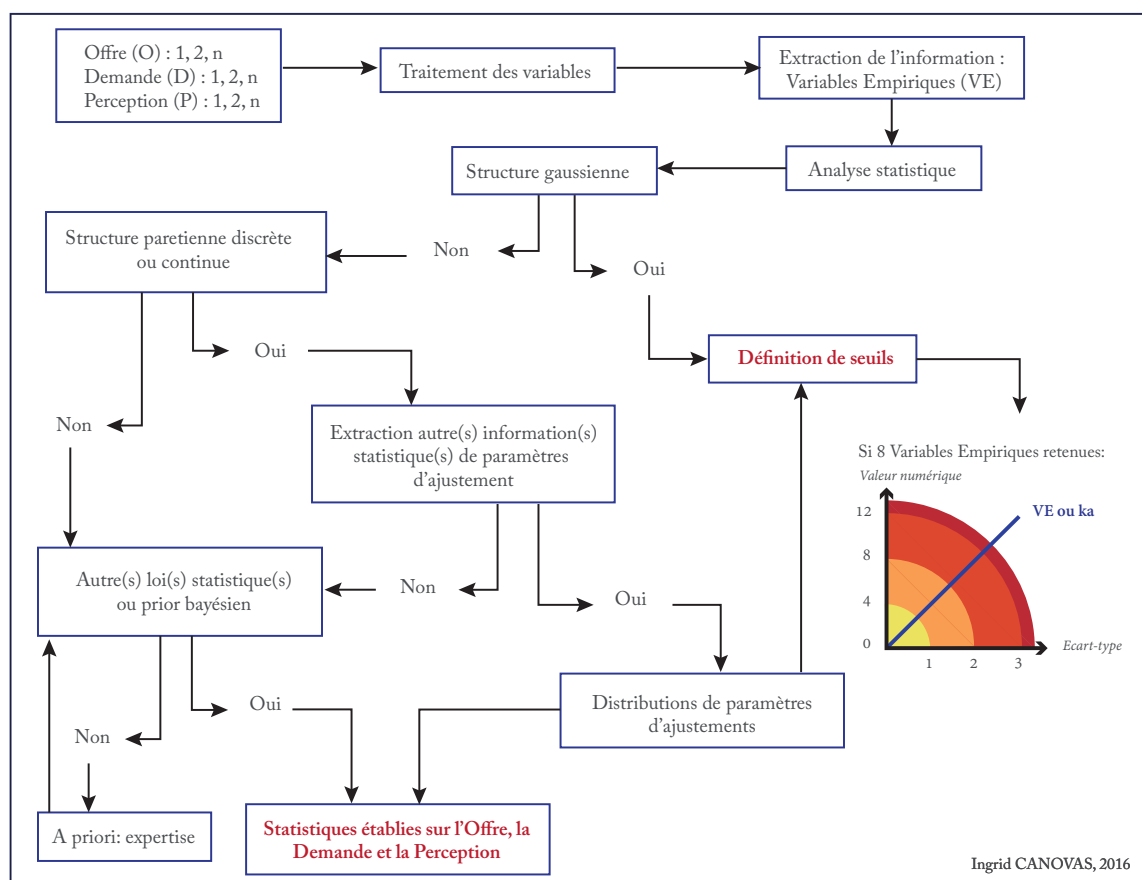
L'analyse des basses eaux est initiée avec la construction de trois indicateurs principaux. Ces derniers sont issus des séries brutes les plus fournies, car elles autorisent une analyse statistique plus robuste :

- Un indicateur de l'état de la ressource superficielle disponible à partir des débits ;
- Un indicateur de la ressource souterraine disponible à partir des chroniques de hauteur piézométrique ;
- Un indicateur regroupant la demande évaporatoire et les apports climatiques, à partir des relevés de température (transformée en évapotranspiration (ETP)) et de précipitations.

Le traitement statistique est effectué indépendamment sur les séries de données de chaque variable, et complété d'une analyse simple et comparative pour en vérifier sa pertinence. Il s'agira, d'une part, de comparer la dynamique véhiculée par l'indicateur obtenu avec la dynamique connue ou explicitée à partir des données brutes (*e.g.* dynamique d'écoulement amont-aval pour les débits, dynamique hydrogéologique pour les nappes, etc.), puis de mettre en lumière sa structuration générale sous-jacente.

Si la démarche, dans ce travail, est centrée sur les indicateurs synthétisant l'offre hydro-climatique, la question des indicateurs anthropique, qualitatif et de perception, et des modalités nécessaires pour leur élaboration, sera également abordée, sans toutefois faire l'objet d'un développement spécifique et détaillé (voir CHAPITRE 10).

VERS DES INDICATEURS POUR LA DÉFINITION DE L'ÉTAT DU VOLUME SUPERFICIEL



6.1	Découpage des phases de récession et identification des dynamiques d'écoulement des débits	184
6.1.1	Définition de la phase de récession	185
6.1.2	Analyse graphique des dynamiques d'écoulement des débits en récession	185
6.2	Le modèle retenu pour la création de l'indicateur d'état du volume superficiel disponible	191
6.2.1	Définition de l'indice volumique journalier et présentation du modèle statistique associé	192
6.2.2	Analyse des séries de l'indice volumique et du modèle de puissance . .	194
6.2.3	Analyse des caractéristiques de récession et des paramètres de loi du modèle de puissance de l'indice : structuration spatiale de l'écoulement superficiel?	202
6.3	Structure statistique de l'indicateur retenu et détermination des seuils de criticité	215
6.3.1	Détermination de la loi statistique pour l'ajustement de la distribution de l'indicateur	215
6.3.2	Discretisation des états de criticité	218
6.4	Le Chrono-kindénogramme ou l'évolution temporelle de l'état de criticité de l'indicateur	220

La démarche exploratoire menée ici cherche à appréhender le phénomène de basses eaux à différents niveaux d'observations et dans différentes temporalités. Les échelles spatiales définies sont celles du sous-bassin et du bassin versant et les temporalités sont doubles : journalière sur la période de récession, journalière sur la totalité du cycle hydrologique et annuelle sur ces deux mêmes périodes. Il faut donc recourir à un indicateur pertinent dans toutes ces temporalités, ou à partir duquel d'autres indicateurs peuvent être déterminés, pour compléter la description du phénomène ou s'ajuster à d'autres temporalités (FIGURE 5.9).

Ainsi, l'élaboration de l'indicateur renseignant l'état de la ressource en eau disponible en surface, et des seuils de criticité associés, s'effectue en quatre étapes majeures (ENCADRÉ E14.1). Afin d'illustrer la démarche, l'étude se concentrera ici sur la période de récession.

Dans un premier temps, chaque chronique de débits journaliers est découpée, de sorte à extraire, pour chaque année, les valeurs de débits enregistrées durant la phase de récession. Une analyse graphique est ensuite menée sur l'ensemble des périodes (identification des profils de récession) et une comparaison des dynamiques d'écoulement est réalisée entre quelques postes de mesure, répartis sur le réseau hydrographique, afin de mettre en exergue des dynamiques interannuelles, soit identiques, soit particulières (*e.g.* dynamique spatiale amont - aval).

À la suite de ces premières observations, l'indicateur et le modèle qui permet d'en caractériser la dynamique, sont présentés. L'indicateur est ensuite calculé à partir des données brutes de débits de récession, et la nouvelle série de valeurs obtenue est ensuite comparée graphiquement à la série initiale. L'objectif, à ce stade, repose sur une évaluation simple et rapide de la cohérence de l'information véhiculée par l'indicateur (mêmes dynamiques temporelles, même structuration spatiale?). Le cas échéant, et afin de procéder à une validation plus robuste de l'indicateur, une analyse des courbes de la nouvelle série est opérée sur l'ensemble des postes et sur toutes les années disponibles.

E14.1

CONSTRUCTION D'UN INDICE DE DÉBIT JOURNALIER - EXEMPLE À LA STATION LIMNIMÉTRIQUE D'ANDUZE - BASE RÉCESSION

SÉLECTION DES DÉBITS

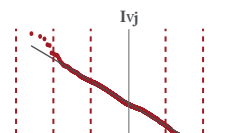
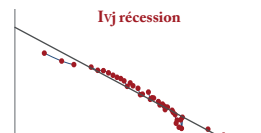
CALCUL DE L'INDICE

REPRÉSENTATION GRAPHIQUE

SEUILS DE CRITICITÉ



Qj	t	Ln t	Ln Qt	Ivj
2100	8	2,07...	9,95...	8,12...



Dans un premier temps, les débits de chaque phase de récession sont extraits de la chronique totale

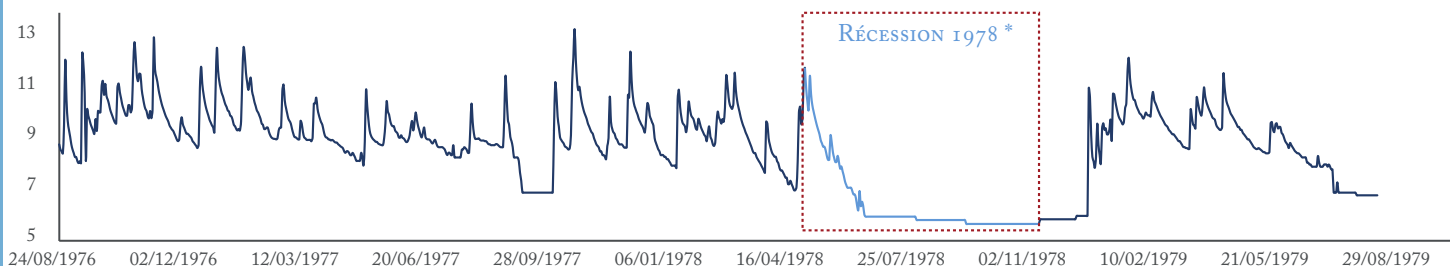
La série de débits de récession est ensuite transformée en nouvelle série, constituée des valeurs de l'indicateur calculé

Les valeurs de la nouvelle série sont ajustées à une loi statistique, après en avoir identifié la nature de la distribution

Enfin, suivant la loi statistique définie, des seuils statistiques de criticité sont obtenus

G14.1 CALCUL DE L'INDICE VOLUMIQUE JOURNALIER À PARTIR DES DÉBITS DE RÉCESSION

Ln (Qj)



* La récession (1978) correspond à la période comprise entre le jour du pic de crue le plus important (t_i), enregistré entre le 1^{er} mars et le 15 juin 1978, et s'achève le jour de l'étiage strict de l'année 1978 (t_n).

Source: Banque Hydro, 2014

$$Ivj^* = \text{Ln} (Q_{t-1} / ((\text{Ln} (Q_t) - \text{Ln} (Q_{t-1})) / (\text{Ln} (t+1) - \text{Ln} (t)))) \times 0.0864$$

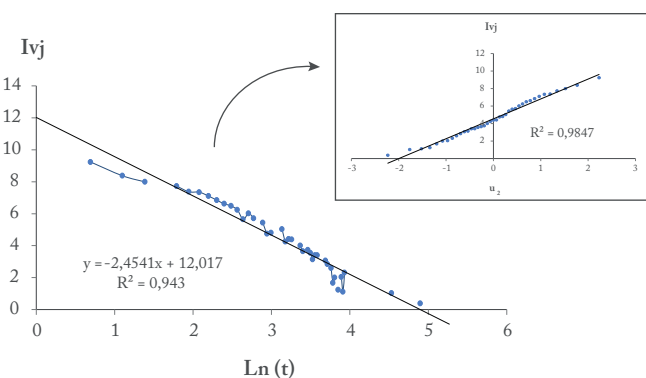
* Indice Volumique journalier = indicateur issu des débits, qui renseigne le «volume disponible en surface».

T14.1 INDICES JOURNALIERS - RÉCESSION 1978

Qj	t (jour)	Ln t	Ln Qt	Ivj
105 000	1	0	11.561716	-*
64 500	2	0.6931472	11.074421	9.4653204
42 500	3	1.0986123	10.657259	8.5972151
34 000	4	1.3862944	10.434116	8.4625324
30 000	5	1.6094379	10.308953	8.5635455
26 200	6	1.7917595	10.173515	8.1574432
...
1000	108	4.6821312	6.9077553	-
1000	109	4.6913479	6.9077553	-
1000	110	4.7004804	6.9077553	-
900	111	4.7095302	6.8023948	2.0043463

* Lorsque Qj est supérieur ou égal à Qj-1, l'Ivj n'est pas renseigné; ces situations correspondant à une montée de crue ou un maintien du débit.

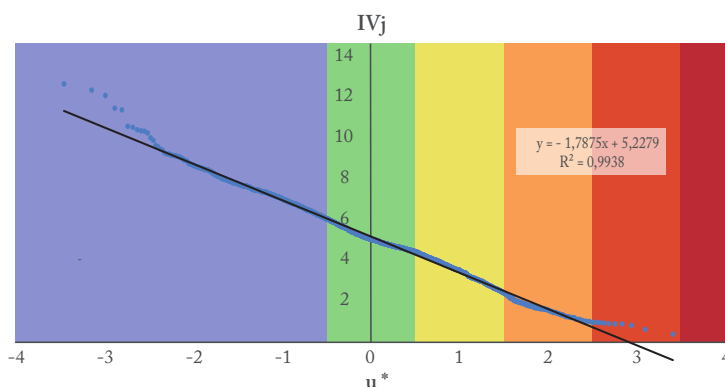
G14.2 DYNAMIQUE* DES Ivj - RÉCESSION 1978



* Evolution temporelle de l'Indice Volumique journalier durant la récession 1978. Les Ivj ont une distribution gaussienne et peuvent être ajustés à la loi normale standard inverse.

G14.3 AJUSTEMENT STATISTIQUE DES Ivj ET DÉTERMINATION DES SEUILS DE CRITICITÉ - 19 RÉCESSIONS

- Etat humide: situation satisfaisante
- Etat moyen: situation normale
- Etat sub-critique: situation à surveiller
- Etat critique: situation problématique
- Etat super-critique: situation de crise
- Etat exceptionnel: situation catastrophique



* Les Ivj, issus des 19 récessions (sans lacunes) enregistrées à Anduze, ont une distribution gaussienne et sont ajustés à la loi normale standard inverse. u est la variable centrée réduite, utilisée comme seuil de criticité de l'indicateur de l'état journalier du «volume disponible en surface» (ici l'Ivj).

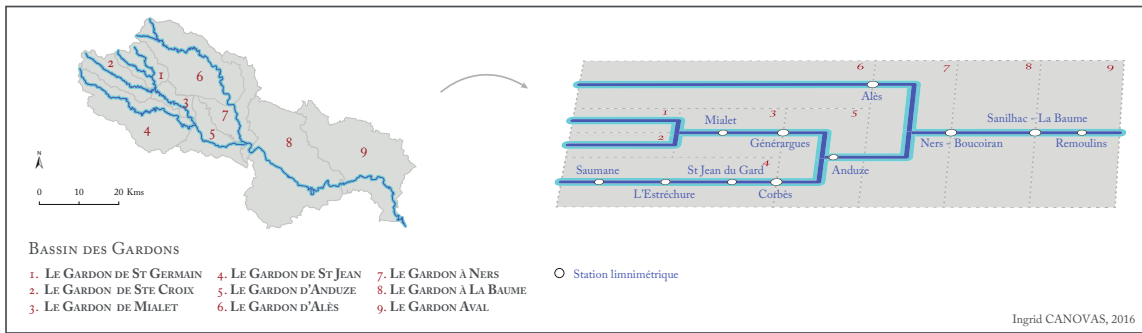


FIGURE 6.1 : LES POSTES DE MESURE RETENUS POUR L'ÉLABORATION DES INDICATEURS DE L'ÉTAT DE LA RESSOURCE SUPERFICIELLE

L'étude est complétée ensuite par une comparaison entre quelques descripteurs de récession et les paramètres de loi issus du modèle.

Cette succession d'étapes doit potentiellement (1) contribuer à une première validation de l'indicateur retenu, et (2) permettre de proposer différents indicateurs dérivés, pouvant s'avérer complémentaires, ou plus adaptés à d'autres échelles spatio-temporelles d'analyse.

L'indicateur le plus pertinent pour décrire l'état du volume disponible en surface, au pas de temps journalier, est ensuite retenu pour illustrer la méthode d'élaboration des seuils de criticité. Pour cela, la distribution des valeurs de l'indicateur est préalablement caractérisée (*e.g.* gaussienne, parétienne), afin d'ajuster la série correspondante à la loi statistique adaptée, et, à partir de laquelle, les seuils de criticité sont finalement définis.

L'ensemble de ces étapes est mené sur 11 postes de mesure de débit (la sélection des postes prioritaires sera établie ultérieurement lors de la mise en œuvre opérationnelle), répartis sur 7 sous-bassins versants des Gardons (FIGURE 6.1).

6.1 Découpage des phases de récession et identification des dynamiques d'écoulement des débits

La pertinence d'un indicateur repose essentiellement sur le choix de la méthode ou du modèle pour la transformation de la valeur brute (*i.e.* le débit journalier) en une information synthétique qui traduise au mieux la dynamique à évaluer (*i.e.* la vidange des rivières). C'est la raison pour laquelle il apparaît indispensable, dans le cas présent, et préalablement à tout processus de traitement de la donnée brute, de mener une analyse, même élémentaire, sur les dynamiques d'écoulement des débits en phase de récession. Une fois mises en évidence, elles pourront à la fois servir d'aide pour le choix du modèle (ici statistique), mais permettront également de constituer un support de comparaison pour affirmer ou réfuter la validité de l'indicateur qui en résultera. En d'autres termes, il s'agira de vérifier que la (les) dynamique(s) et/ou la structure révélée(s) grâce à la série des valeurs de l'indicateur est (sont) analogue(s) ou, du moins, relativement proche(s) de celle(s) identifiée(s) via les séries de débits.

6.1.1 Définition de la phase de récession

Ce travail exploratoire est mené en premier lieu sur les récessions de fin de cycle, pour la raison qu'elles prennent en compte le fonctionnement hydrologique global des cours d'eau et des aquifères en période de basses eaux. En effet, en incluant tant les décrues que la contribution des systèmes au maintien du débit (*e.g.* écoulement libre, ruissellement) (Mangin, 1975), les récessions ne se limitent pas à la description du tarissement (*stricto sensu*). En débutant avec une pointe de crue, elle intègre donc plusieurs états et situations hydrologiques.

En effet, durant cette phase de décroissance, des épisodes pluvieux peuvent introduire une variation des débits, pouvant alors contribuer à des alternances d'états plus ou moins satisfaisants, vis-à-vis des usages de l'eau.

C'est pourquoi, la phase de récession est définie ici par la période qui s'initie au jour où le débit maximal (*i.e.* le pic le plus important) entre le 1^{er} mars et le 15 juin de l'année n est observé, et qui s'étend jusqu'au jour où le débit le plus faible du cycle (*i.e.* l'étiage strict) est atteint. Ainsi, parce que la démarche n'est pas centrée sur les seuls états extrêmes, la période d'analyse ne se limite pas aux seuls débits les plus faibles, généralement concentrés sur quelques jours voire quelques semaines en été. Une situation d'insuffisance en eau peut en effet survenir bien avant la fin de la récession. Par ailleurs, les apports pluviométriques estivaux et printaniers sont inclus dans l'analyse, puisqu'ils peuvent se révéler (in-)suffisants, certaines années, pour réalimenter les réserves en eau.

En revanche, la période qui suit l'étiage strict n'est pas prise en compte. Pourtant, le retour des précipitations qui l'accompagne ne contribue pas systématiquement à une remontée importante du niveau de la réserve superficielle (et souterraine), et une situation de tension peut alors potentiellement apparaître ou perdurer jusqu'à l'automne ou l'hiver, voire au-delà. C'est la raison pour laquelle une approche par cycle est également envisagée, et devrait permettre de constater si des périodes hors-récession de fin de cycle s'avèrent fréquemment problématiques. Par ailleurs, ce dernier découpage temporel se conformerait davantage à la définition des basses eaux supportée par ce travail (voir *supra* 1.3).

6.1.2 Analyse graphique des dynamiques d'écoulement des débits en récession

À partir des chroniques de données brutes de récession, une double analyse des dynamiques d'écoulement superficiel est conduite. Elle porte dans un premier temps sur les profils de récession, majoritairement déterminés par la répartition temporelle des apports pluviométriques durant cette période, et se traduisent par des allures particulières des courbes de débit qui en résultent. Ces dernières sont ensuite comparées entre différents postes de mesure, *a priori* représentatifs du comportement du cours d'eau, sur un linéaire restreint, et, le cas échéant, des aquifères qui les alimentent.

Les trois stations prises en exemple, ont été retenues de par leur localisation sur le tronçon du réseau hydrologique considéré, ici le Gardon de Saumane à Ners (FIGURE 6.2) :

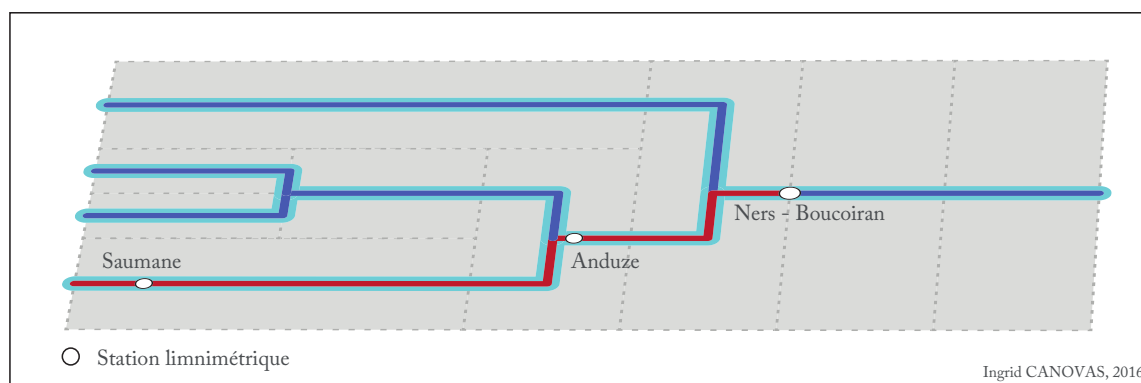


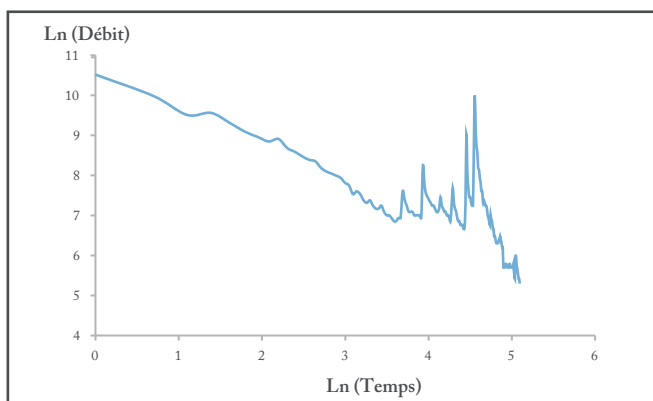
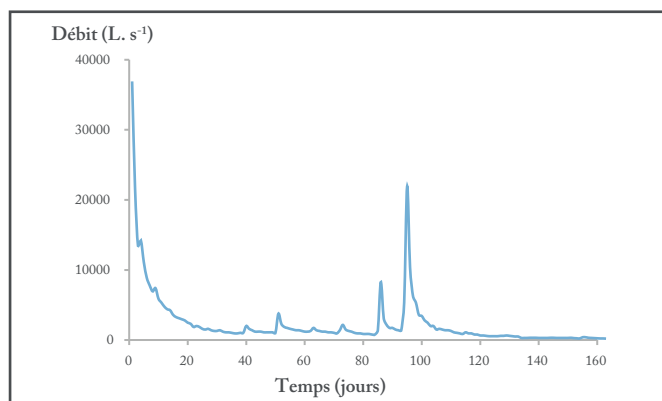
FIGURE 6.2 : LE LINÉAIRE DU GARDON DE SAUMANE À NERS

- La station de Saumane, située en tête de bassin des Gardons est la plus proche de la source. Ce point de mesure étant localisé sur la partie de socle du bassin des Gardons, le débit enregistré ne tient donc pas compte d'une éventuelle contribution de la réserve souterraine ;
- La station d'Anduze, située en aval des sous-bassins de tête, est en amont de la confluence des Gardons d'Anduze et d'Alès. Ce point de mesure étant situé sur la petite bande sédimentaire qui recoupe le lit du Gardon, le débit enregistré intègre donc une petite part de la réserve souterraine ;
- Les stations de Ners et de Boucoiran (dont les chroniques ont été regroupées, car la seconde a remplacé la première, à une centaine de mètres) en aval de la confluence du Gardon d'Anduze et du Gardon d'Alès. Ce point de mesure à la limite entre l'amont et l'aval du bassin des Gardons, est installé sur une zone alluviale relativement étendue, permettant ainsi un meilleur soutien du débit.

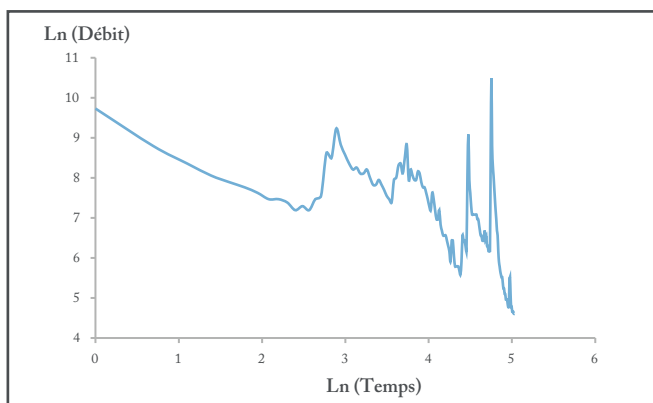
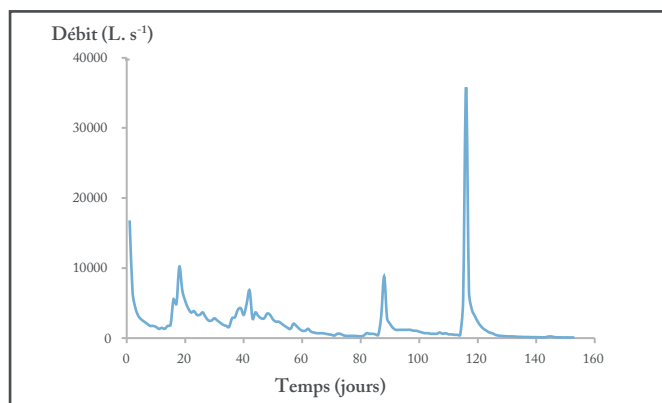
La comparaison est menée sur des années communes, et au cours desquelles les récessions offrent des profils différents. En effet, à la suite d'une première observation faite sur l'ensemble des séries de débits de récession enregistrées à chaque station limnimétrique, un essai de typologie peut être établi (ENCADRÉS E15.1 à E15.3) :

- (1) Une décroissance (plus ou moins rapide) des débits, qui s'initie depuis un pic de crue très important, qui est d'abord peu perturbée (*i.e.* relativement continue), suivie d'une succession de petites crues avant un pic plus important, qui survient quelques jours avant une fin de récession peu ou pas perturbée ;
- (2) Une décroissance qui s'initie à partir d'un pic de crue peu important, et rapidement interrompue par une succession de petites crues, suivie d'un pic estival équivalent ou supérieur à celui marquant le début de la phase de récession, avant une fin de période peu ou pas perturbée ;
- (3) Une décroissance relativement continue, très peu perturbée, et, le cas échéant, essentiellement en deuxième moitié de période ;
- (4) Une décroissance rapidement interrompue par un pic de crue important, suivi d'une diminution des débits légèrement perturbée par des fluctuations mineures.

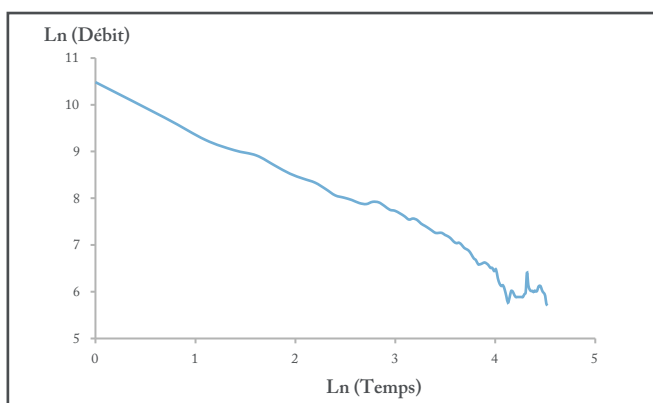
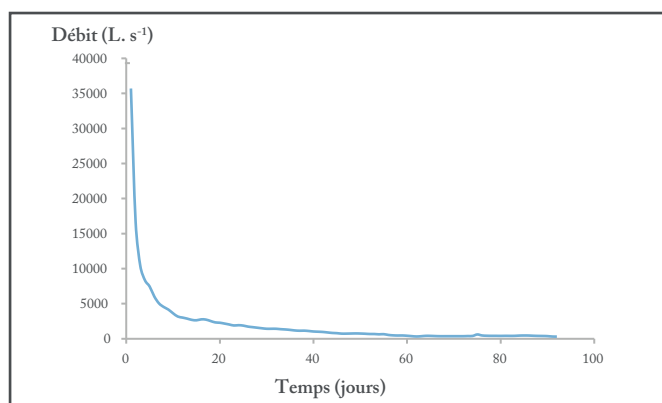
G15.1.1 DYNAMIQUE D'ÉCOULEMENT DURANT LA RÉCESSION DE 1972



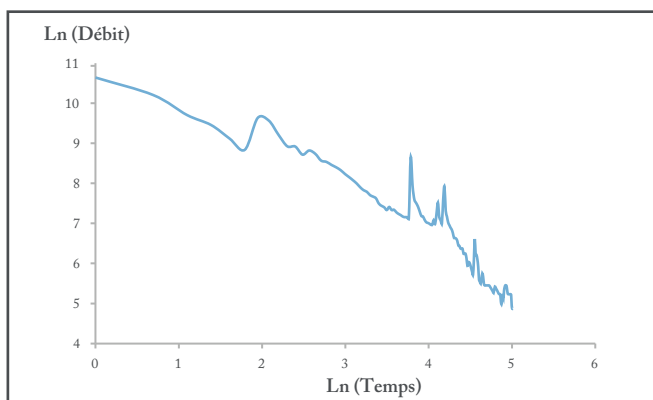
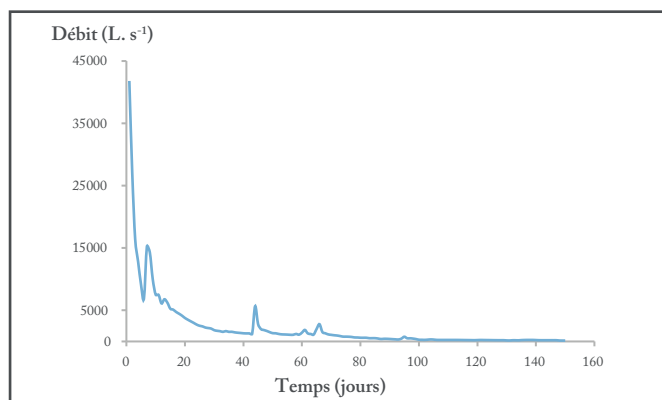
G15.1.2 DYNAMIQUE D'ÉCOULEMENT DURANT LA RÉCESSION DE 1977



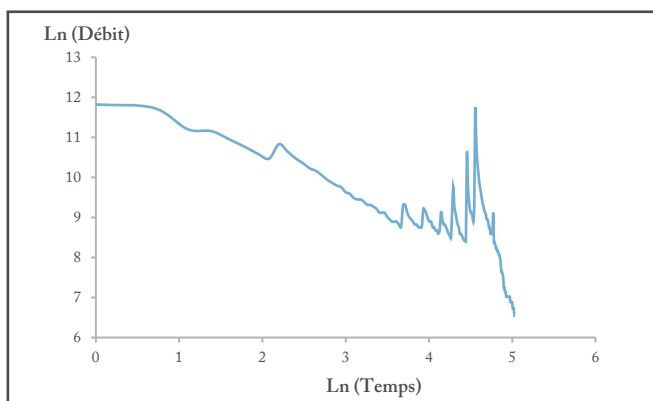
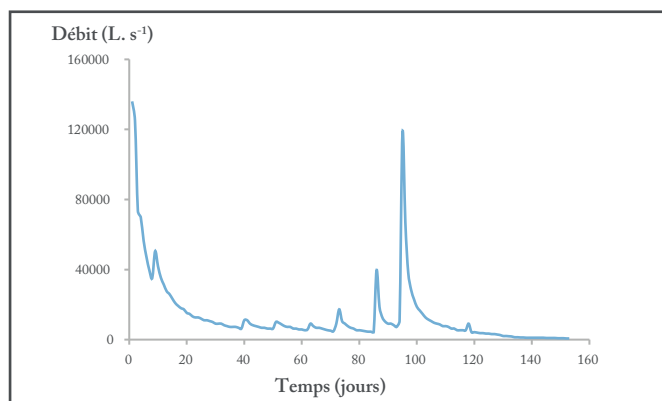
G15.1.3 DYNAMIQUE D'ÉCOULEMENT DURANT LA RÉCESSION DE 1984



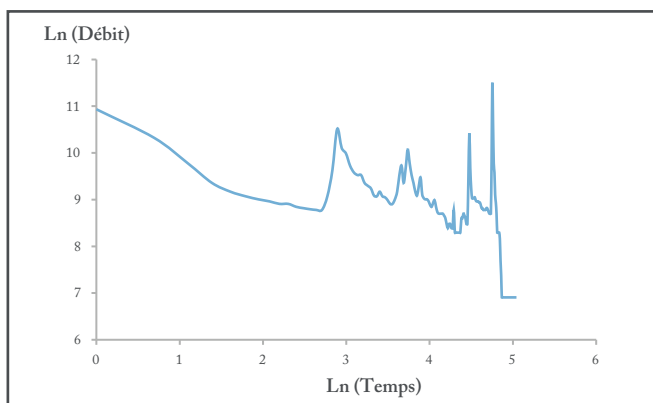
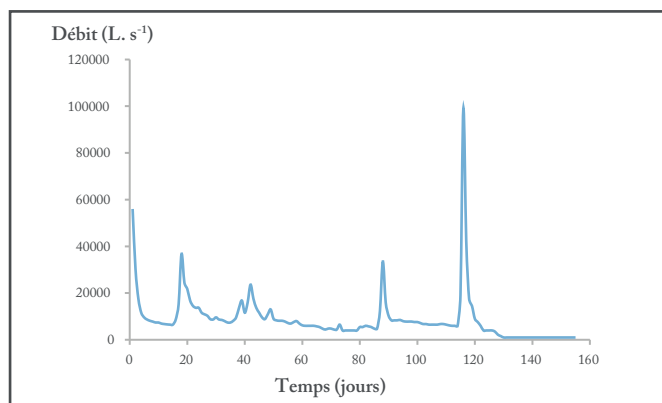
G15.1.4 DYNAMIQUE D'ÉCOULEMENT DURANT LA RÉCESSION DE 1988



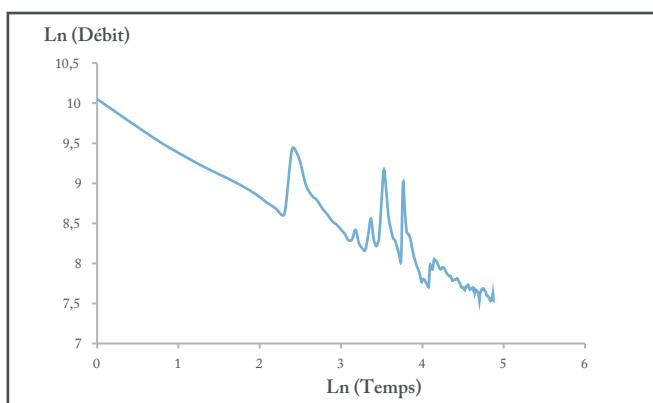
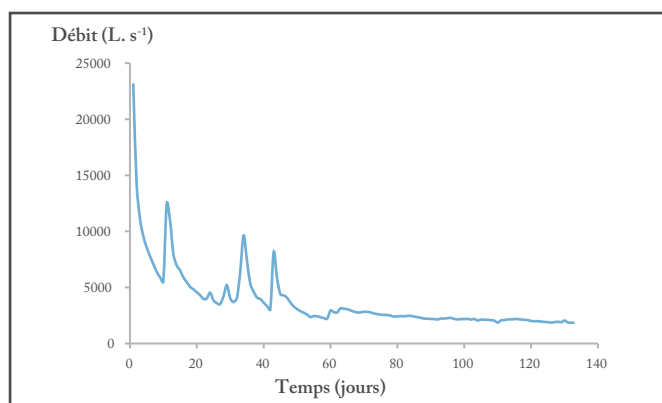
G15.2.1 DYNAMIQUE D'ÉCOULEMENT DURANT LA RÉCESSION DE 1972



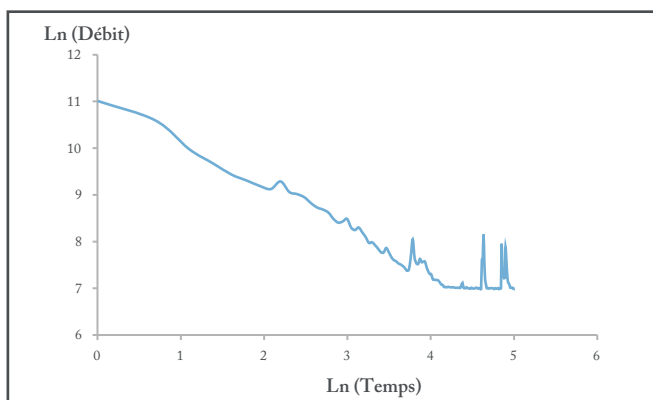
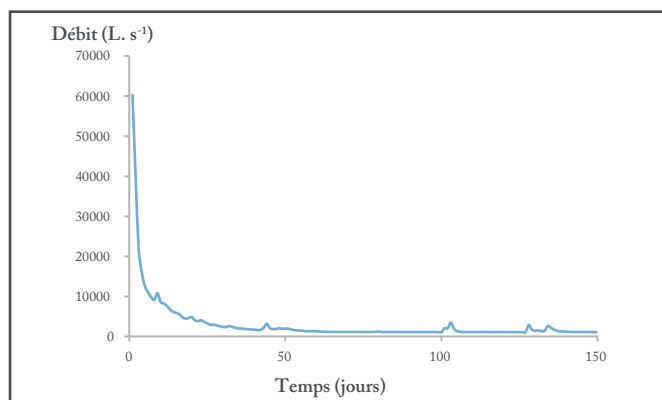
G15.2.2 DYNAMIQUE D'ÉCOULEMENT DURANT LA RÉCESSION DE 1977



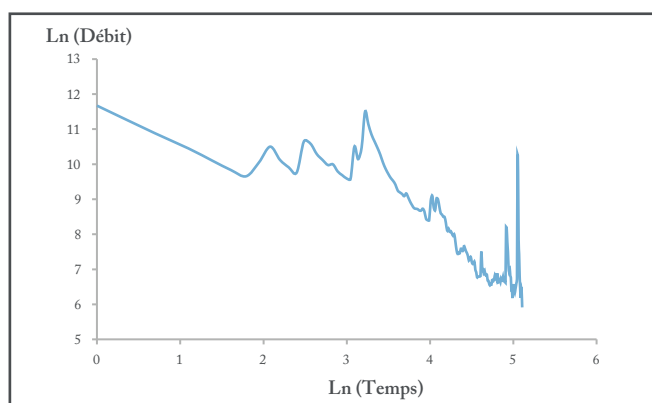
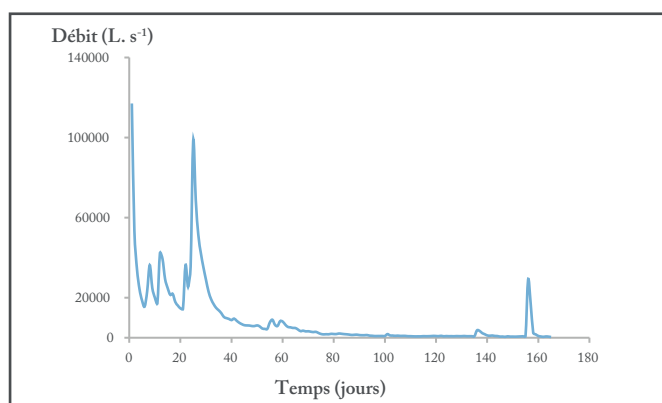
G15.2.3 DYNAMIQUE D'ÉCOULEMENT DURANT LA RÉCESSION DE 2007



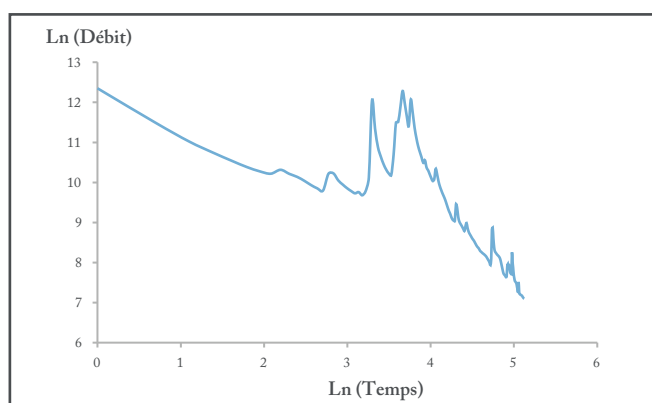
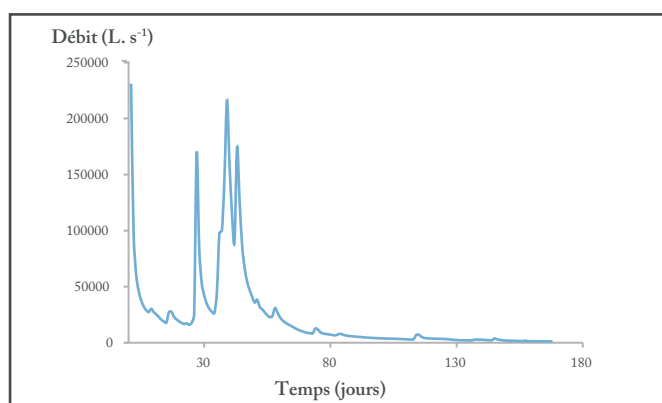
G15.2.4 DYNAMIQUE D'ÉCOULEMENT DURANT LA RÉCESSION DE 2012



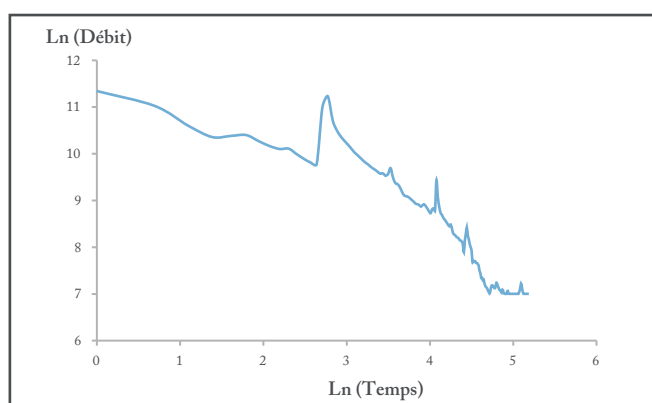
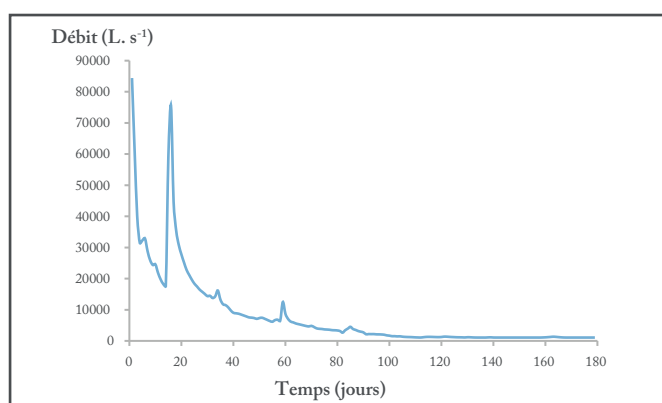
G15.3.1 DYNAMIQUE D'ÉCOULEMENT DURANT LA RÉCESSION DE 2000



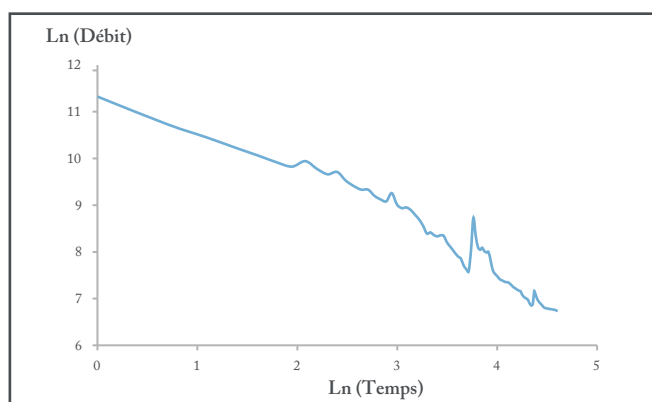
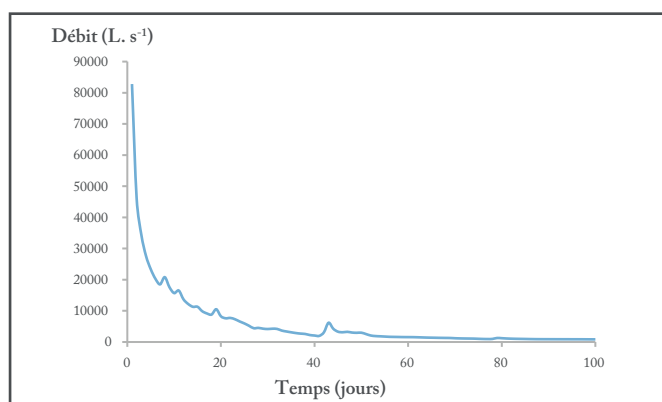
G15.3.2 DYNAMIQUE D'ÉCOULEMENT DURANT LA RÉCESSION DE 2008



G15.3.3 DYNAMIQUE D'ÉCOULEMENT DURANT LA RÉCESSION DE 2009



G15.3.4 DYNAMIQUE D'ÉCOULEMENT DURANT LA RÉCESSION DE 2012



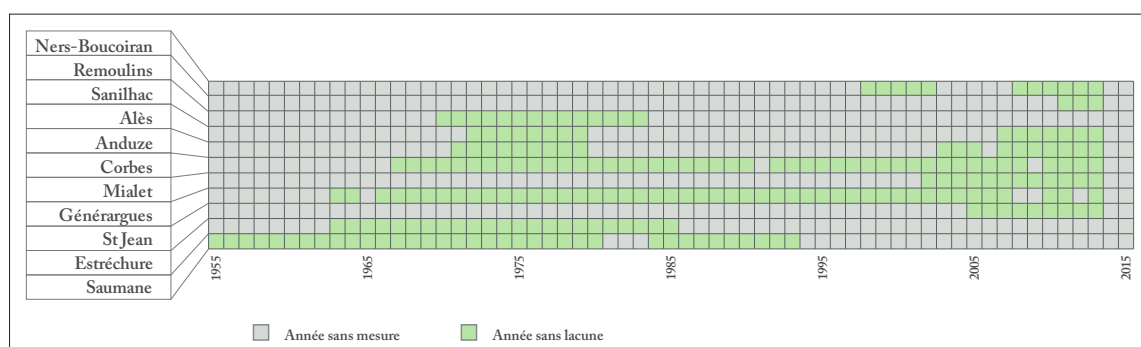


FIGURE 6.3 : LES ANNÉES RENSEIGNÉES AUX POSTES LIMNIMÉTRIQUES RETENUS

Bien que les chroniques enregistrées à ces trois stations ne se recoupent pas sur toutes les années, ce qui contribuerait à une analyse plus rigoureuse sur les trois points retenus (FIGURE 6.3), des constats sommaires peuvent déjà être faits sur leur dynamique hydrologique durant leurs années communes, et au cours des quatre profils type de récession identifiés.

Sur les stations de Saumane et d'Anduze, les formes des courbes des récessions de 1972 et 1977 sont globalement analogues, avec tout de même quelques nuances : à Anduze, l'amorce de la décroissance semble être plus tardive, moins prononcée et plus « lisse », notamment après les premières crues. De surcroît, la fin de récession y apparaît plus nette (*i.e.* moins perturbée). Cela semble suggérer l'existence d'une légère inertie à Anduze, probablement liée aux apports de la réserve sédimentaire, absente en tête de bassin. Par ailleurs, sur l'ensemble des quatre profils de récession, un palier de fin de récession est observable au poste d'Anduze (*i.e.* les débits de fin de période sont maintenus durant les derniers jours à des valeurs très proches), phénomène inexistant à Saumane, où la récession s'arrête brutalement, la courbe étant rompue en cours de décroissance.

En 2012, sur les postes d'Anduze et de Ners, les formes des courbes de début de récession se ressemblent également. En revanche, le palier précédant l'atteinte de l'étiage strict, caractéristique à Anduze, et observé plusieurs fois cette année-là, n'apparaît pas à Ners, où la décroissance demeure continue jusqu'à la fin de la période de récession. Ners semble ainsi bénéficier, sur une durée plus étendue, de ressources importantes pour maintenir une décroissance relativement continue entre les perturbations de milieu de phase.

Par conséquent, et selon toute vraisemblance, les linéaires les plus en amont seraient davantage réceptifs aux perturbations climatiques (*i.e.* réactions immédiates et marquées lors d'apports pluvio-métriques, même peu intenses), et se vidangeraient par ailleurs plus rapidement, une fois l'épisode pluvieux achevé (*i.e.* pas d'effet « mémoire », ni d'inertie), en raison de l'absence d'aquifères souterrains capables de les alimenter. Il est ainsi possible de supposer que des prélèvements et des pertes évaporatoires importantes aient un impact notoire sur leur dynamique d'écoulement en période estivale, et puissent avoir un effet opposé à celui des épisodes de pluie (*i.e.* un effondrement des valeurs de débits).

Conclusion — De manière générale, les débits augmentent de l'amont vers l'aval, ce qui déjà créé un déséquilibre entre les bassins de tête et les bassins proches de l'exutoire. Ajouté à cela, de la variation des débits d'une année sur l'autre peut résulter des étiages ou des récessions plus ou moins marquées, donc souvent plus problématiques à l'amont (du moins, plus précocement).

Cela étant, ces quelques exemples ne permettent toutefois pas de discriminer les années les plus problématiques, bien que le bon sens amène à penser que les récessions perturbées puissent être moins sévères que celles pour lesquelles les perturbations sont peu significatives. Au-delà de la question de la contribution des précipitations que suggère cette dernière hypothèse (et qui sera traitée CHAPITRE 8), et en plus des dynamiques inhérentes à la localisation géographique des points de mesure, l'évaluation du niveau de sévérité global de la récession doit aussi tenir compte d'autres paramètres inhérents à cette période de décroissance, tels que la durée, les gammes de valeurs des débits aussi bien extrêmes (*i.e.* les débits de début et de fin de récession) qu'intermédiaires

En effet, une récession qui s'achève sur quelques jours de débits très faibles peut être considérée comme moins tendue qu'une longue période de bas débits. De la même manière, une récession sans perturbation, mais de courte durée, apparaîtra moins problématique qu'une récession ponctuée de petites perturbations mais relativement longue. En outre, l'intérêt de la présente démarche ne porte pas uniquement sur les périodes ponctuées par des valeurs extrêmes, mais aussi (et surtout) sur des périodes au cours desquelles les fluctuations intermédiaires atteignent fréquemment des valeurs suffisamment faibles pour être problématiques vis-à-vis des usages de l'eau.

L'indicateur se doit donc d'être conçu de sorte à synthétiser l'ensemble de ces conditions, et à discriminer les états de sévérité des débits, non seulement à l'étiage (au sens vernaculaire du terme), mais également tout au long de la période de récession. En d'autres termes, il doit être en mesure de révéler des valeurs « anormales » ou peu fréquentes aussi bien au début, au milieu qu'à la fin de la période considérée (*e.g.* la récession, le cycle hydrologique, ou encore la saison estivale).

6.2 Le modèle retenu pour la création de l'indicateur d'état du volume superficiel disponible

Comme illustré précédemment, les récessions, telles que définies dans ce travail, englobent une période suffisamment longue pour intégrer certaines années (voire la quasi-totalité des années) des épisodes de pluies printaniers ou tardifs (*i.e.* estivaux, majoritairement courts et sous forme orageuse) et, par conséquent, des crues plus ou moins significatives. Il convient dès lors de recourir à un indicateur qui soit en mesure de les intégrer, afin de tenir compte de la dynamique d'écoulement dans son intégralité. En d'autres termes, l'objectif recherché ne s'appuie pas sur une sélection préalable des seules phases de décroissance stricte ou des débits sous un seuil donné durant les récessions, mais vise au contraire la conservation de l'ensemble de l'information contenue dans la série de données brutes. Et ceci, afin de tenir compte des perturbations engendrées aussi bien par les apports d'origine climatique (et souterraine) que par les prélèvements environnementaux et anthropiques, les premiers étant essentiels pour maintenir ou assurer les seconds.

De cette manière, les variations susceptibles d'apparaître au cours d'une même phase de récession (*i.e.* l'alternance de périodes plus ou moins tendues) peuvent être mises en exergue, ce que n'autorisent pas les indicateurs classiques, qui tiennent compte uniquement des valeurs décroissantes et/ou des débits considérés comme étant les plus faibles (voir *supra* 2.3.1). Ces derniers ne se révèlent donc pas adaptés pour répondre aux exigences de la démarche pensée dans ce travail, et ne conviennent pas à la définition des basses eaux avancée. C'est la raison pour laquelle la décision de recourir à un nouvel indicateur, récemment développé dans le cadre d'une étude similaire menée sur la Fontaine de Vaucluse, a été préférée (Martin, soumis).

6.2.1 Définition de l'indice volumique journalier et présentation du modèle statistique associé

L'indicateur et le modèle adoptés ici sont repris d'un travail de recherche portant sur l'étude des récessions à la Fontaine de Vaucluse (Martin, soumis). Ils prennent leurs origines sur l'analyse des phases de tarissement à partir des séries de débits enregistrés en sortie de la source karstique, pour lesquelles le modèle de Maillet ne convient pas (par exemple, plusieurs coefficients de tarissement sont nécessaires).

En effet, pour appréhender les phases de tarissement, il est généralement préconisé de procéder à une linéarisation de la décroissance des débits, les graphiques aux échelles arithmétiques ne donnant pas d'informations précises sur le phénomène (FIGURE 6.4A). Pour cela, il est nécessaire de créer un graphique semi-logarithmique ($\ln Q$; t) (FIGURE 6.4B). La fonction exponentielle de type Maillet se linéarise alors en transformant les valeurs de débits en valeurs logarithmiques, fournissant ainsi des indicateurs, ponctuels et comparables, sur les modalités de fonctionnement d'un système en régime non influencé (*e.g.* le coefficient de tarissement) et sur l'état du stock d'eau, en particulier par le calcul du volume dynamique, qui correspond à l'ensemble de la masse d'eau en mouvement déterminant le débit à l'exutoire (Martin, 1998).

Cependant, il est parfois nécessaire de passer à un graphique bi-logarithmique ($\ln Q$; $\ln t$), ce qui conduit alors à une relation « puissance » (FIGURE 6.4C). La question est alors d'ajuster un modèle de puissance pour matérialiser la décroissance générale des débits et traduire la vidange du cours d'eau pendant les récessions de fin de cycle.

Sur ces bases, Ph. Martin a d'abord développé un indice synthétisant la décroissance journalière du débit. La démarche s'opère en plusieurs étapes. Elle s'inspire du modèle de Maillet, avec lequel un coefficient de tarissement peut être calculé en portant :

$$(6.1) \quad \frac{\ln(Q_{t_1}) - \ln(Q_{t_0})}{t_1 - t_0} = \alpha$$

- t_0 est le premier jour du tarissement, ou le premier jour choisi pour le calcul ;
- t_1 est le dernier jour du tarissement, ou le dernier jour choisi pour le calcul.

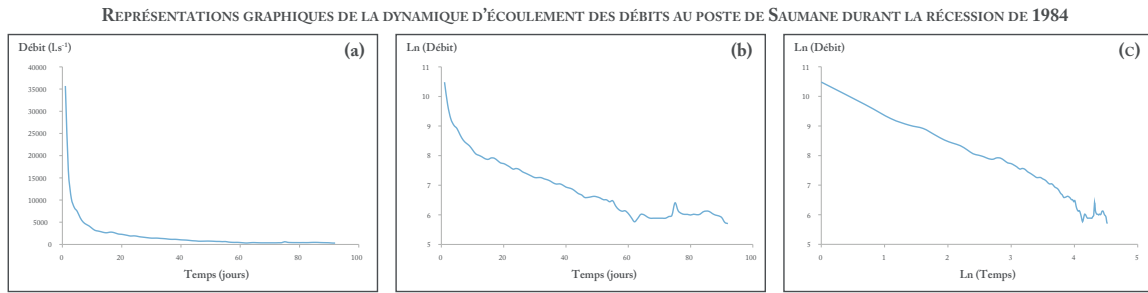


FIGURE 6.4 : REPRÉSENTATIONS GRAPHIQUES DE LA DYNAMIQUE D'ÉCOULEMENT DES DÉBITS AU POSTE DE SAUMANE DURANT LA RÉCESSION DE 1984

Grâce au coefficient de tarissement, il est ensuite possible de calculer le volume dynamique (V_d) de l'aquifère, qui est égal à :

$$(6.2) \quad V_d = \left(\frac{Q_0}{\alpha} \right) \times 86400$$

Avec :

- Q_0 le débit initial à t^0 ,
- α le coefficient de tarissement,
- 86 400 une constante de temps.

Cela revient alors à intégrer l'exponentielle du modèle de Maillet. De cette approche, l'idée de pente est conservée, mais en envisageant sa variation au fil du temps, et celle d'un coefficient de tarissement variable (donc un volume « dynamique ») peut être avancée. Toutefois, le calcul de l'indice est fait en prenant aussi l'écart du logarithme des temps.

Ainsi, pour une récession de type modèle puissance, il devient possible de calculer cet indicateur, qui est de la forme :

$$(6.3) \quad I_{Vj} = \ln \left(\left(\frac{\frac{Q_t}{\ln(Q_t) - \ln(Q_{t+1})}}{\ln(t+1) - \ln(t)} \right) \times 0,0864 \right)$$

- Q_t étant le débit du jour considéré
- Q_{t+1} étant le débit du jour suivant
- t la durée depuis le début de la récession
- $t+1$ la durée $t + 1$ jour
- 0,0864 une constante de temps

En effectuant le calcul au pas de temps journalier, une nouvelle série, constituée des valeurs de l'indice (calculées sur deux jours), est obtenue. Le logarithme de l'indice volumique journalier (uniquement si la valeur est positive) est ensuite porté en fonction du logarithme du temps sur un

graphique bi-logarithmique et les points s'alignent alors selon un modèle de puissance dont la pente peut être calculée.

Dans cette approche exploratoire, la pente renseigne sur le taux de vidange de l'aquifère et la constante informe sur la quantité d'eau qui se trouve dans la réserve quand elle se vide. Le coefficient de détermination donne quant à lui une mesure des perturbations apportées par les crues à l'état de l'hydrosystème considéré (*i.e.* les écarts au modèle). Par ailleurs, la présence d'une cassure ou rupture de pente, pourrait équivaloir à deux types de vidange, la deuxième correspondant possiblement à la phase de tarissement. Une hypothèse peut être émise, laquelle stipule que si une rupture est observée et intervient tard, c'est que le cycle a été plutôt humide, et qu'un bon soutien a été assuré par des épisodes pluvieux réguliers ou suffisants. De plus, si la pente de cette même seconde courbe est faible, l'étiage serait moins sévère.

Bien que le modèle ait été développé pour caractériser le régime d'écoulement de récession de fin de cycle en sortie d'un régime karstique, l'hypothèse selon laquelle il pourrait s'ajuster correctement aux débits journaliers de récession des Gardons (et en caractériser la dynamique de vidange) est ici avancée.

6.2.2 Analyse des séries de l'indice volumique et du modèle de puissance

La formule énoncée par Ph. Martin est ainsi appliquée à chacune des séries de débits journaliers de récession, enregistrées aux 11 stations limnimétriques retenues. Examiner les courbes obtenues par l'ajustement des séries au modèle puissance revient alors à observer l'équivalent d'un volume écoulé par jour, à chaque point du réseau hydrographique. Seules les phases de décroissance sont visibles. Le maintien ou la hausse des débits ne sont pas représentés, puisque seul le logarithme des valeurs positives (*i.e.* de décroissance) est calculable ; chaque rupture de décroissance (augmentation ou maintien du débit) se traduisant sur la courbe par l'absence de trait reliant les points.

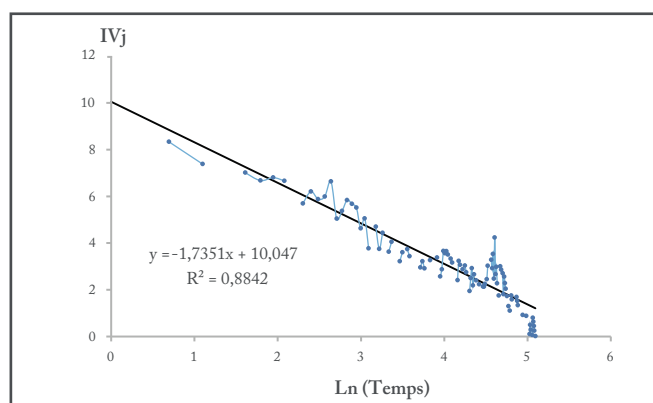
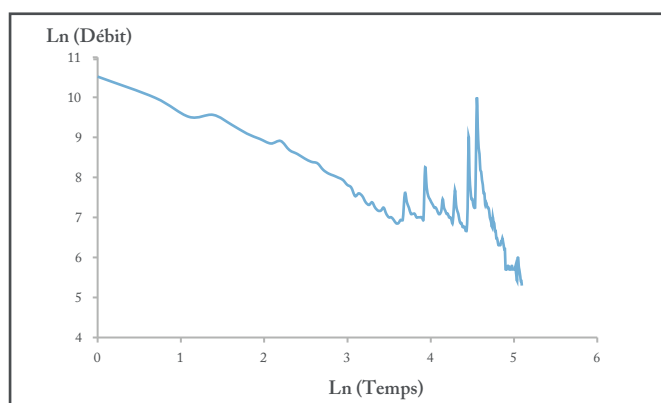
Une analyse comparative est ensuite conduite sur les courbes des modèles puissance des séries de débit et des séries de l'indice volumique.

6.2.2.1 Analyse comparative de l'allure des courbes des modèles puissance

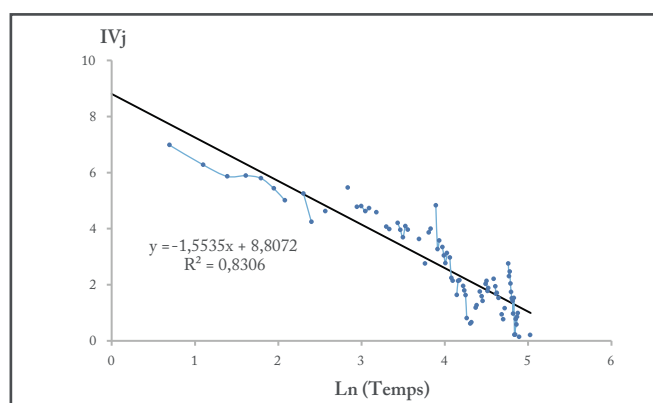
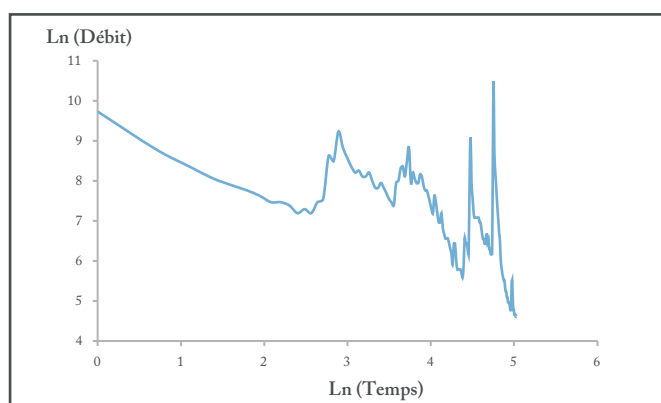
L'allure de la courbe du modèle de puissance de la série de l'indice volumique est sensiblement comparable à la courbe décrite par le modèle de puissance de la série de débit, à la différence que la première présente une meilleure linéarité, et intègre relativement bien les fluctuations (*i.e.* petites crues) (ENCADRÉS E16.1 à E16.3).

L'ensemble des phases de décroissance intermédiaires, très certainement imputables aux épisodes pluviométriques printaniers et/ou estivaux, sont prises en compte pour une meilleure représentativité du régime hydrologique, sans la contrainte d'une sélection préalable des valeurs. Si les pics y sont nettement visibles, ils ne sont toutefois pas représentés avec la même amplitude que sur la courbe du modèle puissance de la série de débit. En effet, plus la récession est avancée, plus le $\Delta \ln Q$ et le $\Delta \ln t$ diminuent, donc plus les valeurs des indices sont faibles, et ce, même pour un ΔQ équivalent

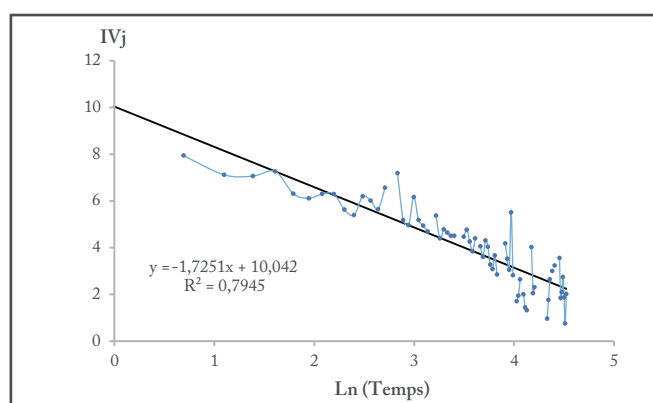
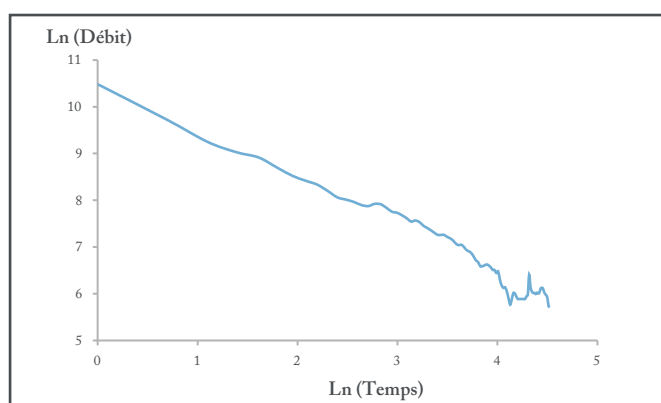
G16.1.1 DYNAMIQUE DE L'INDICE VOLUMIQUE DURANT LA RÉCESSION DE 1972



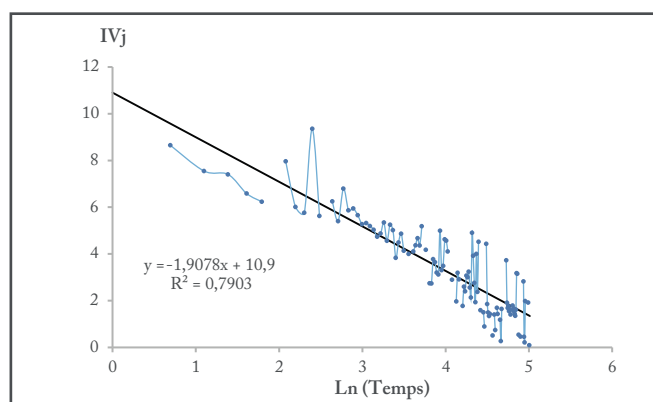
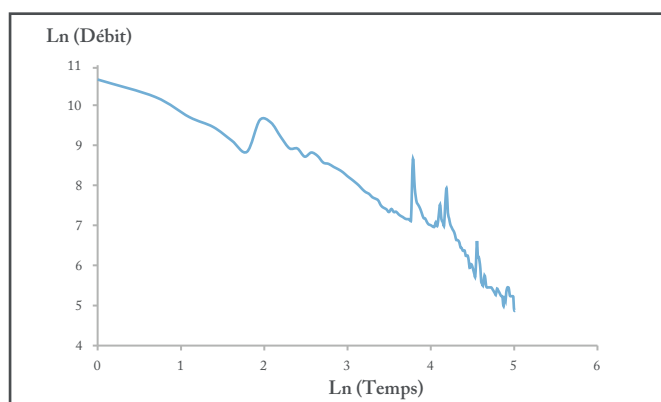
G16.1.2 DYNAMIQUE DE L'INDICE VOLUMIQUE DURANT LA RÉCESSION DE 1977



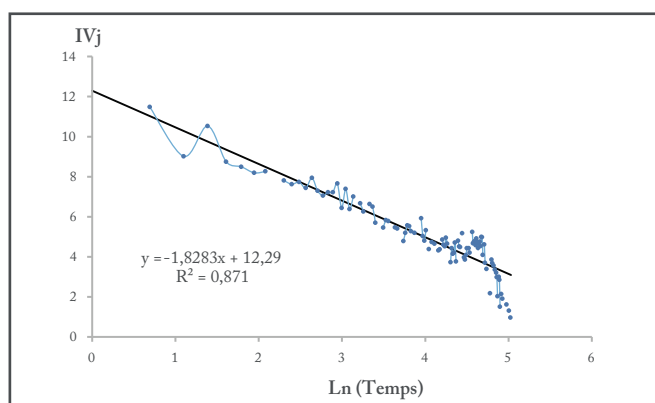
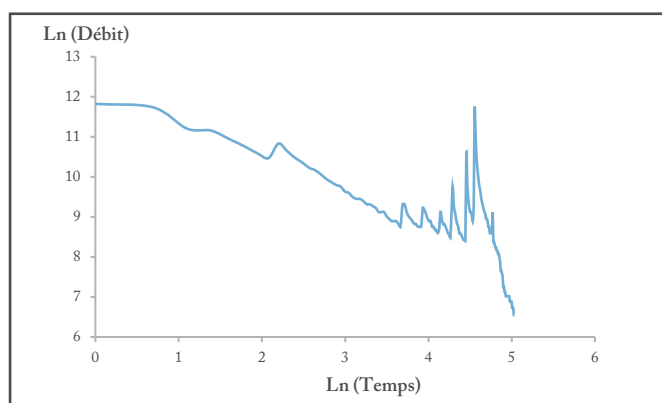
G16.1.3 DYNAMIQUE DE L'INDICE VOLUMIQUE DURANT LA RÉCESSION DE 1984



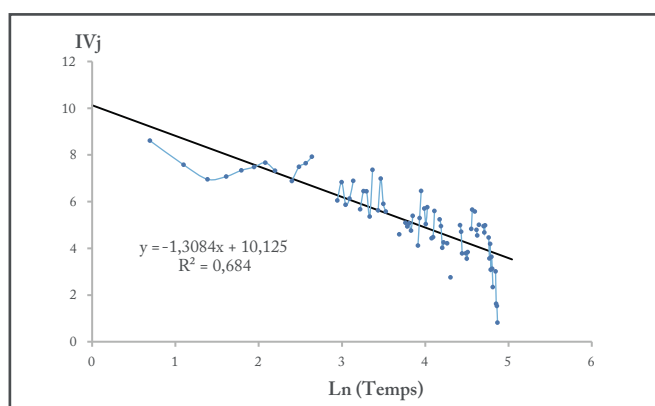
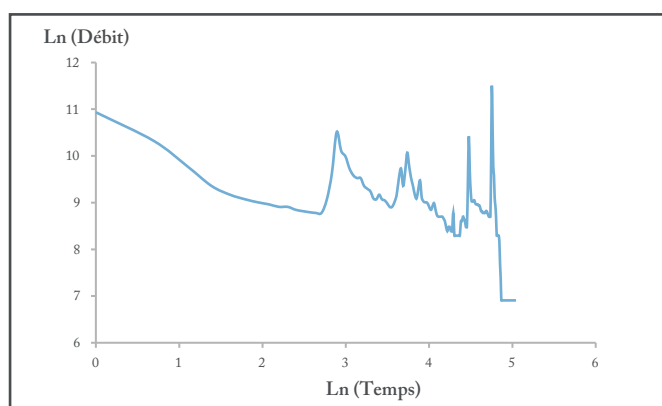
G16.1.4 DYNAMIQUE DE L'INDICE VOLUMIQUE DURANT LA RÉCESSION DE 1988



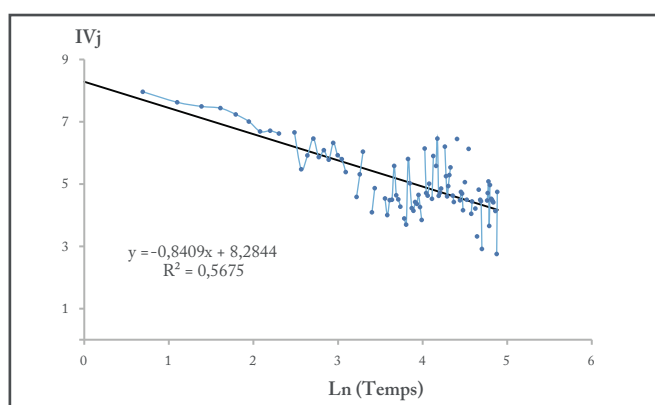
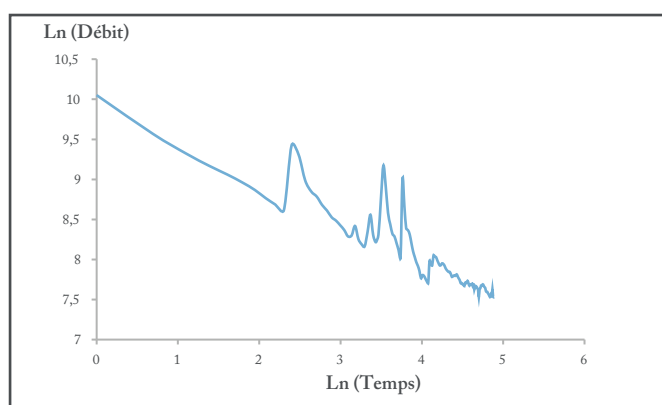
G16.2.1 DYNAMIQUE DE L'INDICE VOLUMIQUE DURANT LA RÉCESSION DE 1972



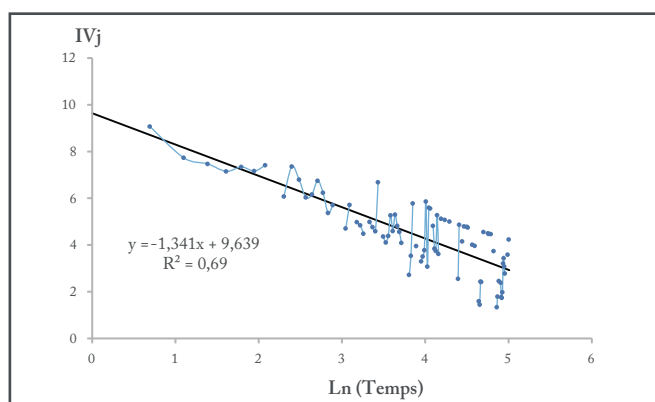
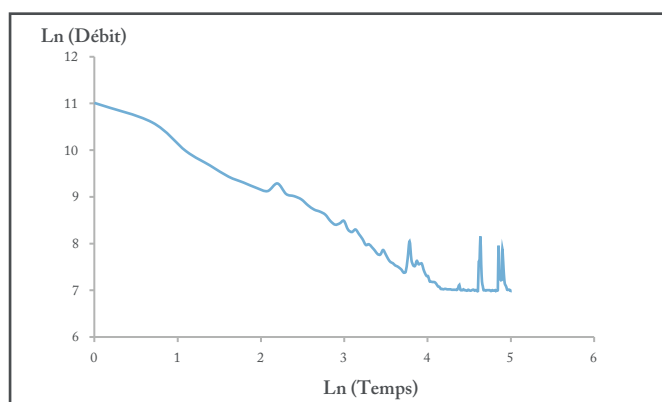
G16.2.2 DYNAMIQUE DE L'INDICE VOLUMIQUE DURANT LA RÉCESSION DE 1977



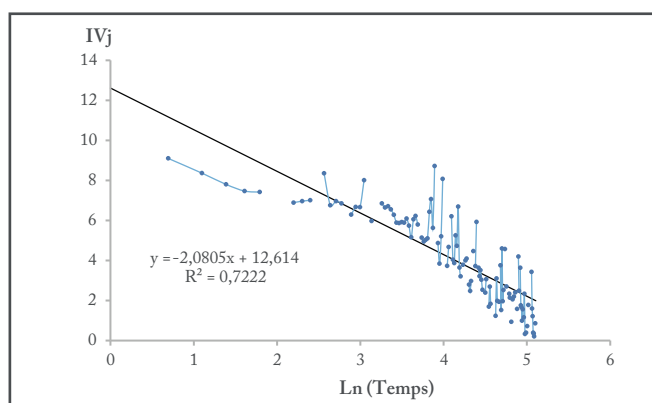
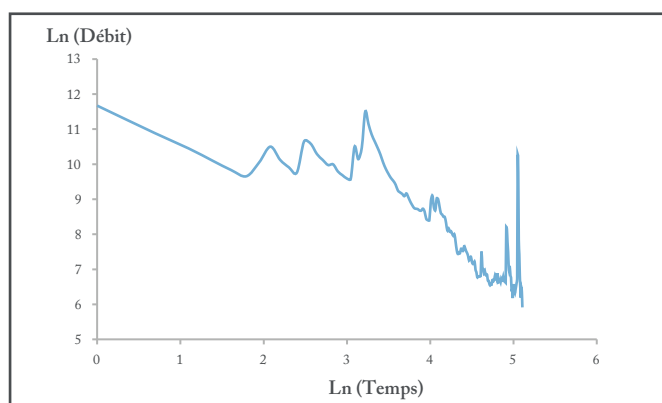
G16.2.3 DYNAMIQUE DE L'INDICE VOLUMIQUE DURANT LA RÉCESSION DE 2007



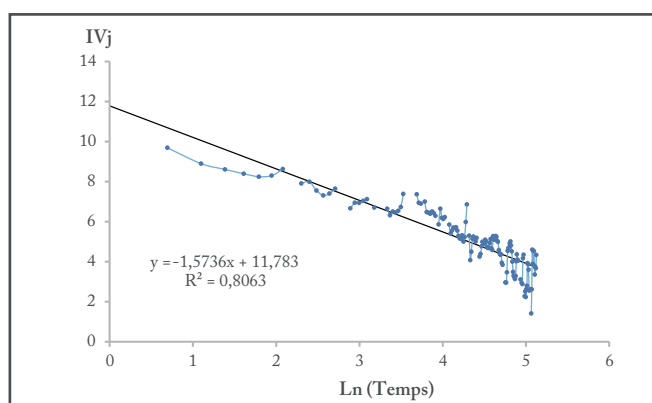
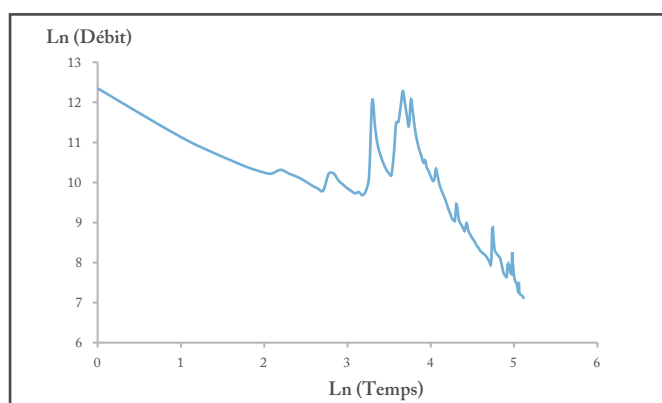
G16.2.4 DYNAMIQUE DE L'INDICE VOLUMIQUE DURANT LA RÉCESSION DE 2012



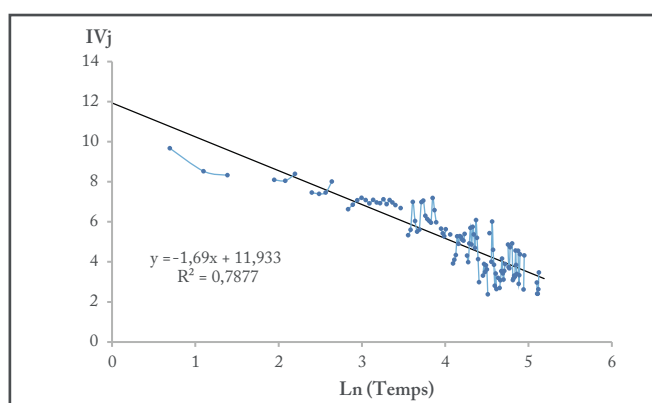
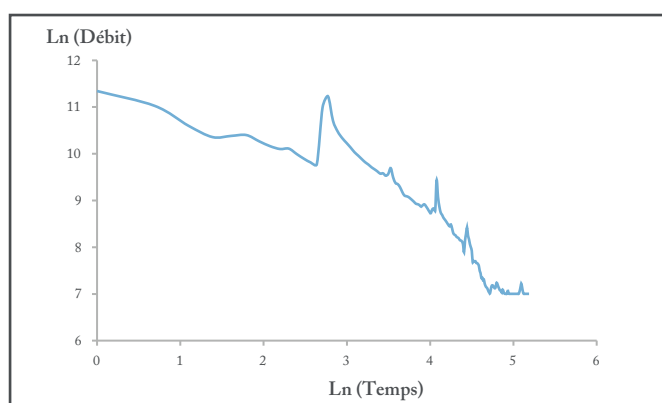
G16.3.1 DYNAMIQUE DE L'INDICE VOLUMIQUE DURANT LA RÉCESSION DE 2000



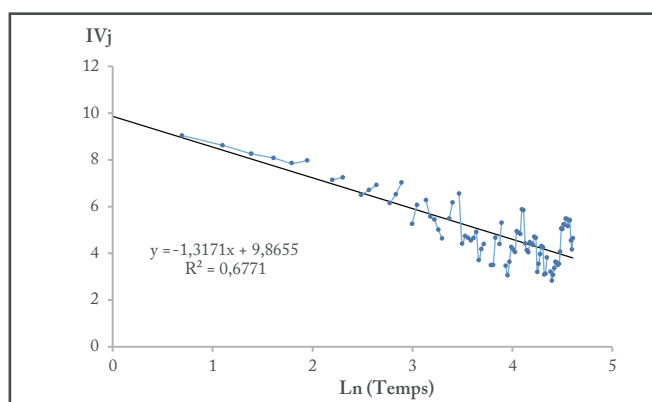
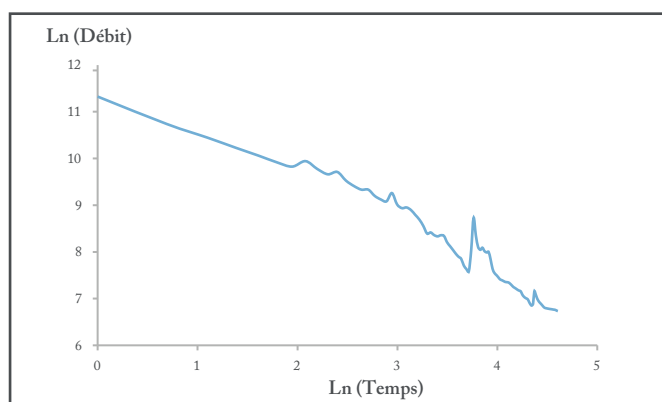
G16.3.2 DYNAMIQUE DE L'INDICE VOLUMIQUE DURANT LA RÉCESSION DE 2008



G16.3.3 DYNAMIQUE DE L'INDICE VOLUMIQUE DURANT LA RÉCESSION DE 2009



G16.3.4 DYNAMIQUE DE L'INDICE VOLUMIQUE DURANT LA RÉCESSION DE 2012



6. VERS DES INDICATEURS POUR LA DÉFINITION DE L'ÉTAT DU VOLUME SUPERFICIEL

Date	Débit	Temps (jours)	$(Q_t) - (Q_{t+1})$	$\ln(t)$	$\ln(Q)$	$\ln(Q_t) - \ln(Q_{t+1})$	$\ln(t+1) - \ln(t)$	Ivj
12/05/1977	1750	9		2,19	7,46			
13/05/1977	1610	10	140	2,30	7,38	0,08	0,10	5,25
⋮								
15/05/1977	1470	12		2,48	7,29			
16/05/1977	1330	13	140	2,56	7,19	0,10	0,08	4,62
⋮								
06/06/1977	1750	34		3,52	7,46			
07/06/1977	1610	35	140	3,55	7,38	0,08	0,02	3,96
⋮								
27/06/1977	1470	55		4,00	7,29			
28/06/1977	1330	56	140	4,02	7,19	0,10	0,01	3,12

FIGURE 6.5 : ÉVOLUTION DES VALEURS DE L'INDICE EN FONCTION DU TEMPS POUR DES VARIATIONS DU DÉBIT IDENTIQUES

Date	Débit	Temps (jours)	$(Q_t) - (Q_{t+1})$	$\ln(t)$	$\ln(Q)$	$\ln(Q_t) - \ln(Q_{t+1})$	$\ln(t+1) - \ln(t)$	Ivj
19/05/1977	5530	16		2,77	8,61			
20/05/1977	4890	17	640	2,83	8,49	0,12	0,06	5,46
⋮								
21/05/1977	10200	18		2,89	9,23			
22/05/1977	6820	19	3380	2,94	8,82	0,40	0,05	4,77
⋮								
27/08/1977	35800	116		4,75	10,48			
28/08/1977	6600	117	29200	4,76	8,79	1,69	0,01	2,75

FIGURE 6.6 : ÉVOLUTION DES VALEURS DE L'INDICE EN FONCTION DU TEMPS POUR DES VARIATIONS DU DÉBIT DE CRUE

(FIGURE 6.5). Cela traduit bien la variation du degré de sévérité que peut représenter l'écoulement d'un même volume : moindre en début de récession (lorsque la réserve disponible est importante) et conséquent en fin de récession (lorsque la réserve est (très) faible).

Ce constat est également vérifié pour les valeurs des indices correspondant aux différents pics de crue. Plus les fluctuations positives (*i.e.* apports pluviométriques) se manifestent tardivement, plus les indices correspondant sont faibles, et ce, bien que la valeur du pic soit différente (FIGURE 6.6).

C'est pourquoi, une petite crue de début de récession sera généralement traduite par un indice plus élevé qu'une crue plus importante survenant en fin de récession.

Cela traduit bien le fait que, en lien avec le découpage opéré ici, les apports de début de récession ont un effet significatif sur les réserves, que n'ont pas les apports de fin de période, les réserves étant déjà très faibles et n'ayant généralement pas le temps de se reconstituer en totalité (*i.e.* apports trop faibles ou insuffisants).

De fait, ce modèle permet l'obtention de gammes de valeurs d'indice par phase, au sein d'une même récession :

- La classe constituée des valeurs les plus élevées correspond globalement au début de la période de récession et aux crues notables de milieu de récession ;
- La classe constituée des valeurs moyennes (*i.e.* intermédiaires) inclue la fin de la première décroissance, le milieu de la récession, ainsi que les crues importantes de fin de récession ;

6.2. Le modèle retenu pour la création de l'indicateur d'état du volume superficiel disponible

Profil de récession	Niveau de perturbations	SAUMANE			ANDUZE			NERS - BOUCOIRAN		
		Pente	Minima Ivj *	Année	Pente	Minima Ivj *	Année	Pente	Minima Ivj *	Année
1	+	-1,73	++	1972	-1,82	++	1972	-2,08	++	2000
2	++	-1,55	+	1977	-1,3	+	1977	-1,57	+	2008
3	--	-1,72	--	1984	-1,34	-	2012	-1,31	--	2012
4	-	-1,9	-	1988	-0,84	--	2007	-1,69	-	2009

FIGURE 6.7 : COMPARAISON DES PROFILS DE RÉCESSION ET DES ALLURES DES COURBES DE L'INDICE VOLUMIQUE JOURNALIER EN TROIS POINTS DU RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE

- La classe constituée des valeurs faibles englobe, en plus de la fin de récession, les états secs du milieu de la période.

Cet indice semble donc offrir une bonne discrétisation des différentes phases d'écoulement au sein d'une même récession, ainsi que des états et des nuances pouvant être observées dans chacune d'elles certaines années et ce, sur tous les postes. De surcroît, la linéarité produite par le modèle de puissance permet également de visualiser, de manière assez claire, la variation annuelle et interannuelle de l'indice journalier, d'afficher les parties d'une tendance plus générale des récessions (en les remplaçant dans une perspective historique) et de révéler les années pour lesquelles les récessions ont été globalement plus ou moins sévères (ENCADRÉS E17.1 et E17.2).

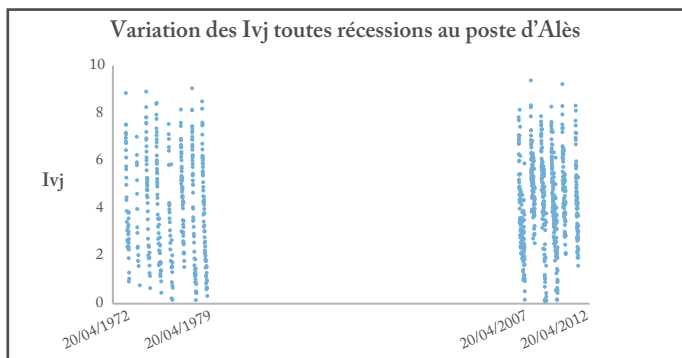
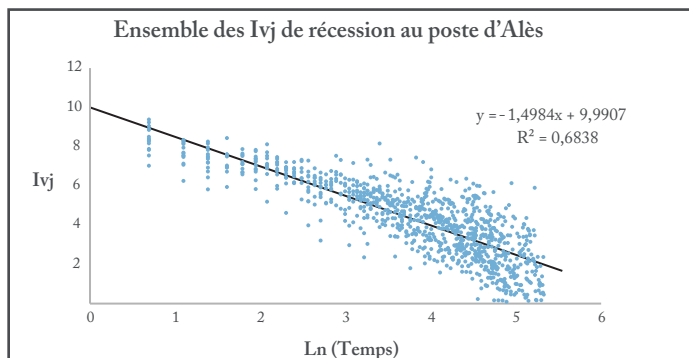
6.2.2.2 Analyse comparative des dynamiques d'écoulement, des minima et des profils de récession

Par ailleurs, ce modèle semble décrire correctement aussi bien les différentes dynamiques révélées sur les trois points du Gardons, que les différents profils de récession mis en avant précédemment (FIGURE 6.7).

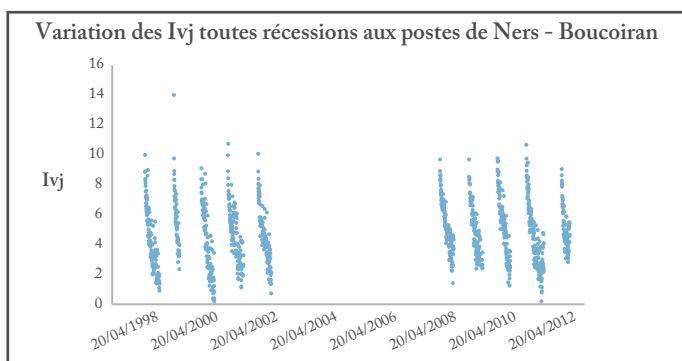
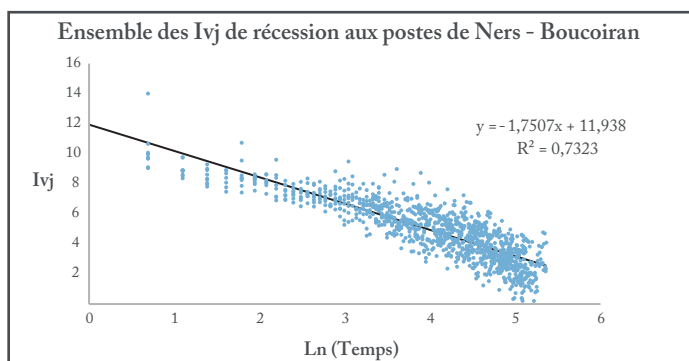
Sur les dynamiques d'écoulement : la pente du modèle — Globalement, à Saumane, poste le plus en amont, et sur les quatre années illustrées (correspondant aux quatre profils de récession), les pentes affichent des valeurs très faibles (*i.e.* pentes fortes), attestant d'une décroissance générale très prononcée et peu soutenue.

Au poste d'Anduze, situé un peu plus en aval, et à la confluence des sous-bassins de tête des Gardons, les pentes sont (à une exception) globalement moins accusées que celles observées à Saumane, attestant d'une décroissance générale moins prononcée et mieux soutenue. Au poste de Ners-Boucoiran, implanté à l'aval du linéaire considéré (*i.e.* à la confluence de l'ensemble des sous-bassins amont), les pentes sont plus marquées qu'à l'amont, lorsque les récessions sont perturbées. Ainsi, une rupture de la structure amont - aval des dynamiques d'écoulement, qui semblait se profiler (*i.e.* la diminution progressive de la valeur globale des pentes de l'amont vers l'aval) est observée. En effet, il semblerait même que lorsque la récession est très perturbée (*i.e.* profil 1), la tendance soit inversée (*i.e.* augmentation de la pente de l'amont vers l'aval, tandis qu'elle diminuerait, comme attendu, lorsque la récession n'est pas influencée par les précipitations (*i.e.* profil 3). Pour confirmer ces constats, il est toutefois nécessaire d'étendre l'analyse à l'ensemble des postes de mesure et à l'en-

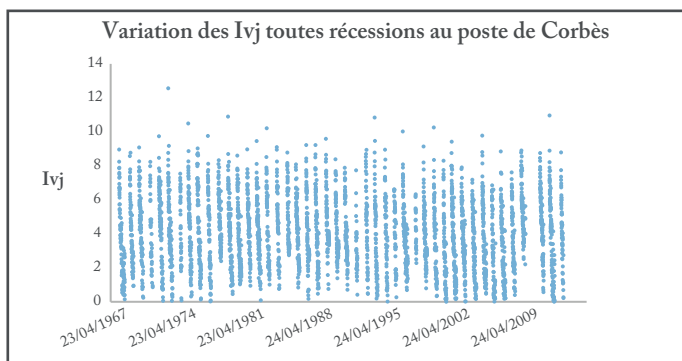
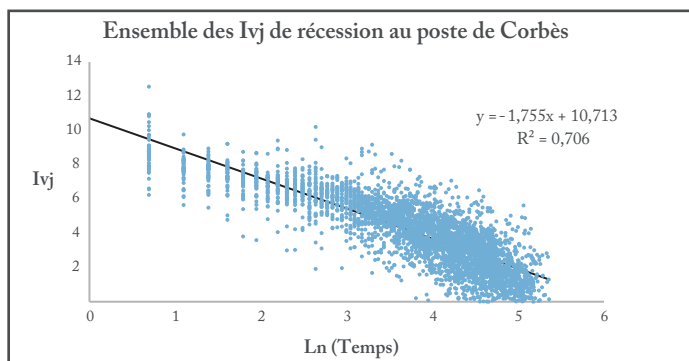
G17.1.1 VARIATION TEMPORELLE DE L'INDICE VOLUMIQUE AU POSTE D'ALÈS



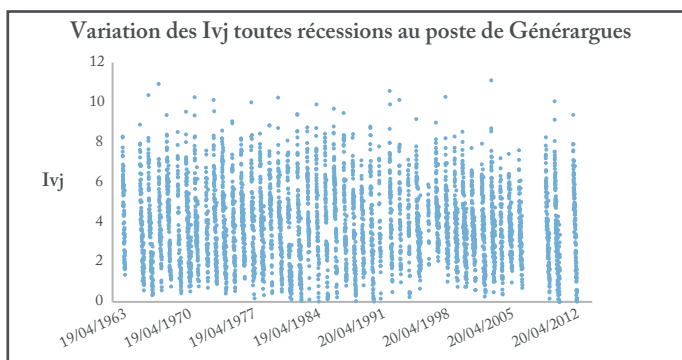
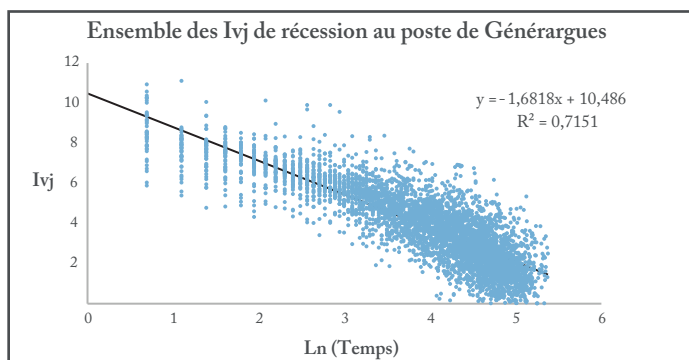
G17.1.2 VARIATION TEMPORELLE DE L'INDICE VOLUMIQUE AUX POSTES DE BOUCOIRAN ET DE NERS



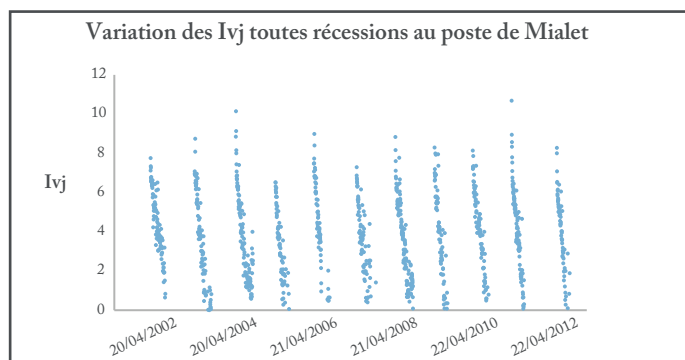
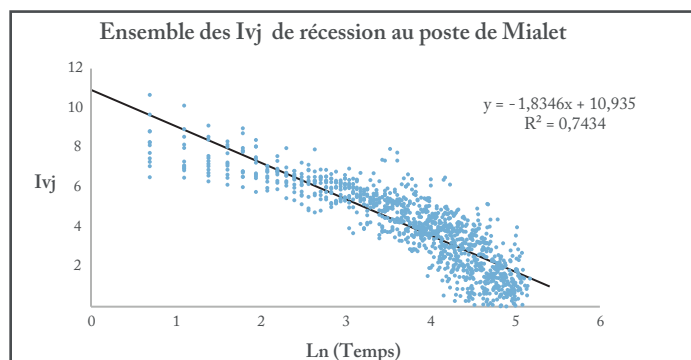
G17.1.3 VARIATION TEMPORELLE DE L'INDICE VOLUMIQUE AU POSTE DE CORBÈS



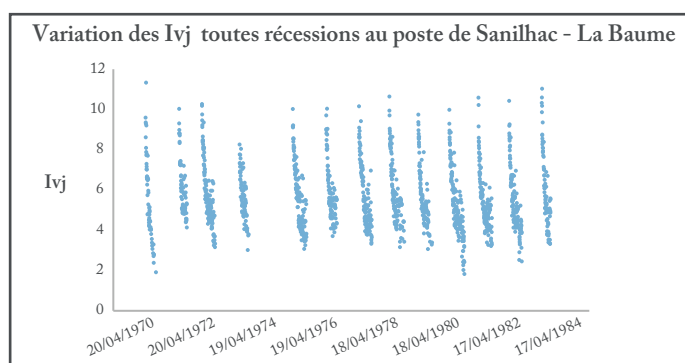
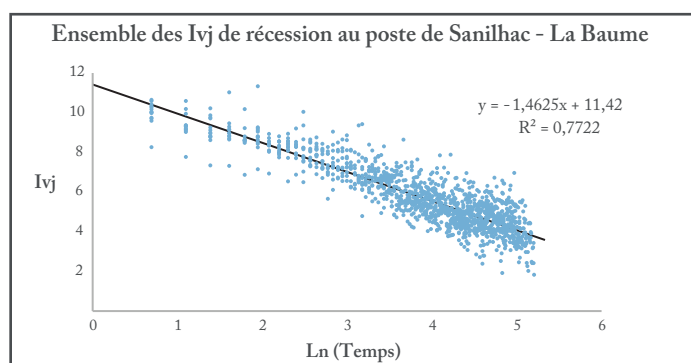
G17.1.4 VARIATION TEMPORELLE DE L'INDICE VOLUMIQUE AU POSTE DE GÉNÉRARGUES



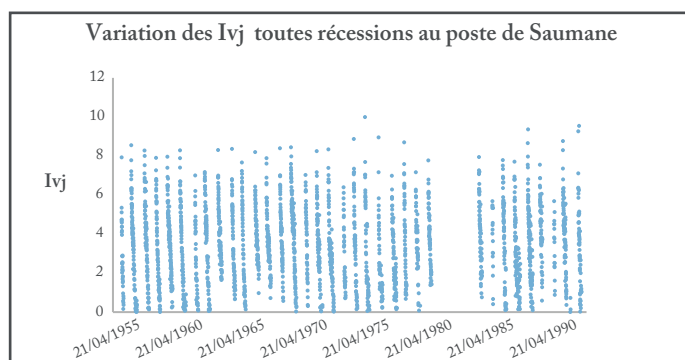
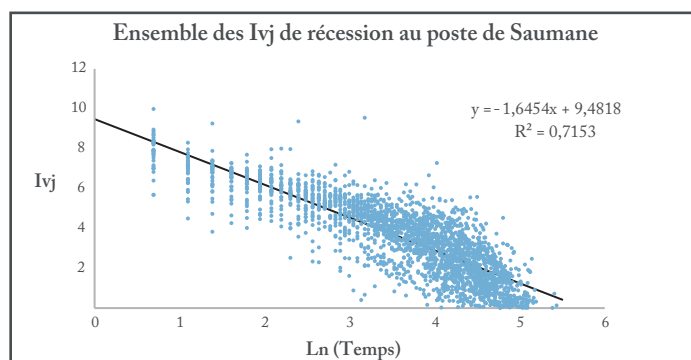
G17.2.1 VARIATION TEMPORELLE DE L'INDICE VOLUMIQUE AU POSTE DE MIALET



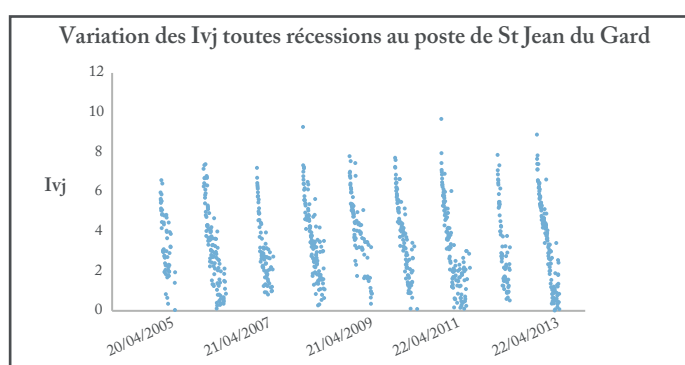
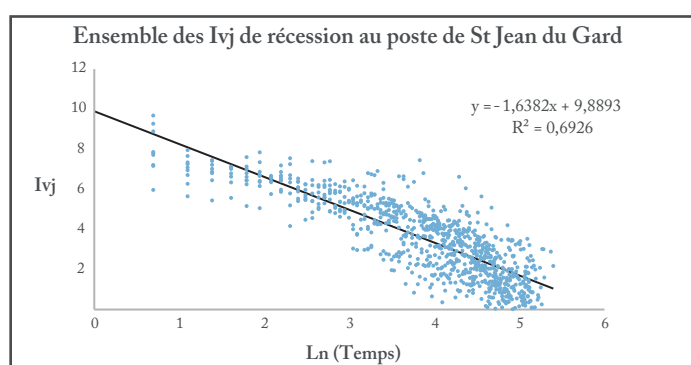
G17.2.2 VARIATION TEMPORELLE DE L'INDICE VOLUMIQUE AU POSTE DE SANILHAC - LA BAUME



G17.2.3 VARIATION TEMPORELLE DE L'INDICE VOLUMIQUE AU POSTE DE SAUMANE



G17.2.4 VARIATION TEMPORELLE DE L'INDICE VOLUMIQUE AU POSTE DE SAINT JEAN DU GARD



semble des années d'enregistrement, puisqu'il est évident que seules quatre années ne peuvent suffire à élaborer des généralités, notamment de nature structurelle.

Sur les profils de récession — Sur les trois points de mesure, donc en amont comme en aval du linéaire Saumane – Ners, une relation identique est constatée entre le profil (*i.e.* le niveau de perturbation) et les minima de fin de récession. Par ailleurs, ces derniers atteignent généralement des valeurs plus faibles lorsque les perturbations sont fréquentes au cours de la récession, et ce, *a priori*, quel que soit leur intensité et le moment de leur manifestation (*i.e.* début, milieu ou fin de période).

Une relation similaire est relevée entre les pentes affichées aux postes de Ners et d'Anduze, lorsque les niveaux de perturbations sont les plus forts. En revanche, cette concordance ne se retrouve pas sur les profils de récession les moins perturbés. La réactivité du cours d'eau en ces points est donc relativement homogène lors des épisodes pluvieux. Néanmoins, la dynamique d'écoulement lors des périodes plus sèches varie d'un point à l'autre, très vraisemblablement parce qu'ils ne bénéficient pas du même soutien par des aquifères.

Au vu de ces premiers éléments, et pour mettre en évidence une structure plus robuste de la dynamique de vidange amont - aval (à la fois interannuelle et globale), il faut nécessairement travailler sur davantage d'années. C'est pourquoi, l'analyse est complétée sur l'ensemble des postes et des années disponibles, et étendue à certains paramètres clés de récession.

6.2.3 Analyse des caractéristiques de récession et des paramètres de loi du modèle de puissance de l'indice : structuration spatiale de l'écoulement superficiel ?

La comparaison de l'allure des courbes des modèles puissance des séries de débit et de l'indice, sur quatre années et sur trois postes de mesure, a conduit à une première validation du modèle de l'indice pour l'analyse des récessions. Il fournit une interprétation relativement conforme de la dynamique d'écoulement et autorise une bonne intégration et représentativité de la contribution des précipitations selon la temporalité de leur manifestation.

De surcroît, il a mis en avant un début de structuration spatiale des tendances globales des pentes (*i.e.* diminution des pentes de l'amont vers l'aval), du moins sur les bassins de tête et jusqu'à Ners. En revanche, les relations demeurent floues entre les dynamiques de vidange interannuelles entre chaque poste. Pour renforcer l'analyse, une étude des informations dérivées du découpage des récessions et du modèle puissance de l'indice volumique journalier est conduite, à l'issue de laquelle, une série d'indicateur sera proposées et un indicateur par temporalité et découpage sera retenu.

6.2.3.1 La durée des récessions

Sur les 20 années présentées à titre d'exemple, les débuts de récession apparaissent très homogènes sur l'ensemble du bassin (tant à l'amont qu'à l'aval), à l'exception des années 2006 et 2012 à

	Saumane	Estréchure	St Jean	Corbès	Mialet	Généragues	Anduze	Alès	Ners	Sanilhac	Remoulins
1970	131	131	-	131	-	131	-	-	-	132	-
1971	95	94	-	95	-	95	95	-	-	167	-
1972	73	73	-	73	-	73	73	167	-	105	-
1973	158	158	-	158	-	158	158	158	-	159	-
1974	95	95	-	95	-	95	95	96	-	96	-
1975	63	64	-	63	-	64	63	64	-	64	-
1976	97	97	-	97	-	97	97	98	-	98	-
1977	125	125	-	125	-	85	125	125	-	125	-
1978	121	121	-	121	-	121	122	122	-	122	-
1979	102	102	-	102	-	102	102	86	-	103	-
1980	107	107	-	107	-	107	-	-	-	108	-
2004	-	-	-	121	121	121	121	-	-	-	-
2005	-	-	116	116	116	116	116	-	-	-	-
2006	-	-	81	81	101	81	-	-	-	-	-
2007	-	-	125	125	125	125	125	125	-	-	-
2008	-	-	111	112	112	-	112	150	112	-	-
2009	-	-	103	-	103	-	103	118	103	-	-
2010	-	-	86	86	86	86	86	86	86	-	-
2011	-	-	76	75	75	73	75	76	76	-	76
2012	-	-	141	141	120	-	141	142	142	-	142

FIGURE 6.8 : LES DATES DE DÉBUT DE RÉCESSION SUR LES 20 ANNÉES LES MIEUX REPRÉSENTÉES

Mialet, pour lesquelles la décroissance s'est initiée, respectivement, plus tardivement et plus précocement. Un début de récession tardif est également observé à Sanilhac en 1971 et à Alès en 1972 (FIGURE 6.8). Ainsi, les apports pluviométriques, qui les conditionnent, exercent une action significativement homogène sur le bassin des Gardons. En effet, bien que la récession ait été définie dans ce travail par le débit maximal atteint entre le 1^{er} mars et le 15 juin (le phénomène est donc daté), un décalage des pics de crue de quelques jours auraient pu être observés entre les sous-bassins amont, ou encore entre l'amont et l'aval du bassin versant. Il semblerait donc que l'évènement pluvieux printanier le plus intense observé chaque année se manifeste presque systématiquement sur l'ensemble du bassin.

En revanche, les dates marquant les fins de récession sont extrêmement disparates, ces dernières n'étant donc plus uniquement conditionnées par les pluies (prélèvements, température, etc. ?), ce qui se traduit par des durées tout aussi hétérogènes (FIGURE 6.9).

Cela étant, et malgré cette variabilité, il est possible de vérifier s'il existe, dans un premier temps, une dynamique interannuelle spatiale cohérente. Etant donné que toutes les séries ne se recoupent pas, les postes sont comparés deux à deux sur l'ensemble de leurs années communes (entre 7 années et 43 années) et l'analyse est menée sur les linéaires (FIGURE 6.10) de Saumane à Remoulins, de Mialet à Remoulins et d'Alès à Remoulins, avant d'être rapportée à l'ensemble des Gardons (ENCADRÉ E18.1).

Les bonnes corrélations traduisent une dynamique interannuelle commune. En d'autres termes, lorsque la variation interannuelle des durées est identique entre les postes et sur les années comparées, cela ne signifie pas que les durées sont proches (même nombre de jours), mais qu'elles augmentent ou diminuent simultanément.

Les meilleures corrélations entre les postes situés sur le linéaire Saumane – Remoulins sont obtenues entre Saint Jean du Gard, Anduze et Ners. Cela suggère une certaine homogénéité des

T18.1.1 CORRÉLATIONS ENTRE LES DURÉES DE RÉCESSION - LINÉAIRE SAUMANE À REMOULINS

	Saumane	Estréchure	St Jean	Corbès	Anduze	Ners	Sanilhac	Remoullins
Saumane		0,16	-	0,15	0,05	-	-0,05	-
Estréchure	0,16		-	0,50	0,33	-	0,52	-
St Jean	-	-		0,55	0,67	-	-	-
Corbès	0,15	0,50	0,55		0,45	0,46	0,46	-
Anduze	0,05	0,33	0,67	0,45		0,88	0,48	-
Ners	-	-	-	0,46	0,88		-	-
Sanilhac	-0,05	0,52	-	0,46	0,48	-		-
Remoullins	-	-	-	-	-	-	-	

T18.1.2 CORRÉLATIONS ENTRE LES DURÉES DE RÉCESSION - LINÉAIRE MIALET À REMOULINS

	Mialet	Générargues	Anduze	Ners	Sanilhac	Remoulins
Mialet		0,65	0,78	0,53	-	-
Générargues	0,65		0,62	0,71	-0,10	-
Anduze	0,78	0,62		0,88	0,48	-
Ners	0,53	0,71	0,88		-	-
Sanilhac	-	-0,10	0,48	-		-
Remoulins	-	-	-	-	-	

T18.1.3 CORRÉLATIONS ENTRE LES DURÉES DE RÉCESSION - LINÉAIRE ALÈS À REMOULINS

	Alès	Ners	Sanilhac	Remoulins
Alès		0,28	0,67	-
Ners	0,28		-	-
Sanilhac	0,67	-		-
Remoulins	-	-	-	

T18.1.4 CORRÉLATIONS ENTRE LES DURÉES DE RÉCESSION - TOUS POSTES

[illegible]

6.2. Le modèle retenu pour la création de l'indicateur d'état du volume superficiel disponible

	Saumane	Estréchure	St Jean	Corbès	Mialet	Généralgues	Anduze	Alès	Ners	Sanilhac	Remoulins
1970	78	149	-	103	-	149	-	-	-	126	-
1971	184	68	-	160	-	216	159	-	-	97	-
1972	163	167	-	165	-	168	153	113	-	159	-
1973	61	97	-	53	-	95	118	104	-	117	-
1974	110	138	-	131	-	136	138	135	-	142	-
1975	134	178	-	146	-	180	183	174	-	166	-
1976	122	130	-	123	-	130	132	128	-	130	-
1977	153	114	-	111	-	154	155	114	-	155	-
1978	77	155	-	173	-	156	194	154	-	181	-
1979	160	162	-	150	-	170	128	168	-	168	-
1980	107	119	-	121	-	119	-	-	-	182	-
2004	-	-	-	150	157	157	62	-	-	-	-
2005	-	-	134	134	133	100	49	-	-	-	-
2006	-	-	176	177	155	144	-	-	-	-	-
2007	-	-	136	130	199	136	133	200	-	-	-
2008	-	-	167	164	167	-	167	132	168	-	-
2009	-	-	178	-	191	-	178	176	179	-	-
2010	-	-	171	140	164	161	180	207	164	-	-
2011	-	-	221	212	223	211	231	113	214	-	220
2012	-	-	96	173	172	-	150	93	100	-	153

FIGURE 6.9 : LES DURÉES DE RÉCESSION SUR LES 20 ANNÉES LES MIEUX REPRÉSENTÉES

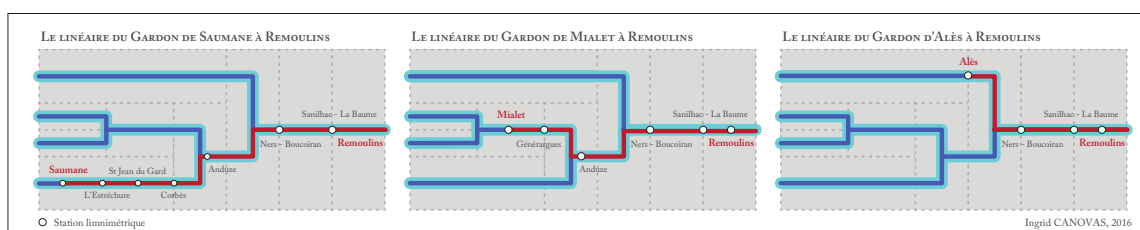


FIGURE 6.10 : REPRÉSENTATION SIMPLIFIÉE DES TROIS PRINCIPAUX LINÉAIRES AMONT DU GARDON

facteurs contribuant à la durée des récessions sur ce linéaire.

Les corrélations obtenues sur le linéaire Mialet – Remoulins sont aussi globalement correctes, notamment entre Mialet, Généralgues et Anduze. Les facteurs contribuant à la durée des récessions sont donc relativement homogènes sur ce linéaire, entre Mialet et Anduze.

Enfin sur le linéaire Alès-Remoulins, seule la corrélation obtenue entre Alès et Sanilhac est correcte. Toutefois, aucune relation ne semble établie entre les durées de récession à Alès et à Ners.

Par ailleurs, de bonnes corrélations sont obtenues entre des postes situés sur différents linéaires, mais situés sur la partie amont du bassin des Gardons : Généralgues et Saint Jean du Gard, l'Estréchure et Alès.

Globalement, les corrélations sont d'autant meilleures que les stations sont proches et sur le même linéaire, ce qui suit une certaine cohérence hydrologique. Les corrélations les plus faibles témoignent quant à elles d'un possible fonctionnement localement spécifique.

Dans un second temps, l'analyse est complétée par la recherche d'une structuration spatiale générale sous-jacente. Pour cela, les valeurs moyennes des durées sont mises en relation, d'abord calculées à partir des années communes poste à poste, puis à partir de la totalité des années disponibles à chaque poste (ENCADRÉ E19.1) Sur les huit années communes, le constat reste assez mitigé, et ne

semble pas étayer l'hypothèse d'une variabilité interannuelle structurée entre l'amont et l'aval. Cela se justifie en partie par le nombre trop faible de valeurs (*i.e.* 8) utilisé pour l'analyse.

En revanche, la mise en relation des moyennes globales (*i.e.* calculées sur l'ensemble des années disponibles par poste) révèle une structure amont - aval plus générale. Cette dernière se traduit par une augmentation des durées moyennes de récession de l'amont vers l'aval, ponctuée localement par une diminution à Gènerargues et Corbès en tête de bassin, et Sanilhac - La Baume dans la partie aval. Les durées les plus longues impliquent que les petites crues sont insuffisantes pour arrêter le cycle (donc la récession). À pluie identique, il faut donc que l'eau précipitée soit stockée dans les aquifères : arènes granitiques à Mialet, formations alluviales à Ners, karst à La Baume, etc. Il faut toutefois rappeler que les moyennes comparées ne sont pas calculées sur les mêmes périodes, ni avec le même nombre d'années (FIGURE 6.2). Il est donc probable que la prise en compte d'années supplémentaires et concordantes puisse renforcer (ou non ?) la structure.

Puisqu'une analyse comparative simple semble déjà pouvoir offrir des conclusions satisfaisantes quant à l'existence ou non d'une dynamique interannuelle et/ ou d'une structuration spatiale cohérente des descripteurs de récession, la démarche est reproduite sur les paramètres issus du modèle puissance de l'indice volumique. Les paramètres susceptibles de décrire l'organisation spatiale de l'écoulement superficiel, et s'avérant les plus pertinents et les plus complets, seront alors envisagés pour l'étude globale des basses eaux, et rattachés à différents niveaux d'observations spatio-temporels. L'objectif, à terme, étant de voir si les états de criticité se structurent ou évoluent suivant une logique spatio-temporelle similaire.

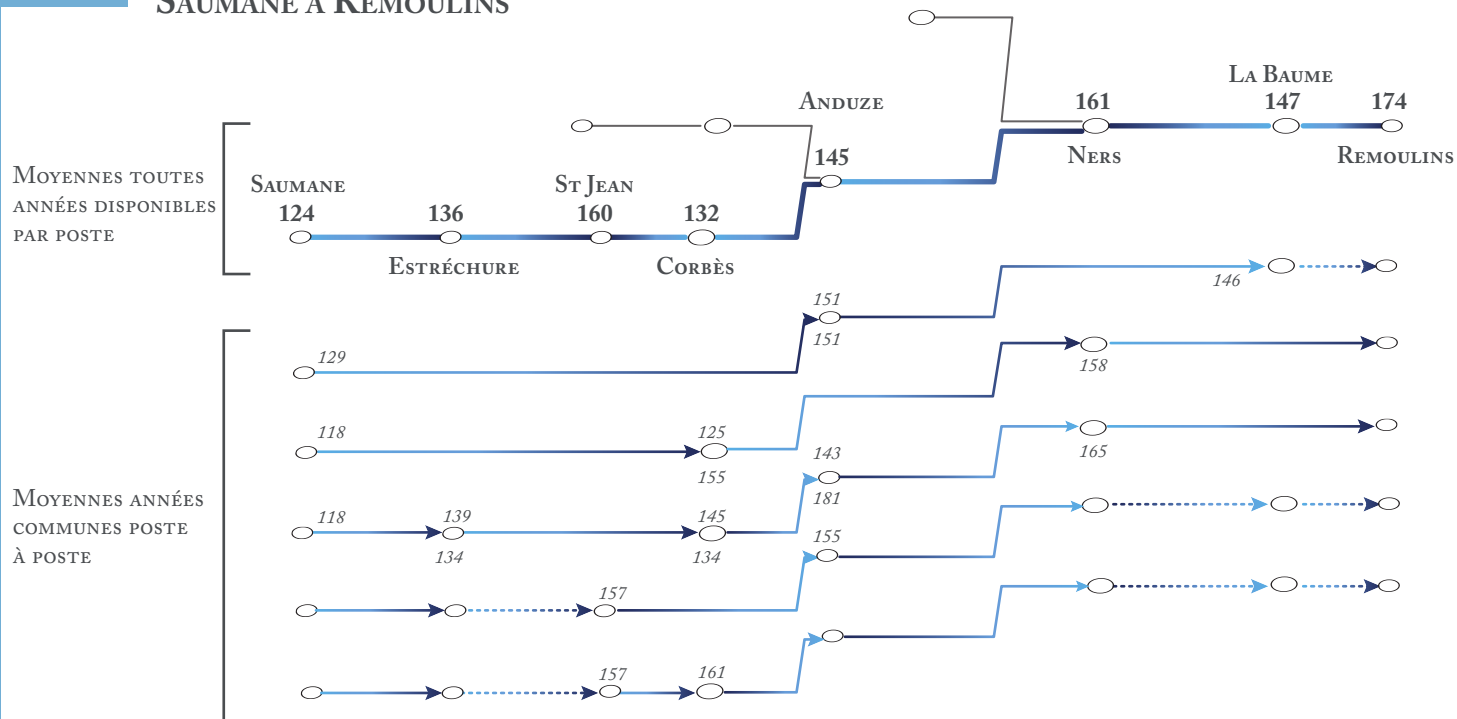
6.2.3.2 La pente du modèle puissance de l'indice volumique journalier

L'analyse comparative est ainsi dupliquée sur les pentes du modèle puissance de l'indice volumique journalier FIGURE 6.11). Leur mise en relation, sur les huit années communes offre quelques corrélations relativement correctes entre certains postes (ENCADRÉ E18.2). Cela ne signifie pas pour autant que les valeurs des pentes sont identiques entre les postes, mais que, pour les années comparées, les dynamiques annuelles d'écoulement sont sensiblement proches (*i.e.* évolution des valeurs des pentes en adéquation).

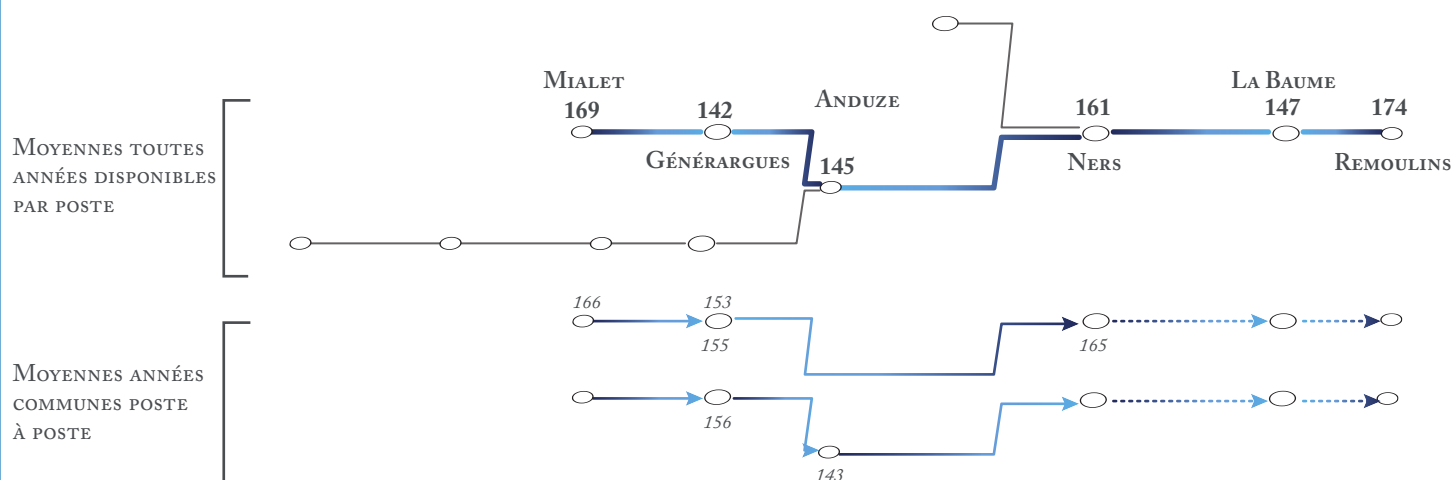
Selon une certaine logique, les dynamiques interannuelles d'écoulement s'apparentent à celles observées lors de l'analyse des durées de récession, la valeur de la pente du modèle étant en partie déterminée par la durée de la période considérée. Ainsi, les meilleures corrélations sont obtenues entre les postes de Saumane, l'Estréchure, Saint Jean du Gard et Anduze, mais également entre Mialet, Gènerargues et Anduze. En revanche, si sur le linéaire Alès-Remoulins les corrélations obtenues ne sont pas concluantes, les dynamiques interannuelles d'écoulement entre Alès et l'ensemble des postes situés sur la partie amont du bassin des Gardons se révèlent très proches.

Par ailleurs, une structuration spatiale sous-jacente de l'écoulement semble se profiler, comme l'atteste la mise en relation des pentes moyennes. Comme pour les durées, ces dernières sont calculées d'abord sur les années communes poste à poste, puis sur l'ensemble des années disponibles à chaque

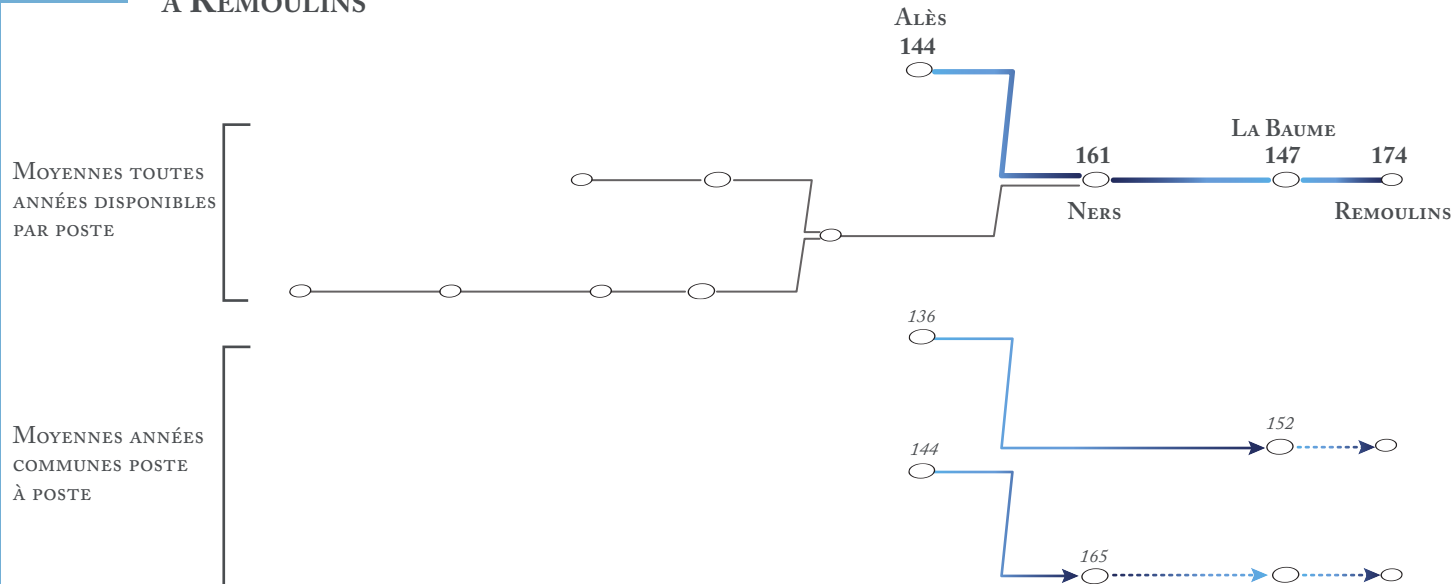
F19.1.1

DYNAMIQUE SPATIALE DES DURÉES MOYENNES DE RÉCESSION DES IVJ - LINÉAIRE DE
SAUMANE À REMOULINS

F19.1.2

DYNAMIQUE SPATIALE DES DURÉES MOYENNES DE RÉCESSION DES IVJ - LINÉAIRE DE
MIALET À REMOULINS

F19.1.3

DYNAMIQUE SPATIALE DES DURÉES MOYENNES DE RÉCESSION DES IVJ - LINÉAIRE D'ALÈS
À REMOULINS

T18.2.1 CORRÉLATIONS ENTRE LES PENTES DE RÉCESSION DES Ivj - LINÉAIRE SAUMANE À REMOULINS

	Saumane	Estréchure	St Jean	Corbès	Anduze	Ners	Sanilhac	Remoulins
Saumane		0,57	-	0,32	0,74	-	0,23	-
Estréchure	0,57		-	0,52	0,83	-	0,51	-
St Jean	-	-		0,52	0,93	0,00	-	-
Corbès	0,32	0,52	0,52		0,55	0,29	-0,05	-
Anduze	0,74	0,83	0,93	0,55		-0,16	0,21	-
Ners	-	-	0,00	0,29	-0,16		-	-
Sanilhac	0,23	0,51	-	-0,05	0,21	-		-
Remoulins	-	-	-	-	-	-	-	

T18.2.2 CORRÉLATIONS ENTRE LES PENTES DE RÉCESSION DES IVj - LINÉAIRE MIALET À REMOULINS

	Mialet	Générargues	Anduze	Ners	Sanilhac	Remoulins
Mialet		0,63	0,61	0,38	-	-
Générargues	0,63		0,62	0,29	0,63	-
Anduze	0,61	0,62		-0,16	0,21	-
Ners	0,38	0,29	-0,16		-	-
Sanilhac	-	0,63	0,21	-		-
Remoulins	-	-	-	-	-	

T18.2.3 CORRÉLATIONS ENTRE LES PENTES DE RÉCESSION DES IVJ - LINÉAIRE ALÈS À REMOULINS

	Alès	Ners	Sanilhac	Remoulins
Alès		-0,09	0,30	-
Ners	-0,09		-	-
Sanilhac	0,30	-		-
Remoulins	-	-	-	

T18.2.4 CORRÉLATIONS ENTRE LES PENTES DE RÉCESSION DES IVj - TOUS POSTES

[illegible]

6.2. Le modèle retenu pour la création de l'indicateur d'état du volume superficiel disponible

	Saumane	Estréchure	St Jean	Corbès	Mialet	Générargues	Anduze	Alès	Ners	Sanilhac	Remoulins
1970	-1,8318	-2,0843	-	-1,8961	-	-1,8666	-	-	-	-2,0758	-
1971	-1,7486	-1,7869	-	-1,8922	-	-1,768	-1,7584	-	-	-1,3631	-
1972	-1,7351	-1,667	-	-2,0522	-	-1,7248	-1,8283	-1,6351	-	-1,6075	-
1973	-1,7582	-1,6962	-	-2,1777	-	-1,3903	-1,7559	-1,6449	-	-0,9597	-
1974	-2,1493	-2,1109	-	-2,0885	-	-1,9539	-2,1305	-1,8951	-	-1,7182	-
1975	-2,194	-1,9615	-	-2,1202	-	-1,883	-2,0336	-1,8648	-	-1,5655	-
1976	-1,6247	-1,8662	-	-2,2148	-	-1,8504	-2,1689	-1,5788	-	-1,3203	-
1977	-1,5535	-1,3449	-	-1,3386	-	-1,519	-1,3084	-1,4411	-	-1,4967	-
1978	-2,368	-1,9279	-	-2,0027	-	-1,9306	-2,4541	-2,3071	-	-1,517	-
1979	-1,4546	-1,7952	-	-1,8196	-	-1,7131	-1,7452	-1,9176	-	-1,4575	-
1980	-1,5441	-1,6964	-	-1,643	-	-1,6525	-	-	-	-1,5597	-
2004	-	-	-	-2,0805	-2,1421	-1,6306	-1,6914	-	-	-	-
2005	-	-	-1,2447	-1,7637	-1,693	-1,433	-0,6729	-	-	-	-
2006	-	-	-1,8499	-1,9493	-1,9949	-1,298	-	-	-	-	-
2007	-	-	-1,5569	-1,755	-1,5985	-1,2577	-0,8409	-1,3508	-	-	-
2008	-	-	-1,633	-1,3799	-1,9556	-	-1,2323	-1,0928	-1,5736	-	-
2009	-	-	-1,4125	-	-2,0642	-	-0,894	-1,5487	-1,69	-	-
2010	-	-	-1,7677	-1,8203	-1,826	-1,7103	-1,1449	-1,5395	-1,9377	-	-
2011	-	-	-1,887	-2,2112	-2,2144	-2,0268	-1,3109	-1,3974	-2,02	-	-1,4717
2012	-	-	-1,9269	-1,959	-1,8527	-	-1,341	-1,6313	-1,3171	-	-0,9575

FIGURE 6.11 : LES PENTES DE RÉCESSION DU MODÈLE DE PUISSANCE DE L'INDICE VOLUMIQUE JOURNALIER SUR LES 20 ANNÉES LES MIEUX REPRÉSENTÉES

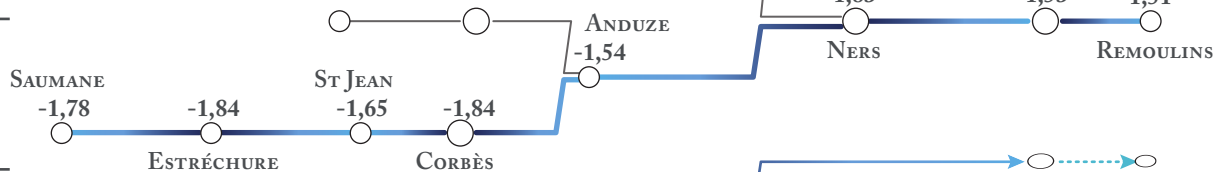
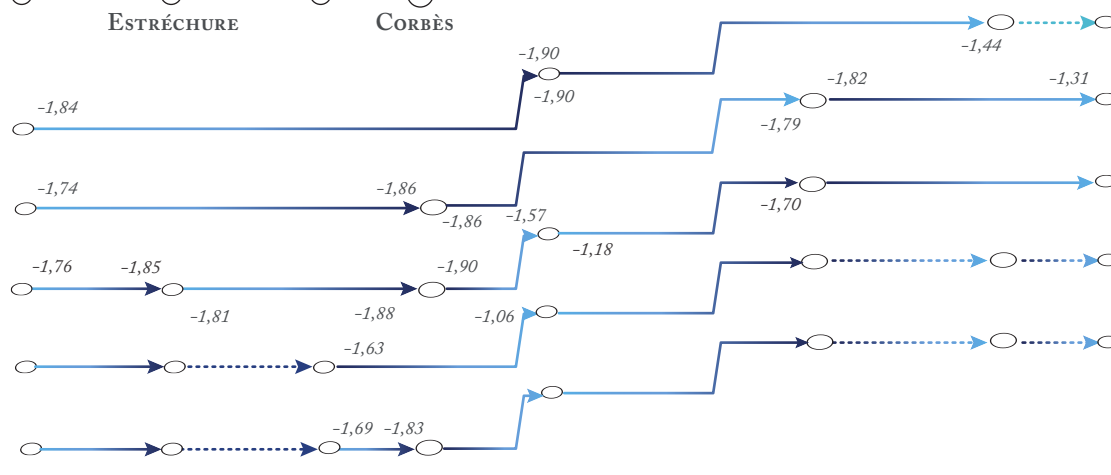
poste (ENCADRÉ E19.2). Il s'en dégage une diminution globale de la valeur moyenne des pentes de l'amont vers aval, marquée par des hausses ponctuelles à des postes intermédiaires.

Dans le détail, sur le linéaire Saumane - Remoulins, une augmentation sur la partie amont suivie d'une diminution sur la partie aval peut être observée, lorsque seuls trois points de mesure, répartis le long des Gardons (*i.e.* Saumane, Anduze et Sanilhac), sont considérés. Bien que les postes situés aux deux extrémités du réseau ne soient pas comparables (leurs séries ne se chevauchent pas), l'ordre de grandeur de la valeur de leur pente est suffisamment différent pour avancer l'hypothèse d'une diminution de la dynamique globale d'écoulement de l'amont vers l'aval. Cela suit une certaine logique hydrologique, déjà confirmée précédemment (voir *infra* 6.2.2), l'amont étant caractérisé par des dynamiques très réactives aux précipitations et ne bénéficiant pas du soutien des réservoirs souterrains, tandis que le phénomène est inverse à l'aval. Toutefois, des nuances sont introduites avec la prise en compte de postes intermédiaires. En effet, en intégrant les postes situés en amont d'Anduze, un décalage du point, à partir duquel s'initierait la diminution progressive des pentes, vers l'amont est observé (à partir de l'Estréchure). De la même manière, une première rupture de la structure se produirait plus en amont, à Corbès.

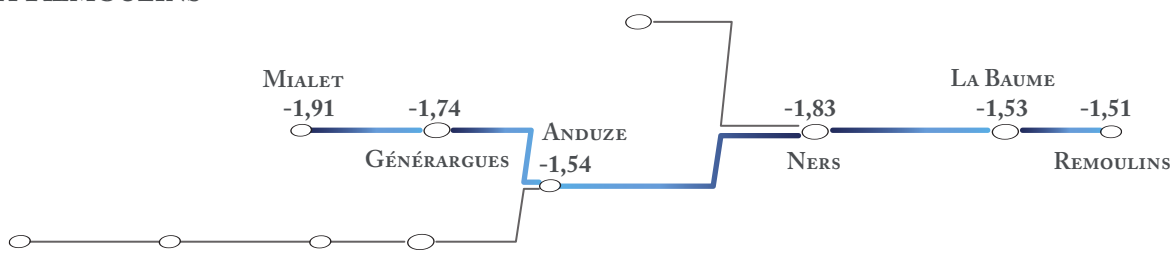
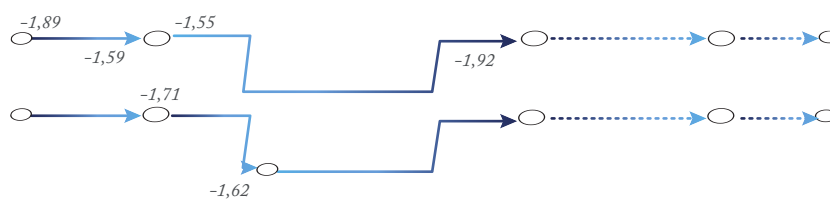
Des observations similaires sont faites sur la partie aval de ce même linéaire. Une diminution continue des valeurs moyennes des pentes est observée entre Anduze et Sanilhac – La Baume et entre Sanilhac – La Baume et Remoulins. Or, à l'ajout du poste de Ners, une nouvelle rupture apparaît, se traduisant par une augmentation de la valeur moyenne de la pente, suivie rapidement d'une diminution jusqu'à Remoulins. Il y aurait donc une diminution globale sur l'ensemble de ce linéaire, entrecoupée de trois augmentations ponctuelles : en amont, à l'Estréchure, et Corbès (avant la confluence des gardons de Saint Jean et de Mialet), et plus à l'aval, au poste de Ners, à la confluence des Gardons d'Anduze et d'Alès (tous les Gardons réunis).

Sur le linéaire de Mialet - Remoulins, la diminution des valeurs moyennes progresse, quant à elle, de manière continue, tandis que sur le linéaire d'Alès - Remoulins, cette dernière est coupée au

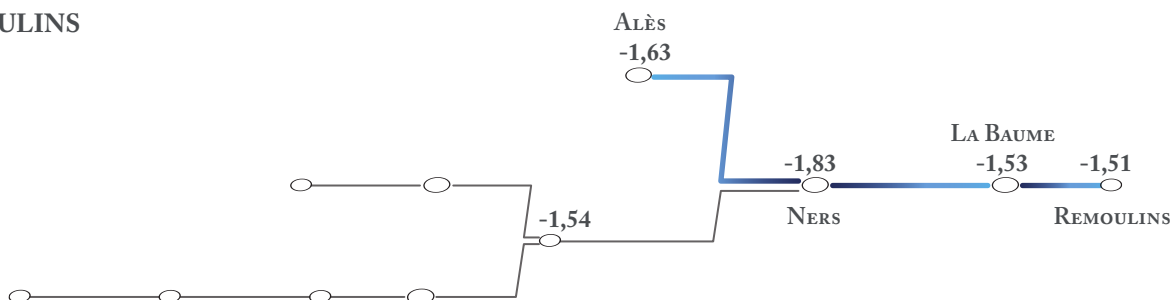
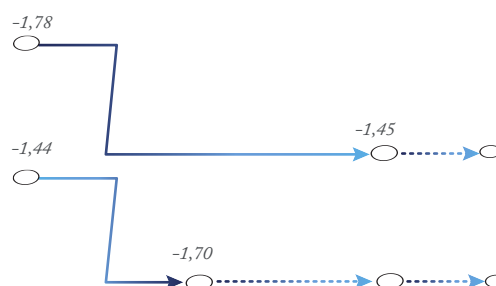
F19.2.1

DYNAMIQUE SPATIALE DES PENTES MOYENNES DE RÉCESSION DES Ivj - LINÉAIRE DE
SAUMANE À REMOULINSMOYENNES TOUTES
ANNÉES DISPONIBLES
PAR POSTEMOYENNES ANNÉES
COMMUNES POSTE
À POSTE

F19.2.2

DYNAMIQUE SPATIALE DES PENTES MOYENNES DE RÉCESSION DES Ivj - LINÉAIRE DE
MIALET À REMOULINSMOYENNES TOUTES
ANNÉES DISPONIBLES
PAR POSTEMOYENNES ANNÉES
COMMUNES POSTE
À POSTE

F19.2.3

DYNAMIQUE SPATIALE DES PENTES MOYENNES DE RÉCESSION DES Ivj - LINÉAIRE D'ALÈS
À REMOULINSMOYENNES TOUTES
ANNÉES DISPONIBLES
PAR POSTEMOYENNES ANNÉES
COMMUNES POSTE
À POSTE

poste de Ners (comme sur le linéaire de Saumane - Remoulins), avant de progresser de nouveau à la baisse jusqu'à Remoulins.

Ces résultats sont également à relativiser puisque les comparaisons sont effectuées sur des années différentes. À titre d'exemple, entre Saumane et l'Estréchure, les moyennes mises en relation sont calculées sur les années comprises entre 1963 et 1980 et sur les années 1984 et 1985 (soit 20 ans); entre Corbès et Générargues, la comparaison porte sur les moyennes calculées sur la période 1967 – 2007 et les années 2010 et 2011 (soit 43 ans); entre Saint Jean du Gard et Anduze sur l'année 2005 et la période 2007 – 2012 (soit 7 ans). Toutefois, la structuration spatiale semble assez bonne, puisqu'elle s'apparente sensiblement à celle constatée à l'issue de la comparaison des valeurs obtenues sur huit années similaires (1972 à 1979), à deux exceptions près. L'intégration d'années supplémentaires dans l'analyse s'avère donc renforcer la structure spatiale de la pente (*i.e.* de la dynamique d'écoulement). La dynamique interannuelle et la structuration globale de ce paramètre sont donc relativement proches de celles observées sur les durées, à ceci près que la tendance globale tendrait vers une diminution des pentes de l'amont vers l'aval, tandis que la durée augmenterait, ce qui aurait un sens à la fois statistique et hydrologique.

En outre, et en disposant de davantage d'années d'enregistrement, sur des périodes comparables (*i.e.* identiques), la pente pourrait constituer un premier indicateur annuel, simple et synthétique, pour rendre compte de l'état de la dynamique d'écoulement des cours d'eau en récession.

6.2.3.3 Les surfaces spécifiques

Une structuration spatiale identique, et beaucoup plus nette, est révélée par les surfaces spécifiques (Martin, ap). Ce descripteur présente l'avantage d'intégrer les principales caractéristiques d'étiage au travers des paramètres de loi du modèle puissance. En effet, dans le modèle puissance de l'indice volumique journalier, la constante (C) est en rapport avec le débit initial (Q_t) de la récession (*i.e.* le débit maximal – pic de crue). À mesure que le temps s'étend vers une valeur plus grande (*i.e.* augmentation de la durée), un triangle rectangle se profile, dont la surface peut être calculée. Celle-ci peut être interprétée comme un volume ou un état d'imbibition.

Ainsi, suivant ce raisonnement, plus la pente du modèle de puissance est faible (*i.e.* vidange lente), plus le moment où elle tendra vers 0 est éloigné dans le temps. Par ailleurs, plus la valeur de la constante est élevée, plus la surface du triangle rectangle défini est grande (*i.e.* état d'imbibition élevé), et inversement. Par conséquent, une pente forte et une constante faible devraient traduire un faible état d'imbibition. Dès lors, la surface pourrait constituer un indicateur unique, intégratif et global, et se substituer aux deux indicateurs du modèle de puissance, que sont la pente et la constante (elles-mêmes intégrant les valeurs de début, de fin et de durée de récession).

Sur ces bases, le calcul de la surface de récession (S_r), comme indicateur de l'état global d'imbibition de l'aquifère, peut être effectué. Dans un triangle rectangle, l'hypoténuse est approximativement

égale à la constante (C) divisée par la pente (P) soit, appliquée aux récessions :

$$(6.4) \quad H_r = \frac{C_r}{P_r}$$

- H_r l'hypoténuse pour une récession donnée
- C_r la constante pour une récession donnée
- P_r la pente pour une récession donnée

Il est ensuite possible de calculer, en utilisant la formule de Pythagore, la valeur du côté opposé, qui correspond à l'axe du temps (t), soit :

$$(6.5) \quad H_r^2 = t_r^2 + C_r^2$$

D'où :

$$(6.6) \quad t_r^2 = H_r^2 - C_r^2$$

Et :

$$(6.7) \quad (t_r^2)^{0,5} = (H_r^2 - C_r^2)^{0,5}$$

Puis en multipliant la longueur du côté opposé par la constante, puis en divisant par deux (($t \times C$)/2 = S), une approximation de la surface du triangle rectangle délimité par l'hypoténuse est obtenue.

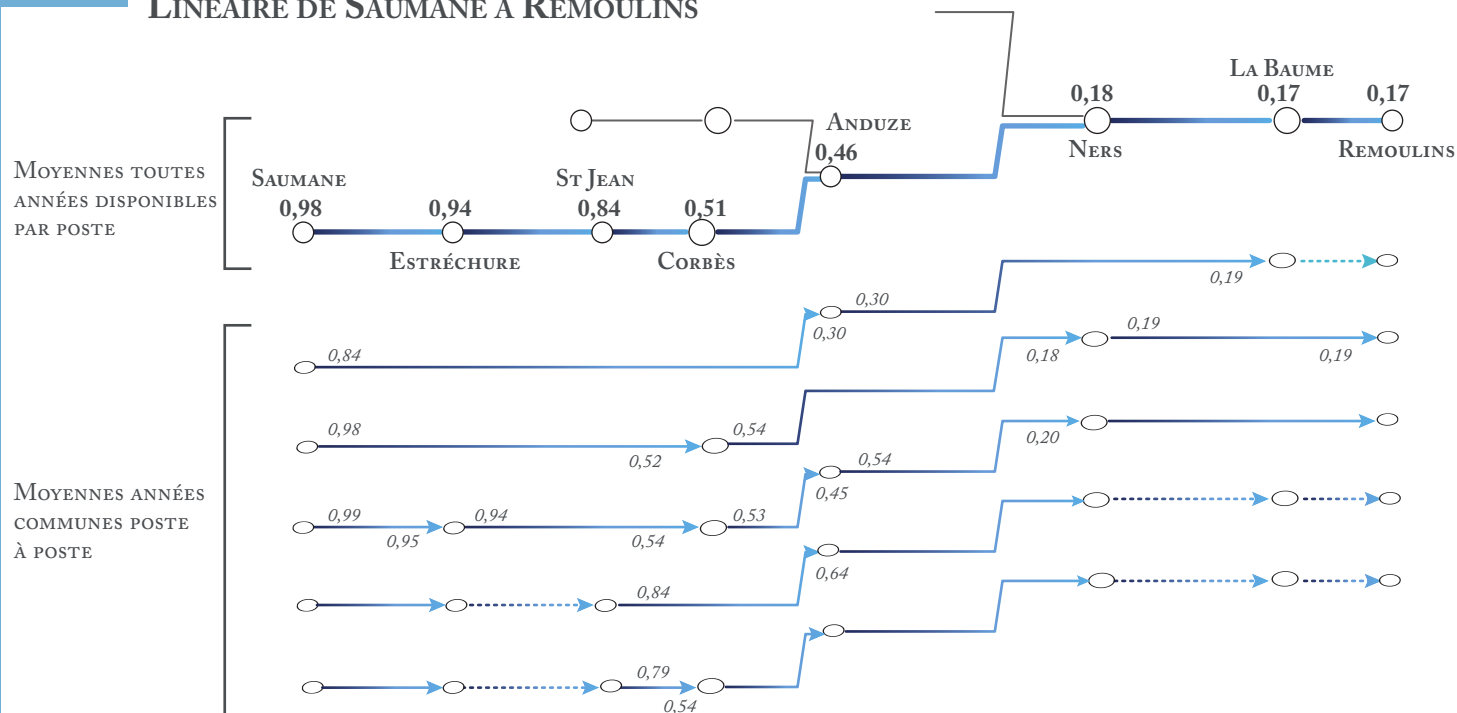
Ainsi, pour une récession donnée, la surface spécifique du triangle rectangle est donnée par :

$$(6.8) \quad S_r = \left(\frac{t_r C_r}{2} \right)$$

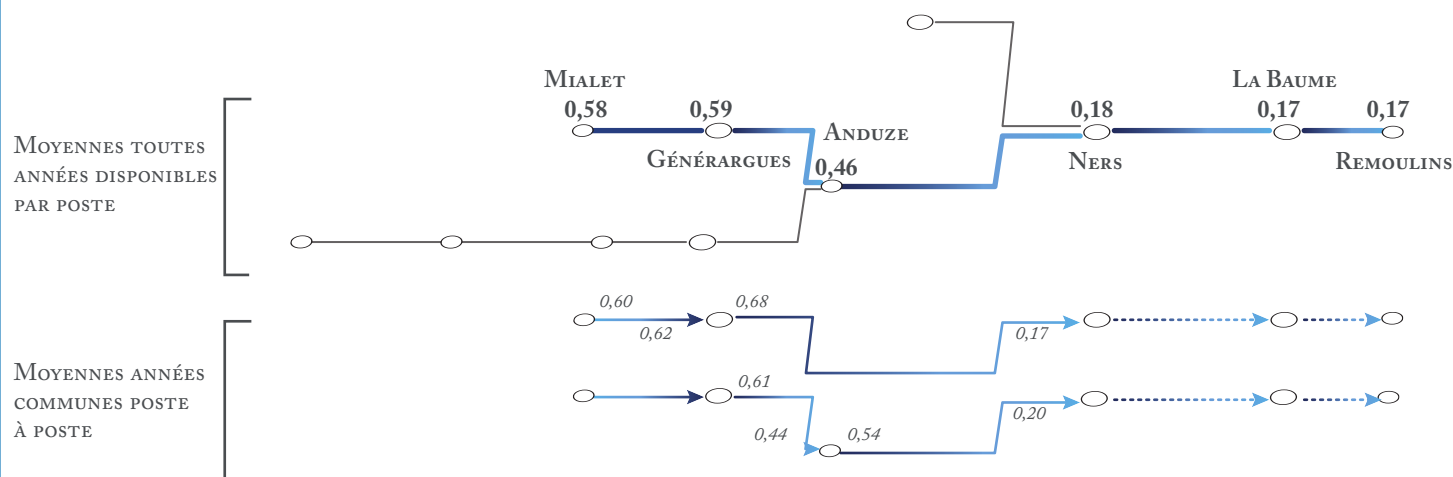
En intégrant, de surcroît, la superficie drainée à chacun des points de mesure, ces derniers deviennent comparables (S_r spécifique, notée SS_r). D'une part, les valeurs obtenues se situeraient alors dans des ordres de grandeurs très proches, contrairement aux valeurs de débits bruts, qui varient d'un poste à l'autre de quelques centaines de l.s^{-1} en amont à des milliers de l.s^{-1} à l'aval. D'autre part, cela permet de rapporter un volume à une unité spatiale identique (*i.e.* le kilomètre, mètre carré) et d'autoriser une comparaison plus juste entre des bassins d'une centaine de kilomètres carrés à des bassins de plus de mille kilomètres carrés.

Ainsi, pour chaque récession enregistrée et à chaque poste, la surface spécifique de récession (*i.e.* le ratio entre la surface du triangle et la superficie drainée au poste considéré) est calculée. Elles sont ensuite moyennées par poste, sur des années similaires, puis sur la totalité des années enregistrées. L'analyse des valeurs obtenues, aussi bien sur les années communes que sur l'ensemble

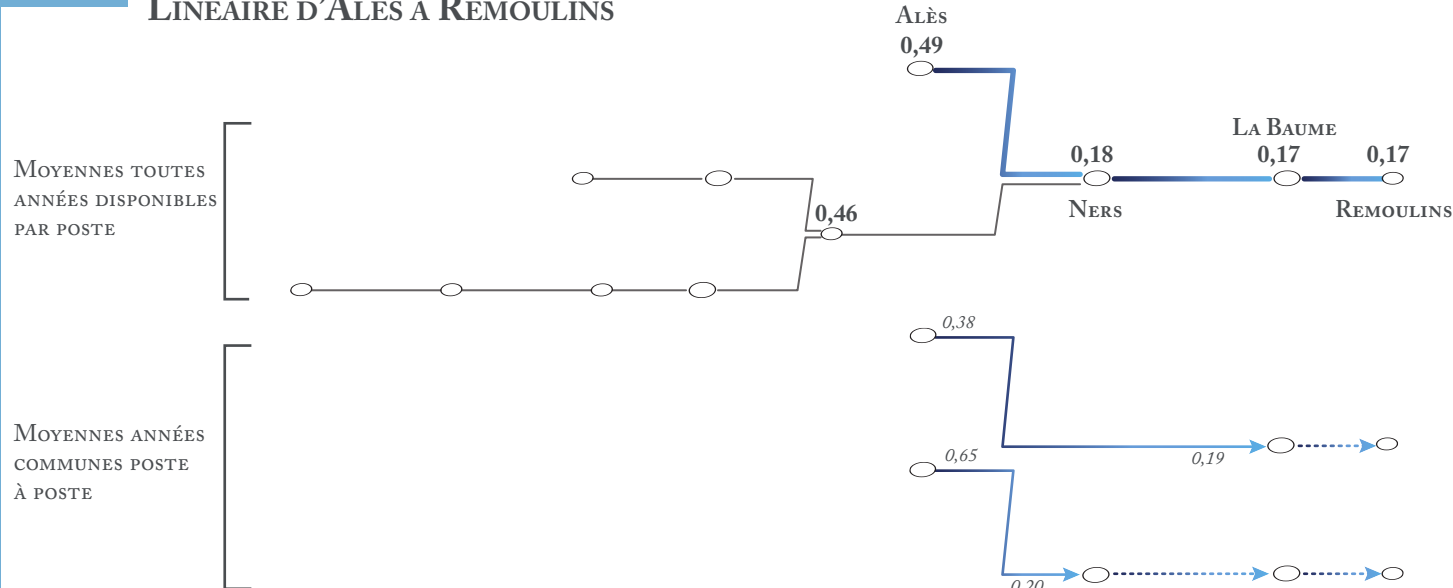
F19.3.1

DYNAMIQUE SPATIALE DES SURFACES SPÉCIFIQUES MOYENNES DE RÉCESSION DES Ivj -
LINÉAIRE DE SAUMANE À REMOULINS

F19.3.2

DYNAMIQUE SPATIALE DES SURFACES SPÉCIFIQUES MOYENNES DE RÉCESSION DES Ivj -
LINÉAIRE DE MIALET À REMOULINS

F19.3.3

DYNAMIQUE SPATIALE DES SURFACES SPÉCIFIQUES MOYENNES DE RÉCESSION DES Ivj -
LINÉAIRE D'ALÈS À REMOULINS

Paramètre	AMONT								AVAL		
	Saumane	Estréchure	St Jean	Mialet	Corbès	Généralgues	Anduze	Alès	Ners	Sanilhac	Remoulins
Distance à l'exutoire (km)	115,6	108,8	97,8	95,2	87,1	86,5	84	82,1	64,2	28,2	15,07
Durée moyenne	124	136	160	169	132	142	145	144	161	147	174
Pente moyenne	-1,79	-1,85	-1,66	-1,91	-1,85	-1,74	-1,55	-1,63	-1,83	-1,53	-1,51
Surface Spécifique moyenne	0,98	0,95	0,84	0,59	0,51	0,60	0,46	0,49	0,18	0,18	0,17
Nombre total d'années	36 années	23 années	8 années	12 années	45 années	46 années	19 années	14 années	11 années	14 années	3 années

Partie amont du linéaire Saumane - Remoulins / Partie amont du linéaire Mialet - Remoulins / Partie amont du linéaire Alès - Remoulins

FIGURE 6.12 : COMPARAISON ENTRE LES VALEURS MOYENNES DES PARAMÈTRES DE RÉCESSION ET LA DISTANCE DES POSTES À L'EXUTOIRE

des années disponibles par poste, montre une diminution progressive quasi-continue des valeurs moyennes depuis l'amont vers l'aval, à l'exception de Généralgues, poste auquel la valeur augmente, de manière très peu significative cependant (ENCADRÉ E19.3).

La structure spatiale de la dynamique globale révélée semble plus cohérente avec la réalité hydrologique. Comme pour l'analyse des paramètres précédents, et bien que la structuration spatiale observée sur les deux comparaisons semble analogue, les observations sont toutefois à prendre avec précaution, les moyennes globales n'étant pas effectuées sur les mêmes périodes ni avec le même nombre d'années sur chacun des postes.

Au vu de ces quelques éléments, la surface spécifique constituerait un bon indicateur, à la fois bien structuré dans l'espace et plus complet, qui pourrait se substituer à la seule pente du modèle de puissance, comme indice annuel de récession.

6.2.3.4 La distance à l'exutoire

Pour compléter et terminer l'analyse structurelle et spatiale des potentiels descripteurs de récession (dérivés des indices volumiques journaliers), ces derniers sont mis en relation avec la distance des postes par rapport à l'exutoire du bassin (FIGURE 6.12). Pour cela, ils sont au préalable moyennés sur l'ensemble des récessions disponibles par poste.

Une bonne cohérence amont - aval est à nouveau constatée avec, dans l'ensemble, des nuances analogues à celles mises en lumière au cours des analyses précédentes, tant sur les huit années communes que sur la comparaison poste à poste (toutes années disponibles). Il semblerait, par ailleurs, y avoir une double organisation de la structure spatiale des paramètres : une structuration amont et aval, et une structuration à l'amont, différenciée sur chacun des sous-bassins (Saumane - Ners, Mialet - Ners et Alès - Ners). Cette dernière étant très certainement conditionnée par la différence de géologie et de morphologie des trois bassins amont, mais aussi très certainement par des facteurs anthropiques (*e.g.* usages de l'eau, occupation des sols) et la nature des réservoirs souterrains présents, le cas échéant (voir CHAPITRE 7).

Conclusion — L'analyse de l'indice volumique journalier a montré sa pertinence pour représenter la dynamique d'écoulement en récession, notamment parce qu'il semble bien intégrer les perturba-

tions tout en suivant la même dynamique que celle observée sur les courbes de débits. Par ailleurs, l'analyse des paramètres issus du modèle puissance, qui caractérise leur dynamique en récession, a révélé leur capacité à représenter de manière synthétique et satisfaisante la dynamique hydrologique, et à mettre en exergue une logique – structure spatiale cohérente avec la réalité.

Ainsi, toute une série d'indicateurs potentiellement intéressants, plus ou moins globaux, plus ou moins complets, a été mise en avant. Parmi ces derniers, seront retenus l'indice volumique journalier, pour une approche journalière, et l'indice de surface spécifique, plus complet et donc plus synthétique et beaucoup plus robuste (structuration spatiale plus claire) pourrait être pensé pour une analyse annuelle.

L'objectif sera alors de constater si les états de criticités définis suivent une cohérence hydrologique et une structuration spatiale identiques à celles mises en lumière par les indicateurs (l'amont plus susceptible de présenter des états plus critiques que l'aval, par exemple). Si tel n'est pas le cas, il faudra s'intéresser aux facteurs déterminants (*e.g.* pluie, prélèvement) et préciser s'ils ont bien une influence plus locale.

6.3 Structure statistique de l'indicateur retenu et détermination des seuils de criticité

Les indicateurs de l'état du volume disponible en surface (du modèle basses eaux théorique) étant choisis, pour les approches journalière et annuelle, il faut désormais en déterminer les seuils de criticité. Pour cela, il est nécessaire, au préalable, d'identifier la loi statistique qui structure la distribution des valeurs journalières de l'indicateur, le cas échéant. La démarche générale, qui s'applique aux deux indicateurs, est ici illustrée sur l'indicateur journalier (*i.e.* l'indice volumique journalier).

6.3.1 Détermination de la loi statistique pour l'ajustement de la distribution de l'indicateur

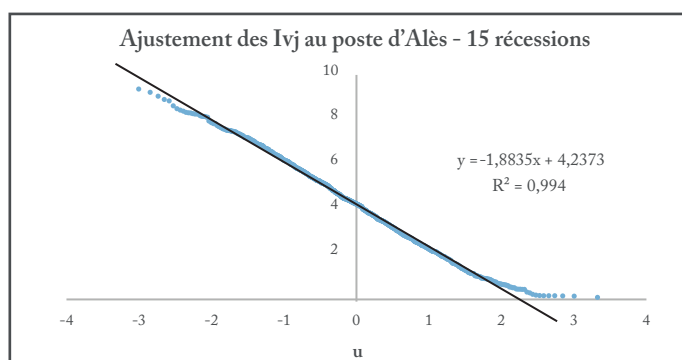
Pour caractériser la distribution, une analyse graphique simple, représentant les effectifs par classe des valeurs de l'indicateur de l'ensemble des récessions, peut être réalisée (FIGURE 6.13).

À première vue, la distribution des valeurs de l'indice volumique journalier des 19 récessions enregistrées au poste d'Anduze est gaussienne. Les valeurs les plus faibles correspondent aux fins de récessions et les plus fortes au début de récessions ou aux pics de crue durant les récessions. Étant donné que le travail porte essentiellement sur des phases de décroissance, et que, par conséquent, seuls les pics de crue printaniers sont pris en compte, il semble normal de constater que les maxima sont moins représentés que les minima.

L'ensemble des indices volumiques journaliers, calculés pour chaque récession, est ensuite classé par ordre décroissant et ajustés à la loi normale, matérialisée par la droite de Henri sur les graphiques (ENCADRÉS E20.1 et E20.2).

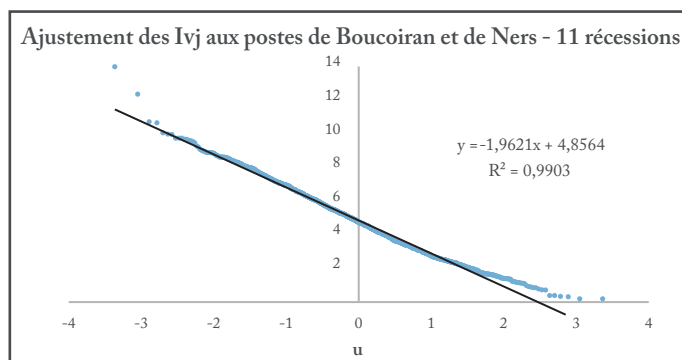
G20.1.1 AJUSTEMENT STATISTIQUE AU POSTE D'ALÈS - V7155010

Rang	Fréquence	Ivj_Récession	u
1	0,00044444	10,1997423	-3,3235205
2	0,00133333	9,37865426	-3,00375877
3	0,00222222	9,22518192	-2,84476324
⋮	⋮	⋮	⋮
1123	0,99777778	0,1518814	2,84476324
1124	0,99866667	0,1397136	3,00375877
1125	0,99955556	0,08699988	3,3235205



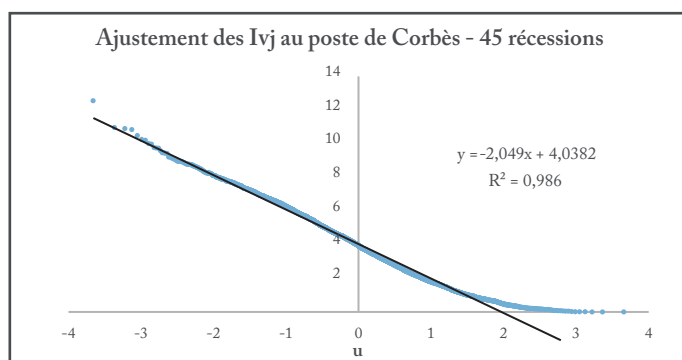
G20.1.2 AJUSTEMENT STATISTIQUE AUX POSTES DE BOUCOIRAN ET DE NERS - V7164010 ET V7164015

Rang	Fréquence	Ivj_Récession	u
1	0,00038432	13,9983968	-3,36384769
2	0,00115296	12,3633997	-3,04771064
3	0,0019216	10,7210623	-2,89075324
⋮	⋮	⋮	⋮
1299	0,9980784	0,32567604	2,89075324
1300	0,99884704	0,20543051	3,04771064
1301	0,99961568	0,19726703	3,36384769



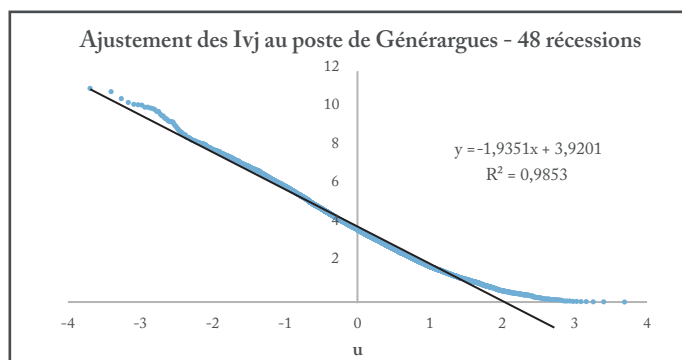
G20.1.3 AJUSTEMENT STATISTIQUE AU POSTE DE CORBÈS - V7135010

Rang	Fréquence	Ivj_Récession	u
1	0,000126839	12,5622339	-3,65851759
2	0,000380518	10,9592809	-3,36659088
3	0,000634196	10,8990484	-3,223037
⋮	⋮	⋮	⋮
3940	0,999365804	0,00875175	3,223037
3941	0,999619482	0,00559722	3,36659088
3942	0,999873161	0,0009774	3,65851759



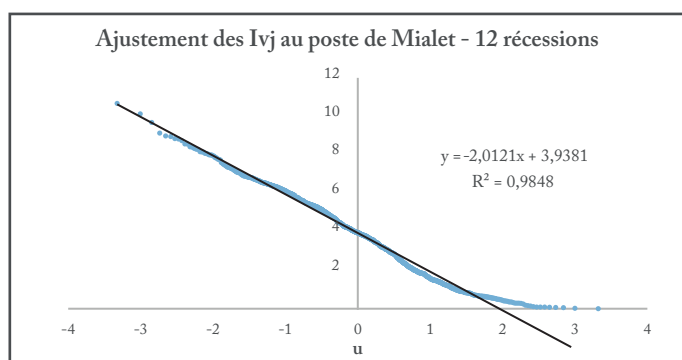
G20.1.4 AJUSTEMENT STATISTIQUE AU POSTE DE GÉNÉRARGUES - V7135010

Rang	Fréquence	Ivj_Récession	u
1	0,000111707	11,1092696	-3,69095489
2	0,000335121	10,9358855	-3,40147145
3	0,000558534	10,5769404	-3,25925077
⋮	⋮	⋮	⋮
4474	0,999441466	0,0107311	3,25925077
4475	0,999664879	0,00886737	3,40147145
4476	0,999888293	0,00258868	3,69095489



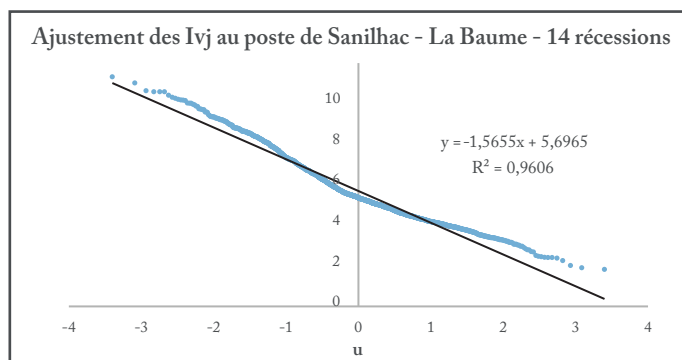
G20.2.1 AJUSTEMENT STATISTIQUE AU POSTE DE MIALET - V7124015

Rang	Fréquence	Ivj_Récession	u
1	0,000446429	10,6744755	-3,32227792
2	0,001339286	10,1365695	-3,0024032
3	0,002232143	9,68107479	-2,843344
⋮	⋮	⋮	⋮
1118	0,997767857	0,05037041	2,843344
1119	0,998660714	0,01824528	3,0024032
1120	0,999553571	0,00480385	3,32227792



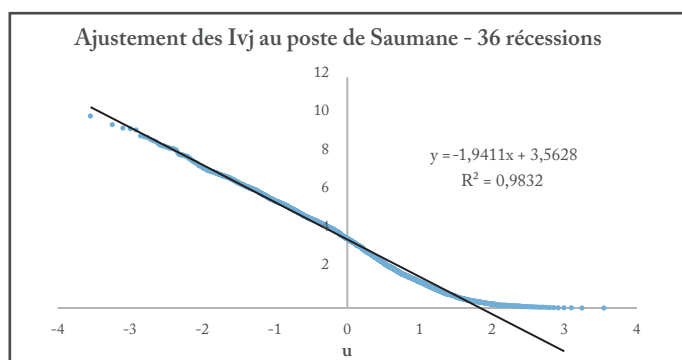
G20.2.2 AJUSTEMENT STATISTIQUE AU POSTE DE SANILHAC - LA BAUME - V7184010

Rang	Fréquence	Ivj_Récession	u
1	0,000338066	11,329193	-3,39907872
2	0,001014199	11,0273443	-3,0860426
3	0,001690331	10,6447187	-2,93082215
⋮	⋮	⋮	⋮
1477	0,998309669	2,0234615	2,93082215
1478	0,998985801	1,91485854	3,0860426
1479	0,999661934	1,82657016	3,39907872



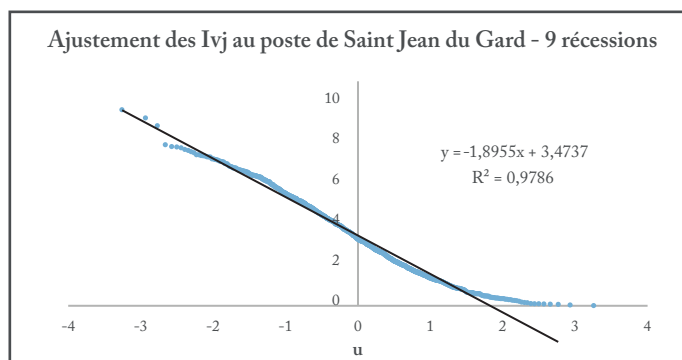
G20.2.3 AJUSTEMENT STATISTIQUE AU POSTE DE SAUMANE - V7135030

Rang	Fréquence	Ivj_Récession	u
1	0,000196464	9,98803404	-3,54478912
2	0,000589391	9,53939897	-3,24396509
3	0,000982318	9,35704673	-3,09552674
⋮	⋮	⋮	⋮
2543	0,999017682	0,00827478	3,09552674
2544	0,999410609	0,00498288	3,24396509
2545	0,999803536	0,00173234	3,54478912



G20.2.4 AJUSTEMENT STATISTIQUE AU POSTE DE SAINT JEAN DU GARD - V7135017

Rang	Fréquence	Ivj_Récession	u
1	0,00056243	9,67667155	-3,25727868
2	0,001687289	9,27039644	-2,93138174
3	0,002812148	8,88513734	-2,76891695
⋮	⋮	⋮	⋮
887	0,997187852	0,07899826	2,76891695
888	0,998312711	0,04223851	2,93138174
889	0,99943757	0,01533766	3,25727868



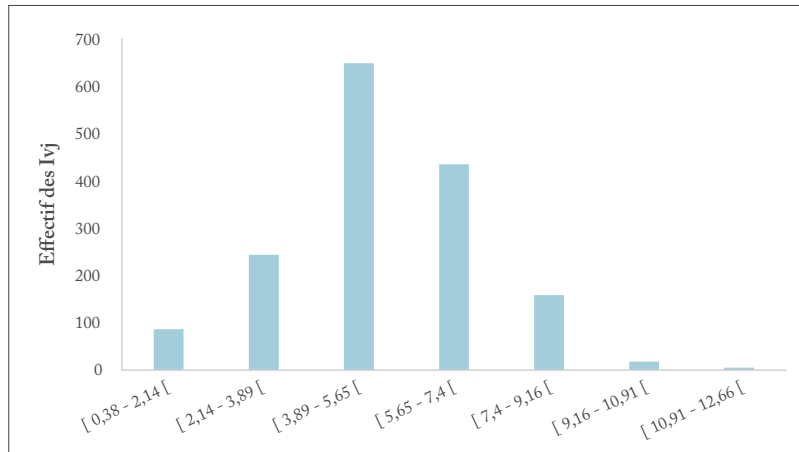


FIGURE 6.13 : EFFECTIF PAR CLASSE DES IVJ AU POSTE D'ANDUZE – 19 RÉCESSIONS

Pour Sanilhac – La Baume, poste situé le plus en aval (Le poste de Remoulins n'ayant que trois années d'enregistrements, les résultats s'y référant ne sont pas présentés ici), les valeurs les plus faibles sont relativement élevées (proches de 2), donc pente relativement faible. Au poste de Ners – Boucoiran, situé un peu plus en amont, les valeurs minimales sont plus faibles, et s'approchent de zéro, ce qui se traduit par une pente légèrement plus forte, et une fin de la série qui commence à devenir horizontale. À Saumane, les valeurs de l'indice les plus faibles, proches de zéro, sont bien plus représentées et s'écartent davantage encore de la droite.

Ainsi, plus l'observation progresse vers l'amont, plus les pentes augmentent, et plus les valeurs minimales extrêmes (*i.e.* indices faibles) sont nombreuses, et s'écartent de la droite du modèle, de sorte à constituer une série presque horizontale. Ces tendances extrêmes dans le sec sont nettement moins marquées, voir quasi inexistantes (à quelques années près) dans la série d'extrêmes humides. C'est la traduction de ce qui est observé sur le graphique précédent, sur lequel les classes des valeurs faibles sont mieux représentées que celle des valeurs les plus fortes. Des résultats différents ou une répartition plus équilibrée sera peut-être observable sur l'analyse des cycles, qui tiennent compte de toutes les crues (voir CHAPITRE 9).

Cela étant, cela suit de toute évidence la logique structurelle spatiale établie plus tôt : les postes affichant des effectifs de classe des valeurs les plus faibles correspondant aux postes situés sur les sous-bassins les plus réactifs et sans soutien d'étiage. Il faudra donc nécessairement analyser aussi la structure des dynamiques de vidange des réservoirs souterrains (voir CHAPITRE 7) pour comparer et vérifier que cela corrobore ces hypothèses.

6.3.2 Discrétisation des états de criticité

À partir des ajustements obtenus, des seuils peuvent être établis à partir de la variable centrée réduite u , qui correspond aux écarts-types. Les seuils sont donc prédéfinis statistiquement, sans besoin de recourir au préalable à un choix arbitraire ou à une évaluation d'expert. Le problème qui se pose

Etats de criticité	Intervalles (σ) - Seuils 1	Effectif - Seuils 1	Intervalles (σ) - Seuils 2	Effectif - Seuils 2
Etat humide	[-4 ; -1 [	8	[-4 ; -0,5 [	13
Etat moyen	[-1 ; 0 [	18	[-0,5 ; 0,5 [	34
Etat sub-critique	[0 ; 1 [	36	[0,5 ; 1,5 [	25
Etat critique	[1 ; 2 [	18	[1,5 ; 2,5 [	10
Etat super-critique	[2 ; 3 [	3	[2,5 ; 3,5 [	0
Etat exceptionnel	[3 ; 4]	0	[3,5 ; 4]	0

FIGURE 6.14 : RÉPARTITION DES VALEURS JOURNALIÈRES DE L'INDICATEUR DANS LES ÉTATS DE CRITICITÉ SELON LES CLASSES DE SEUILS - EXEMPLE AU POSTE D'ANDUZE - RÉCESSION 2012

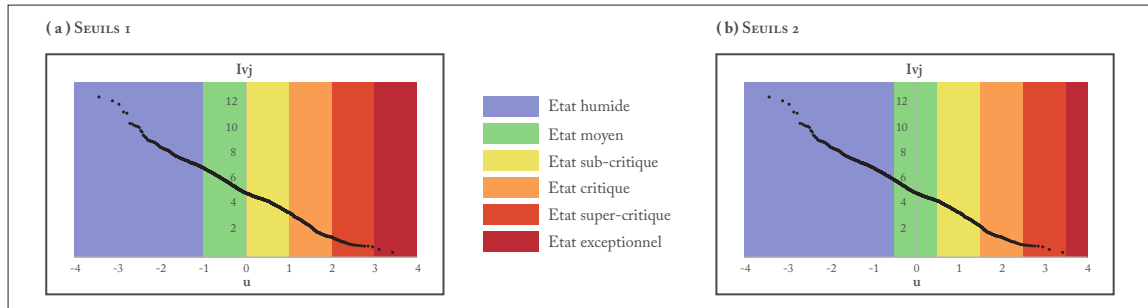


FIGURE 6.15 : RÉPARTITION DES VALEURS JOURNALIÈRES DE L'INDICATEUR DANS LES ÉTATS DE CRITICITÉ SELON LES CLASSES DE SEUILS - EXEMPLE AU POSTE D'ANDUZE - 19 RÉCESSIONS

cependant est relatif au choix des classes d'état à associer à chaque seuil, qui conditionne la répartition des valeurs (notamment les plus extrêmes dans le sec) dans les classes critiques (FIGURE 6.14).

En effet, comme l'illustre l'année 2012 prise en exemple au poste d'Anduze, en considérant des seuils définis tous les écarts-types à partir d'un état moyen compris entre -1 et 0 (cf. Intervalles de seuils 1), une surreprésentation des états critiques est constatée.

À l'inverse, lorsque l'état moyen est compris entre -0.5 et 0.5 (cf. Intervalles de seuils 2), une surreprésentation des états normal et humide apparaît. De la même manière, lorsque le premier découpage est considéré, trois valeurs se retrouvent dans l'état super-critique. Par contre, ces valeurs n'apparaissent plus dans cette classe lorsque les seuils sont définis selon le second.

Au vu de ces éléments, le premier découpage (cf. Intervalles de seuils 1) sera retenu pour la synthèse cartographique (voir CHAPITRE 9) de l'analyse. En effet, même s'il semble curieux que sur 19 récessions seulement, un état exceptionnel puisse déjà avoir été observé deux fois à Anduze (FIGURE 6.15), il pourrait en revanche ne jamais être atteint avec le second découpage des seuils (cf. Intervalles de seuils 2).

Conclusion — L'indice volumique journalier présente une structure statistique gaussienne qui, d'une part, répond aux exigences de la méthode (approche probabiliste), et permet, par ailleurs de révéler une structuration cohérente de la dynamique de l'amont vers l'aval : une pente moins marquée tandis que l'écoulement progresse de l'amont vers l'aval. Cela traduit correctement le déséqui-

libre existant en les bassins très réactifs à l'amont et susceptibles de s'assécher plus rapidement et plus sévèrement, et les bassins situés à l'aval, caractérisés par des débits plus importants, sans doute soutenus par des aquifères plus inertiels.

Cette structure statistique a autorisé la définition de seuils, fixés par l'écart-type. Tout en conservant un intervalle correspondant à un sigma (σ), il s'agit d'attribuer à chacun des états de criticité des bornes de classes : faut-il considérer un état humide comme étant l'ensemble des valeurs de l'indice inférieures à 0, -1σ , -2σ ? À partir de quel écart à la moyenne, un état est-il à considérer comme critique, ou encore exceptionnel ? Etc.

Pour être en mesure d'observer des situations très sévères, et parce que la démarche reste exploratoire, des seuils simples et peu discriminants sont ici retenus. L'état exceptionnel comprend les valeurs supérieures à 3 écarts-types, seuil à partir duquel la progression dans les états moins critiques s'opère à chaque écart-type inférieur. Ces seuils sont donc, dans un premier temps, choisis *a priori*, et seront sans doute amenés à évoluer (ajustements possibles).

6.4 Le Chrono-kindénogramme ou l'évolution temporelle de l'état de criticité de l'indicateur

À partir des seuils établis, une analyse chronologique des niveaux de criticité de l'indice volumique journalier par poste peut être réalisée graphiquement par le biais du chrono-kindénogramme (de *kindunos*, le danger) (ENCADRÉ E21). Cet outil graphique a en effet été conçu pour représenter l'évolution de l'état de criticité pris par l'indicateur, et à terme de l'état global du système, à des pas de temps variables (*e.g.* journalier, mensuel, annuel). De conception simple, il autorise une analyse intuitive de la situation, et les périodes les plus problématiques peuvent être identifiées d'un simple coup d'œil, selon les deux seuils proposés précédemment, comme l'illustre l'exemple pris au poste d'Anduze.

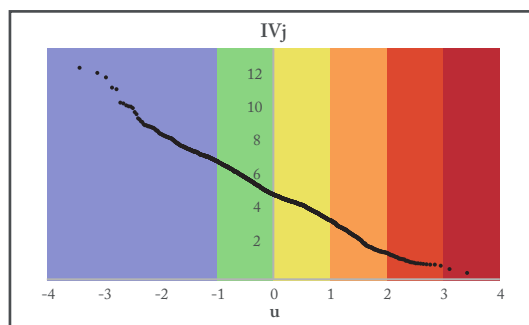
Pour l'année 1977, davantage de valeurs de fin de récession apparaissent en état critique et super-critique. L'état exceptionnel est par ailleurs presque atteint pour les intervalles de seuils 1 (*i.e.* les seuils retenus par la suite). La situation est globalement plus confortable selon l'évaluation faite par le biais des seuils 2, avec un maximum de valeurs dans les états humide et normal, et des situations de fin de récession moins sévères (état sub-critique à critique, l'état super-critique n'est atteint qu'une seule fois).

Un constat similaire peut être fait pour l'année 2007. Beaucoup plus humide dans l'ensemble, seules trois valeurs de fin d'étiage sont observées dans l'état critique définis par les seuils 1, mais aucune suivant les seuils 2, au sein desquels les valeurs se concentrent essentiellement dans les états humide et normal.

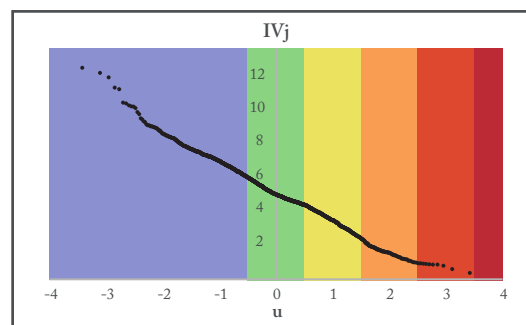
L'année 2012 apparaît la plus sévère des trois exemples présentés, puisque les états sub-critique puis critique sont atteints plus rapidement. Les valeurs dans les états humide et moyen sont moins nombreuses, et les valeurs correspondant aux situations « sèches » sont moins extrêmes, mais plus

G21.1 DÉTERMINATION DES SEUILS DE CRITICITÉ AU POSTE D'ANDUZE

SEUILS 1

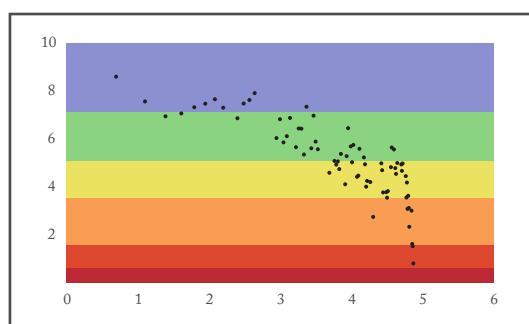


SEUILS 2

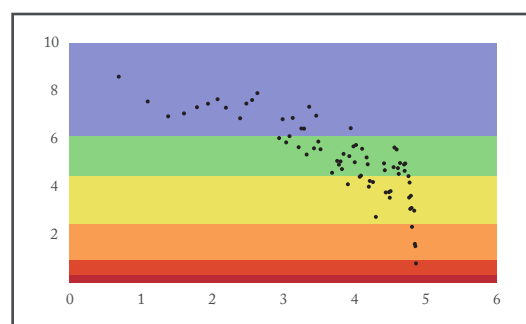


G21.2 CHRONO-KINDÉNOGRAMMES DE LA RÉCESSION DE 1977

SEUILS 1

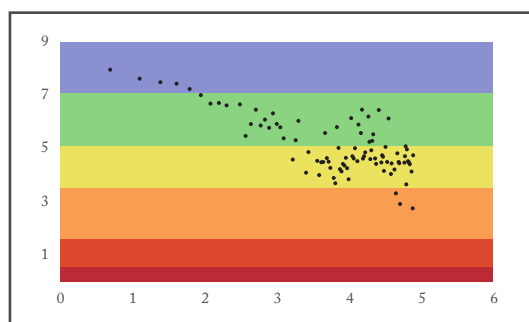


SEUILS 2

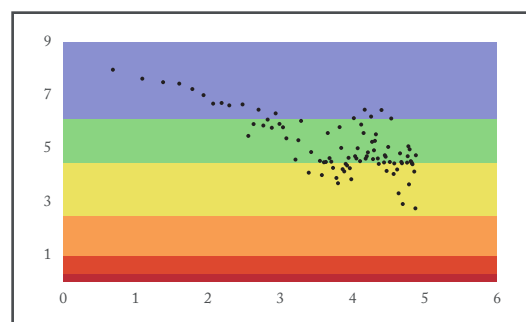


G21.3 CHRONO-KINDÉNOGRAMMES DE LA RÉCESSION DE 2007

SEUILS 1

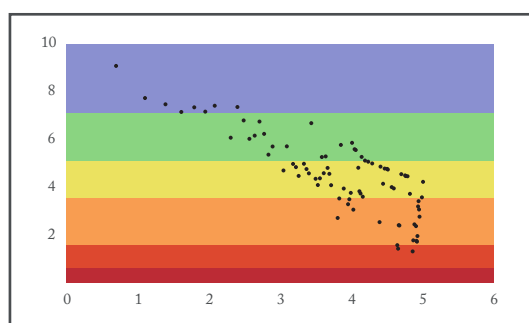


SEUILS 2

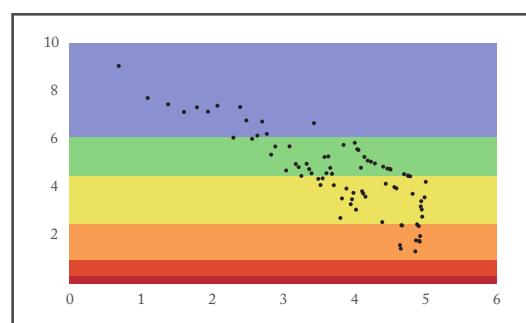


G21.4 CHRONO-KINDÉNOGRAMMES DE LA RÉCESSION DE 2012

SEUILS 1



SEUILS 2



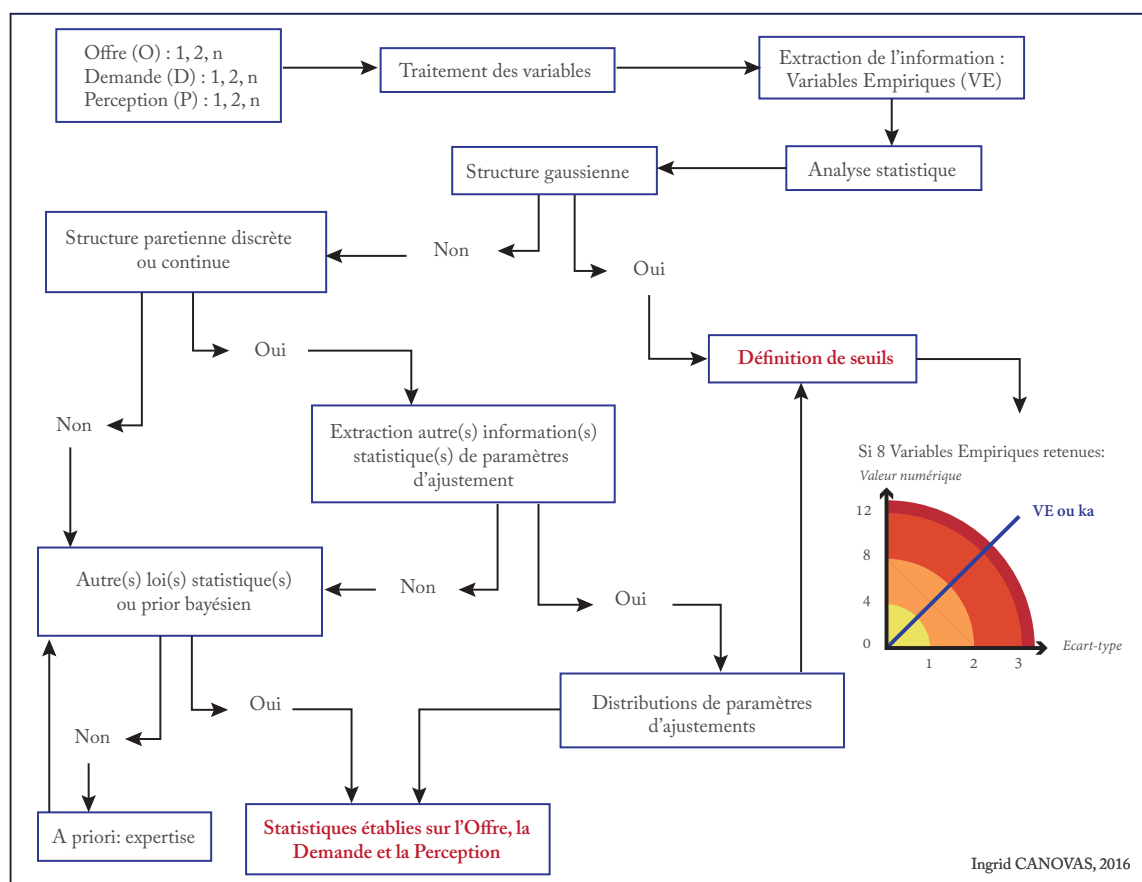
nombreuses (réparties dans les états critique et super-critique suivant les seuils 1, et « seulement » critique suivant les seuils 2).

Cet exemple souligne clairement l'importance du choix du découpage des seuils, malgré qu'ils soient définis sur la base d'une loi statistique. Comme constaté précédemment, les seuils 1 semblent moins discriminer les valeurs les plus extrêmes, celles qui sont les plus intéressantes pour une approche des situations problématiques. Toutefois, le choix du découpage selon les seuils 1 sera choisi ici, afin de pouvoir observer des situations exceptionnelles.

Conclusion — La démarche exploratoire en vue de proposer des indicateurs statistiques pour décrire l'état de basses eaux, a été présentée au travers de l'élaboration de l'indicateur renseignant la variable « volume disponible en surface », à partir des débits journaliers, et déclinée ici sur les phases de récession de fin de cycle. L'identification des dynamiques spatio-temporelles et de la structure globale des débits, a permis d'orienter le choix vers l'indice volumique journalier, indicateur retenu à la résolution journalière et à partir duquel d'autres indicateurs ont été suggérés, pour une analyse à résolution annuelle.

Malgré la confirmation de l'existence d'une structuration spatiale générale assez marquée, de l'amont vers l'aval, des spécificités locales ont été mises en évidence. Ces dernières induisent la nécessité d'étendre la démarche initiée sur les récessions à l'analyse des facteurs climatiques (dont les précipitations) (voir CHAPITRE 8) ainsi qu'à la vidange des réservoirs souterrains (voir CHAPITRE 7). Ces compléments d'analyse devraient permettre de préciser le lien existant entre ces paramètres et leur potentielle contribution (*i.e.* poids, influence) au maintien des débits.

VERS LA CRÉATION D'INDICATEURS POUR LA DÉFINITION DE L'ÉTAT DU VOLUME SOUTERRAIN



Karstique										Poreux					
K1	K2	K3	K3	K3	K3	K3	K3	K4	K5	K5	P1	P2	P2	P2	P3
Collongues COMBET	Ste Anastasie NICOLAS	Bourdieu F	Castelnau GAEI	La Calmette OULE	Moussac P21	Moussac MAISON	St Genès F5	La Grand Combe HBCM	St Quentin PIEZO	Bourdieu F1	Montfrin MONTFR	Cardet C	La Calmette VIGNOT	Massillargues MAIRIE	Comps CNR20
534 AH	534 AJ	534 AN						533 AR	643 AD	561 AJ	750 BF				750 AJ

FIGURE 7.1 : MILIEU DES ENTITÉS HYDROGÉOLOGIQUES ET POSTES DE MESURE ASSOCIÉS

7.1	Identification des dynamiques de vidange des aquifères en récession	224
7.2	Analyse graphique des courbes de l'indicateur et des paramètres de loi du modèle associé	232
7.2.1	Les courbes de récession des indices piézométriques journaliers (IH _{Nj})	232
7.2.2	Les paramètres de loi du modèle puissance de l'indicateur en récession : une structuration hydrogéologique de l'écoulement souterrain ?	243
7.3	Structure statistique de l'indicateur retenu et détermination des seuils de criticité	248
7.3.1	Détermination de la loi statistique pour l'ajustement de la distribution de l'indicateur	248
7.3.2	Discrétisation des états de criticité	254
7.4	Le Chrono-kindénogramme ou l'évolution temporelle de l'état de criticité de l'indicateur	255

La démarche employée sur les débits journaliers est dupliquée sur les hauteurs piézométriques. Initialement développé pour caractériser la vidange des nappes souterraines, l'indice volumique journalier (I_{vj}) et le modèle puissance associé sont retenus d'office. L'étude ne porte plus sur des valeurs de débits, mais sur des hauteurs exprimées en mètres, qui seront traduites en indices piézométriques journaliers (IH_{Nj}). Les étapes méthodologiques suivies pour l'élaboration de l'indicateur de l'état du volume superficiel (I_{vj}) sont conservées, suivant un ordre identique (ENCADRÉ E22.1).

Toutefois, les postes ne sont plus comparés suivant une logique amont-aval, mais (1) entre unités hydrogéologiques identiques et (2) entre entités différentes (FIGURE 7.1).

Par conséquent, le développement méthodologique est ici moins détaillé, et seuls seront présentés les résultats issus des analyses des dynamiques interannuelles et de la structuration hydrogéologique des indices piézométriques ainsi que des pentes et des surfaces sous la récession du modèle de puissance. Le travail est centré sur la phase de récession de fin de cycle, afin de faciliter la comparaison et la mise en relation ultérieure des indicateurs (voir CHAPITRES 9 et 10). La structuration statistique et la définition des seuils, comme pour l'I_{vj}, sont illustrées sur l'indicateur piézométrique journalier (IH_{Nj}).

7.1 Identification des dynamiques de vidange des aquifères en récession

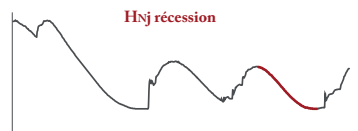
Le découpage des chroniques des niveaux piézométriques journaliers (exprimés en mètre NGF), s'effectue, comme pour celles des débits, à partir du niveau le plus haut enregistré entre le 1^{er} Mars et le 15 juin (pour tenir compte des apports printaniers) et le jour de l'étiage strict. À partir des nouvelles chroniques de récession, une analyse graphique est menée, afin d'examiner la forme des courbes

SÉLECTION DES NIVEAUX PIÉZOMÉTRIQUES

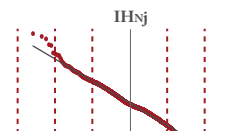
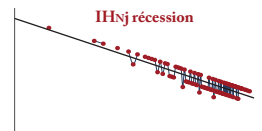
CALCUL DE L'INDICE

REPRÉSENTATION GRAPHIQUE

SEUILS DE CRITICITÉ



H_{nj}	t	$\ln t$	$\ln H_{nt}$	IH_{nj}
117,82	5	1,60...	4,76...	9,99...



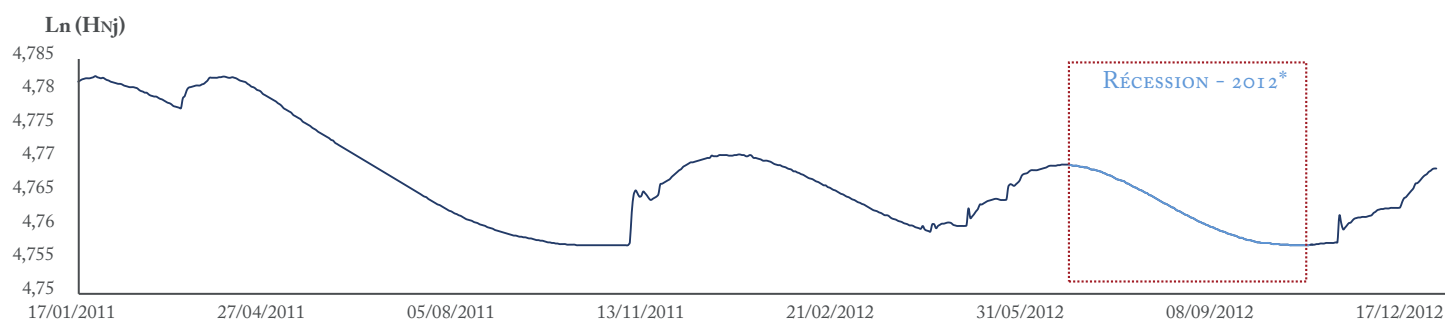
Dans un premier temps, les hauteurs de chaque phase de récession sont extraits de la chronique totale

La série de hauteurs de récession est ensuite transformée en nouvelle série, constituée des valeurs de l'indicateur calculé

Les valeurs de la nouvelle série sont ajustées à une loi statistique, après en avoir identifié la nature de la distribution

Enfin, suivant la loi statistique définie, des seuils statistiques de criticité sont obtenus

G22.1.1

CALCUL DE L'INDICE DE HAUTEUR DE NAPPE JOURNALIER À PARTIR DES NIVEAUX
PIÉZOMÉTRIQUES DE LA RÉCESSION

* La récession (2012) correspond à la période comprise entre le jour suivant le niveau le plus haut enregistré entre le 1^{er} mars et le 15 juin de l'année 2012 et s'achève le jour du plus bas niveau atteint cette même année.

Source: Portail ADES, 2016

$$IH_{nj}^* = \ln(H_{nt-1} / ((\ln(H_{nt}) - \ln(H_{nt-1})) / (\ln(t+1) - \ln(t)))) \times 0.0864$$

* Indice de Hauteur de nappe journalier = indice issu des niveaux piézométriques journaliers, qui renseigne le «volume souterrain disponible».

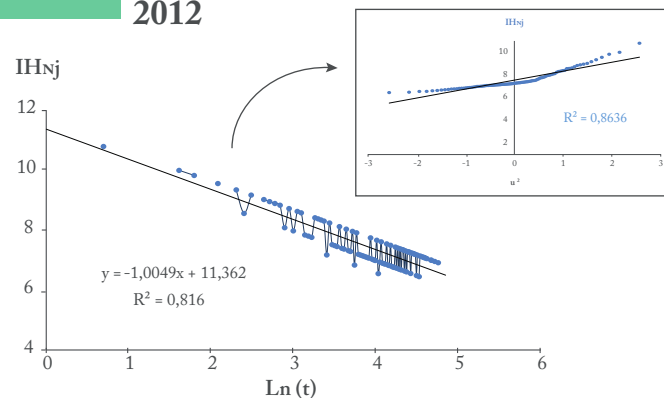
T22.1

INDICES JOURNALIERS - RÉCESSION 2012

H_{nj}	t (jour)	$\ln t$	$\ln H_{nt}$	H_{nj}
117.84	1	0	4.7693278	-*
117.83	2	0.6931472	4.7692429	10.792126
117.82	3	1.0986123	4.769158	-
117.82	4	1.3862944	4.769158	-
117.82	5	1.6094379	4.769158	9.9926929
117.81	6	1.7917595	4.7690732	9.8246817
117.80	7	1.9459101	4.7689883	-
117.80	8	2.0794415	4.7689883	9.5554257
117.79	9	2.1972246	4.7689034	-
117.79	10	2.3025851	4.7689034	9.3435482
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

* Lorsque H_{nj} (exprimé en mètre NGF) est supérieur ou égal à H_{nj-1} , l' IH_{nj} n'est pas renseigné; ces situations correspondant à une augmentation ou au maintien du niveau piézométrique.

G22.1.2

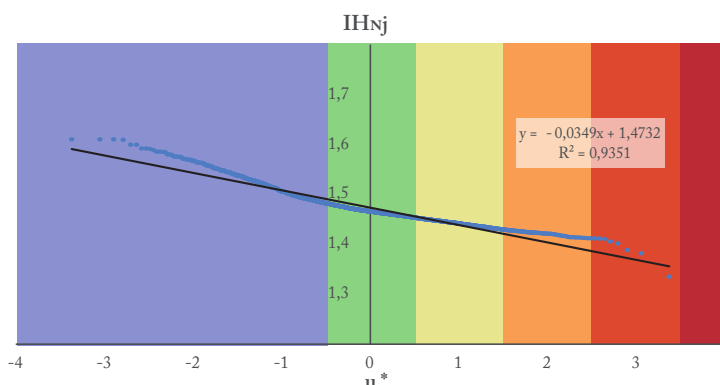
DYNAMIQUE* DES IH_{nj} - RÉCESSION 2012

* Evolution temporelle de l'Indice de Hauteur de nappe journalier durant la récession 2012. Les IH_{nj} ont une distribution gaussienne et s'ajustent à la loi normale standard inverse.

G22.1.3

AJUSTEMENT STATISTIQUE DES IH_{nj} ET DÉTERMINATION DES SEUILS DE CRITICITÉ - 9
RÉCESSIONS

- Etat humide: situation satisfaisante
- Etat moyen: situation normale
- Etat sub-critique: situation à surveiller
- Etat critique: situation problématique
- Etat super-critique: situation de crise
- Etat exceptionnel: situation catastrophique



* Les IH_{nj} , issus des 9 récessions enregistrées à Massillargues-Attuech, ont une distribution gaussienne et s'ajustent à la loi normale standard inverse. u est la variable centrée réduite, utilisée comme seuil de criticité de l'indicateur de l'état journalier du «volume souterrain disponible» (ici l' IH_{nj}).

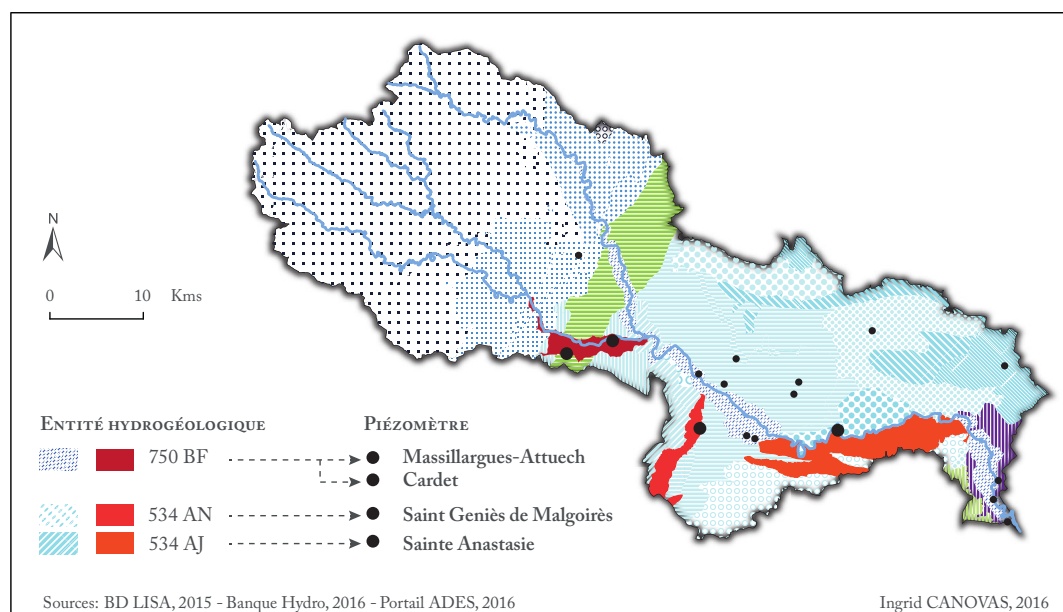


FIGURE 7.2 : LOCALISATION DES POSTES PIÉZOMÉTRIQUES RETENUS POUR L'ANALYSE DES DYNAMIQUES DE VIDANGE DES PRINCIPALES ENTITÉS HYDROGÉOLOGIQUES

de vidange relatives aux différentes entités hydrogéologiques présentes sur le bassin des Gardons. Toutefois, étant donné leur nombre important, seules les trois, comptant parmi les plus représentées, sont détaillées dans ce travail d'observation préliminaire (FIGURE 7.2), au travers de :

- Deux postes proches, situés sur une même entité alluviale ;
- Deux postes situés sur deux entités karstiques différentes.

En premier lieu, les dynamiques de vidange sont appréhendées par le biais des courbes de hauteurs piézométriques. L'observation ne porte cependant plus sur les années prises en exemple pour identifier les dynamiques d'écoulement des débits en récession. Les séries d'enregistrement des niveaux piézométriques ne sont en effet disponibles que depuis 2005, pour la plus grande majorité des postes (FIGURE 7.3).

Malgré cela, l'observation sur quelques années suffit à mettre en relief, de manière assez générale, les profils de vidange (*e.g.* inertie, réactivité).

La comparaison des profils est ainsi menée sur quatre années communes (2007, 2012, 2013 et 2015). Si dix années de données rendent difficile l'élaboration d'une typologie robuste de vidange, elles permettent d'ores et déjà de distinguer la dynamique de vidange de celle de l'écoulement superficiel en récession. Les courbes piézométriques présentent, par exemple, moins de fluctuations et de réactivité aux précipitations. L'analyse graphique permet par ailleurs de souligner les nombreuses lacunes qui segmentent les chroniques piézométriques (FIGURE 7.3).

Aussi, il faut probablement s'attendre à ce que les résultats des analyses, envisagées pour caractériser tant la dynamique et la structure spatio-temporelles de la variable que, à terme, celles de

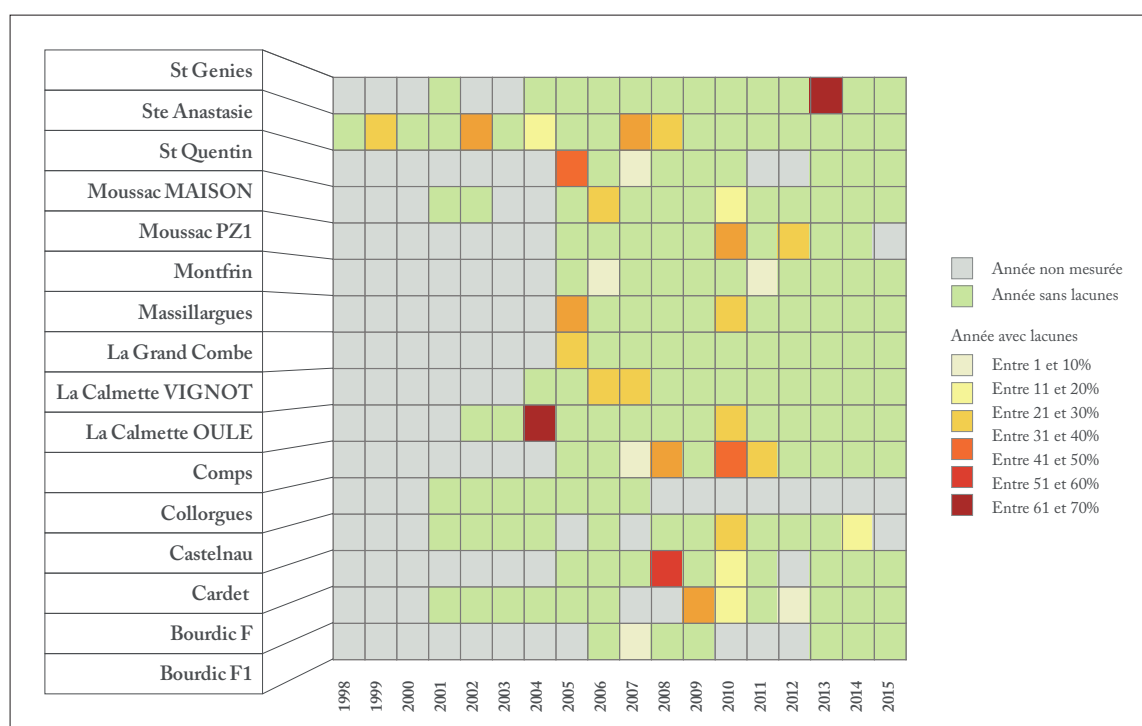


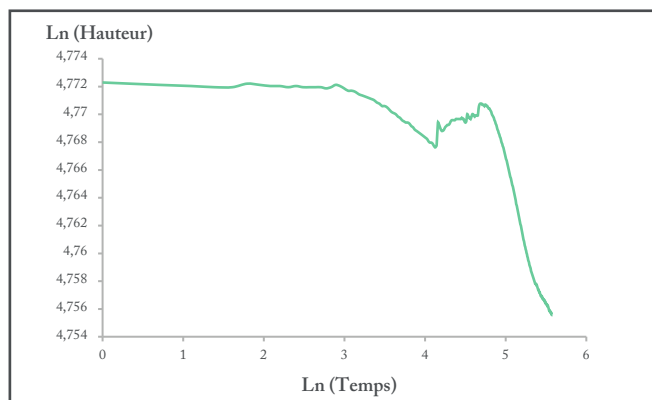
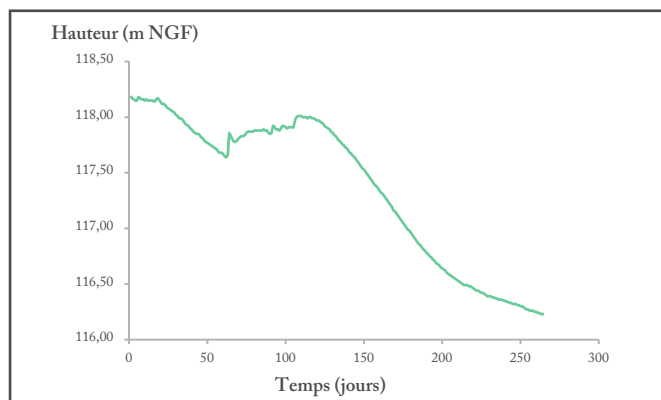
FIGURE 7.3 : LES ANNÉES LACUNAIRES DES CHRONIQUES AUX POSTES PIÉZOMÉTRIQUES RETENUS

l'indicateur, soient un peu incomplets ou biaisés. Ils seront donc à prendre avec précautions et à interpréter avec l'appui de connaissances expertes de terrain.

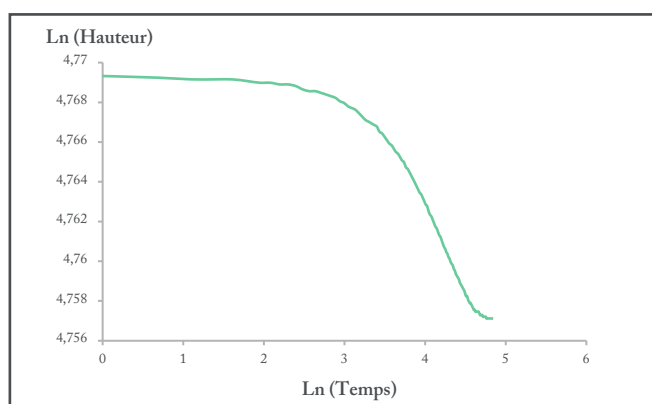
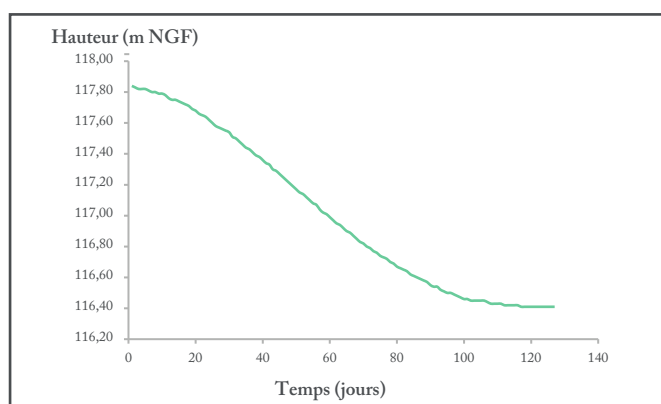
La dynamique de vidange observée sur les entités karstiques se traduit graphiquement par une diminution franche après une longue période d'inertie (ENCADRÉS E23.3 et E23.4). Contrairement à celles des débits de récession, les courbes de décroissance des niveaux piézométriques en récession ne présentent que très peu, voire pratiquement pas, de fluctuations. Les années les plus sévères ou sèches (2007 et 2012) sont bien marquées, tout autant que celles pour lesquelles les phases de tarissement s'initient de manière précoce (2012). Les dynamiques de vidange des entités karstiques ne sont cependant pas tout à fait analogues, comme le révèlent les courbes des années 2013 et 2015. La dynamique observable à Sainte Anastasie présente davantage de fluctuations, et la vidange semble s'amorcer et s'effectuer plus rapidement qu'à Saint Geniès de Malgoirès. Cela se traduit graphiquement par une rupture de pente moins brutale (du moins, sur les quatre années prises en exemple) au poste de Sainte Anastasie.

Sur l'entité alluviale (750BF), d'autres formes de dynamiques sont constatées (ENCADRÉS E23.1 et E23.2). Sur le poste de Cardet, la vidange semble s'effectuer par paliers (particulièrement au cours des années 2007 et 2012), entrecoupés d'importantes fluctuations. L'aquifère, en ce point, semble donc réagir assez sensiblement aux apports pluviométriques, et donc vraisemblablement aussi aux prélèvements. À l'exception de l'année 2015, la vidange serait tout de même rythmée par deux phases (*i.e.* une période d'inertie avant une décroissance rapide), néanmoins plus courtes et moins nettes que sur le milieu karstique. Deux chutes de hauteurs, avant fin de récession, pour 2012 (l'étiage strict est atteint deux fois) et 2013, sont également à noter.

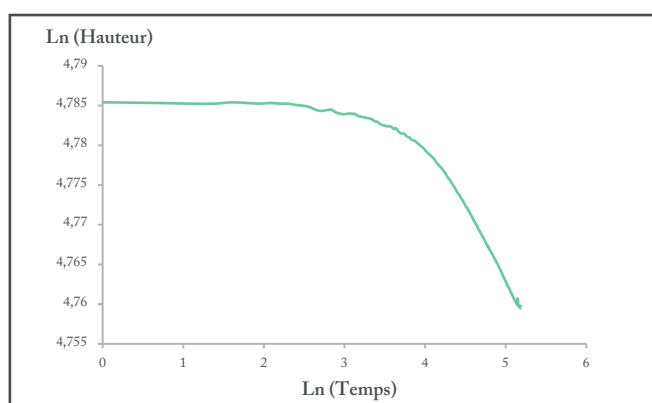
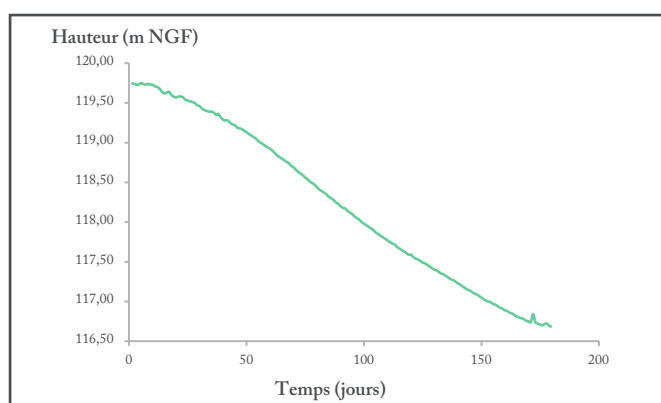
G23.1.1 ÉVOLUTION DU NIVEAU PIÉZOMÉTRIQUE DURANT LA RÉCESSION DE 2007



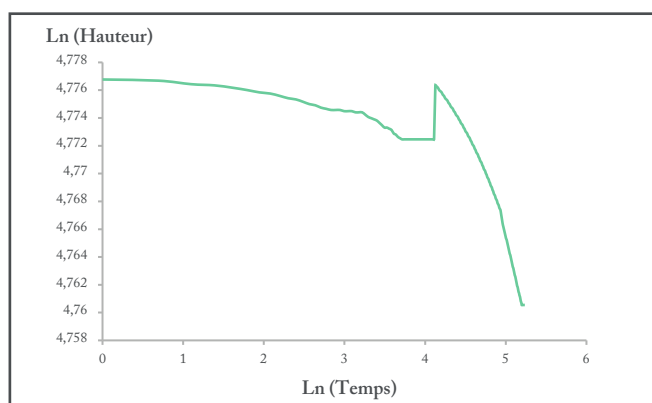
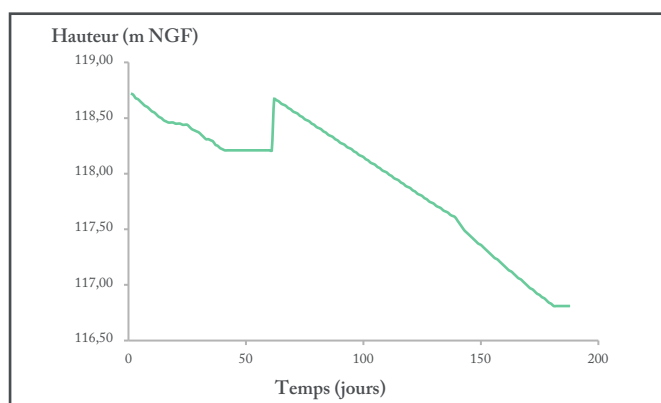
G23.1.2 ÉVOLUTION DU NIVEAU PIÉZOMÉTRIQUE DURANT LA RÉCESSION DE 2012



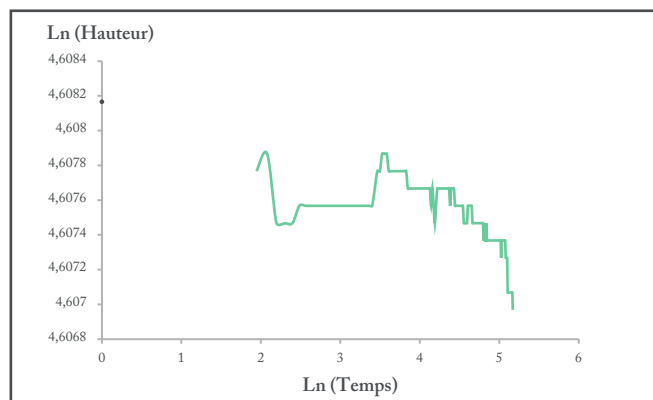
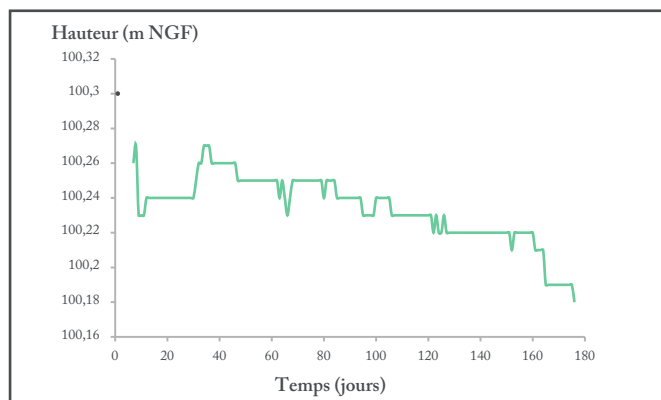
G23.1.3 ÉVOLUTION DU NIVEAU PIÉZOMÉTRIQUE DURANT LA RÉCESSION DE 2013



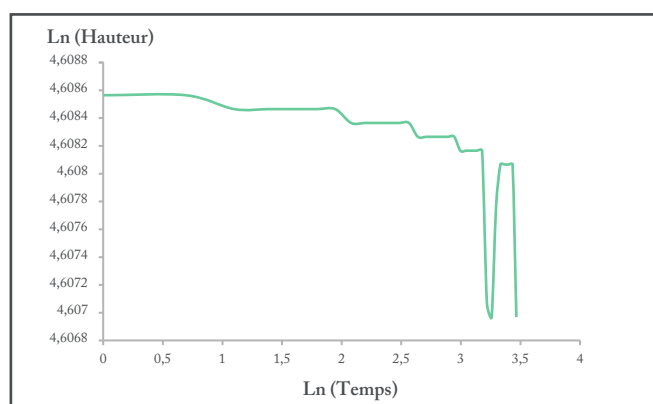
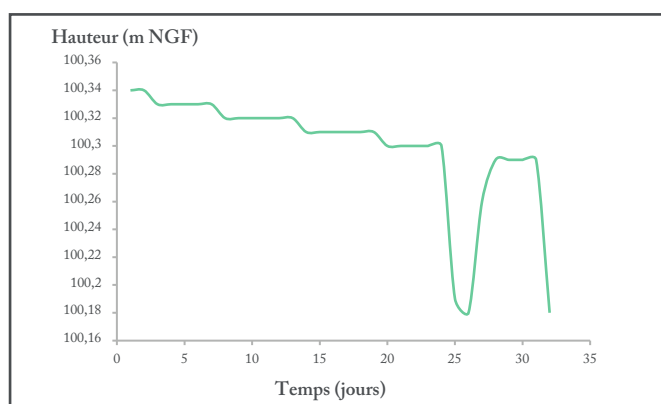
G23.1.4 ÉVOLUTION DU NIVEAU PIÉZOMÉTRIQUE DURANT LA RÉCESSION DE 2015



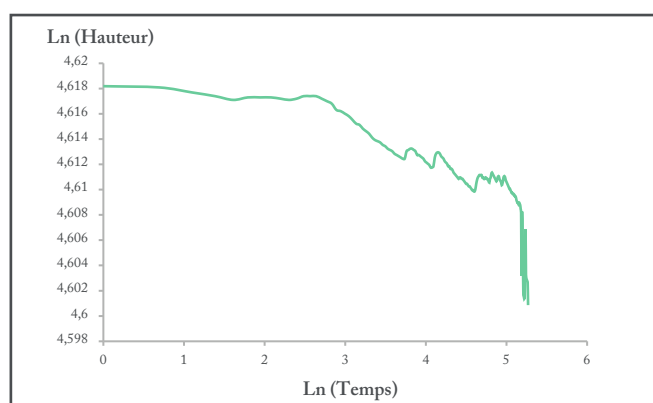
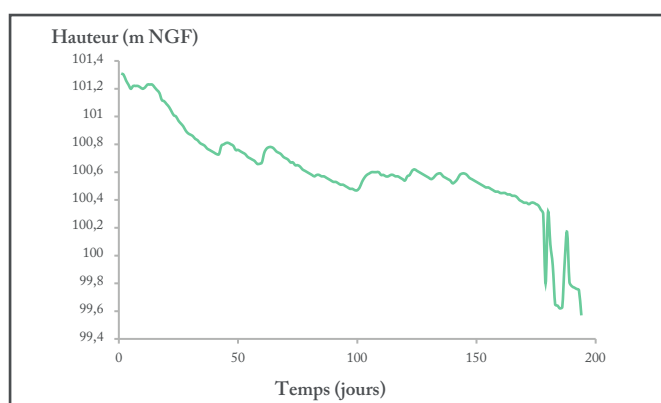
G23.2.1 ÉVOLUTION DU NIVEAU PIÉZOMÉTRIQUE DURANT LA RÉCESSION DE 2007



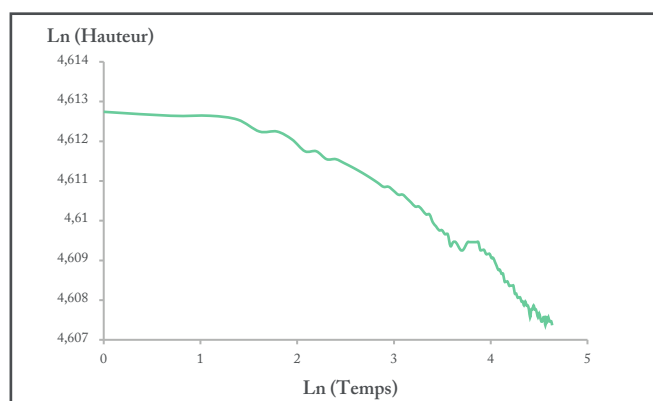
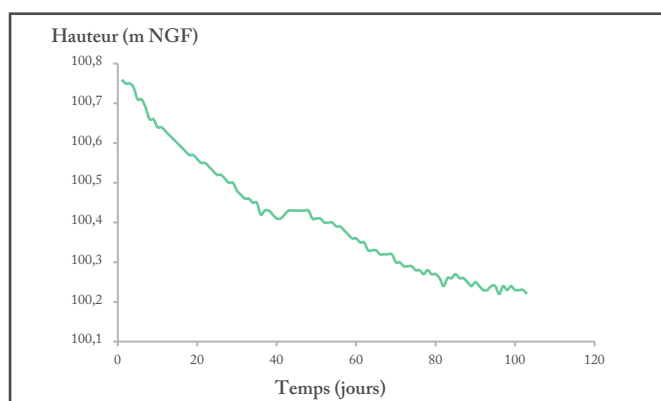
G23.2.2 ÉVOLUTION DU NIVEAU PIÉZOMÉTRIQUE DURANT LA RÉCESSION DE 2012



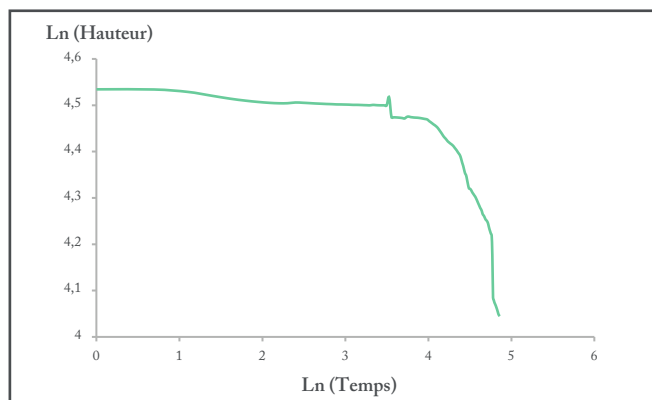
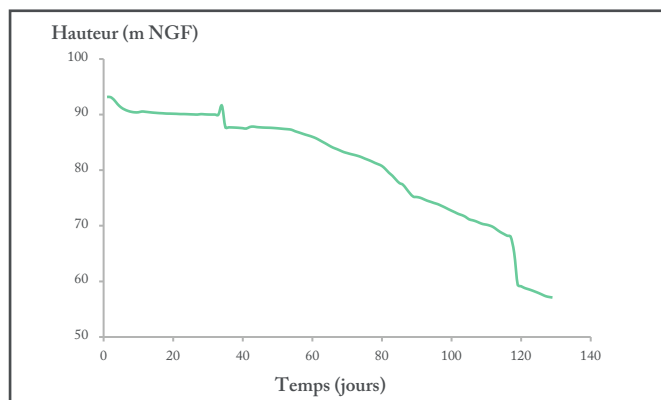
G23.2.3 ÉVOLUTION DU NIVEAU PIÉZOMÉTRIQUE DURANT LA RÉCESSION DE 2013



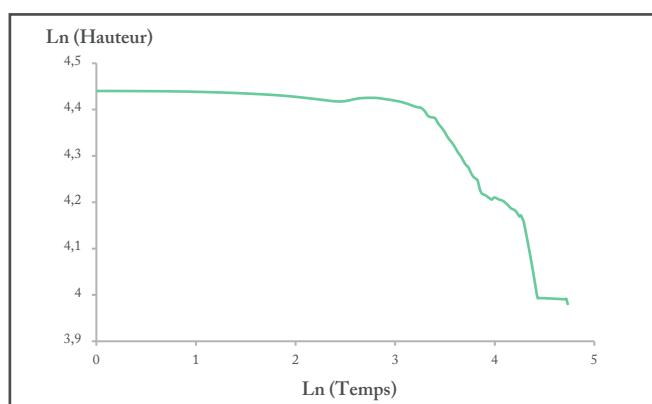
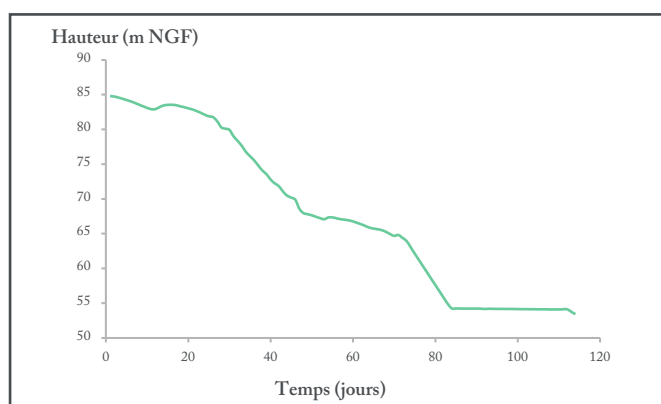
G23.2.4 ÉVOLUTION DU NIVEAU PIÉZOMÉTRIQUE DURANT LA RÉCESSION DE 2015



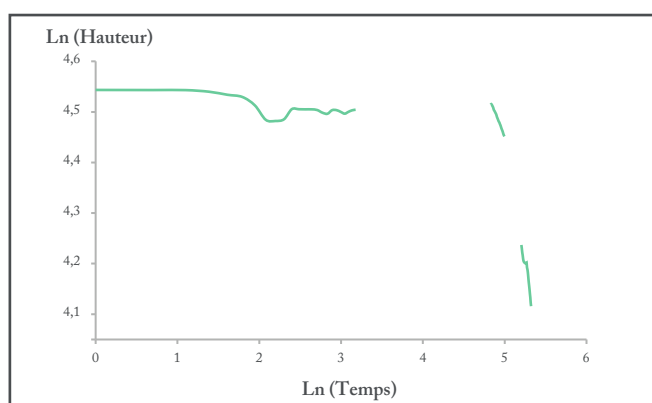
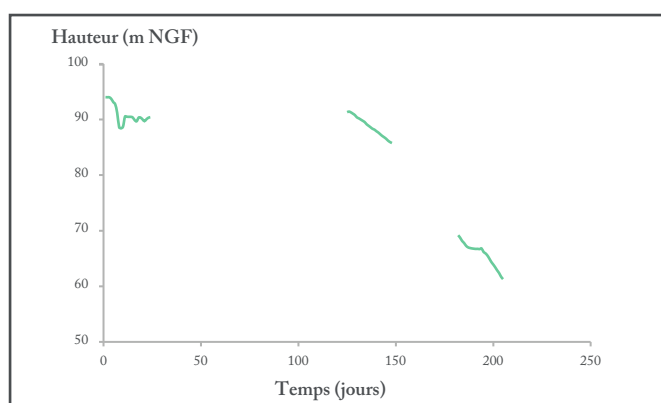
G23.3.1 EVOLUTION DU NIVEAU PIÉZOMÉTRIQUE DURANT LA RÉCESSION DE 2007



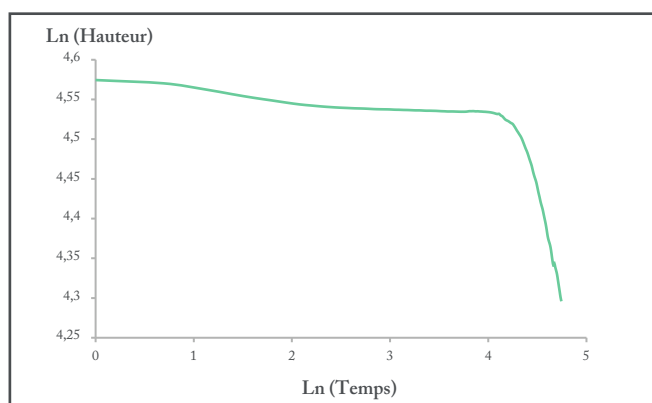
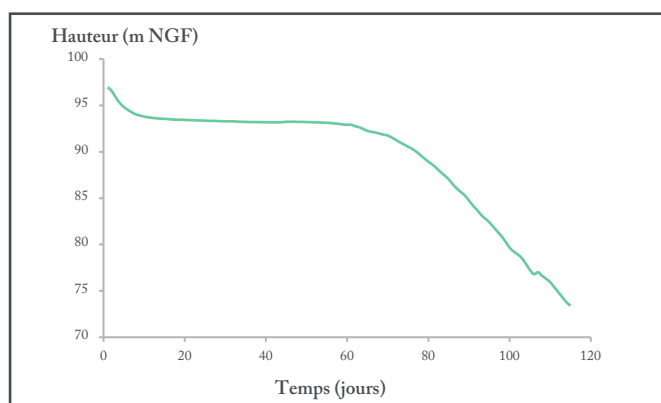
G23.3.2 EVOLUTION DU NIVEAU PIÉZOMÉTRIQUE DURANT LA RÉCESSION DE 2012



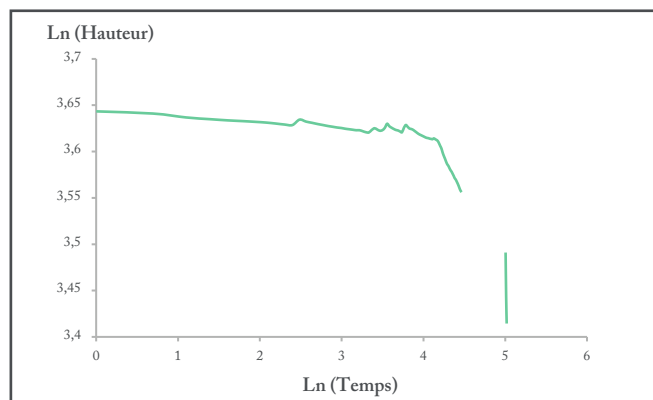
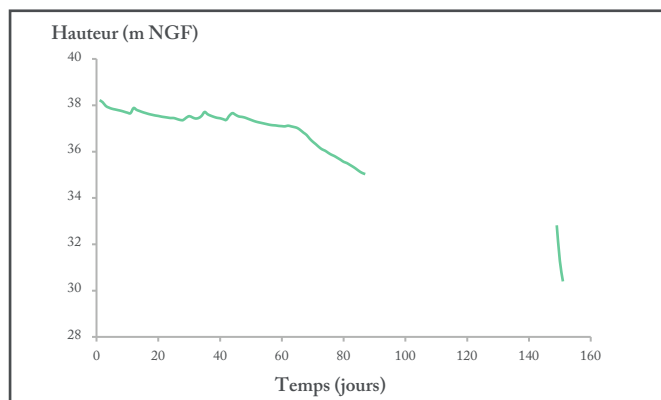
G23.3.3 EVOLUTION DU NIVEAU PIÉZOMÉTRIQUE DURANT LA RÉCESSION DE 2013



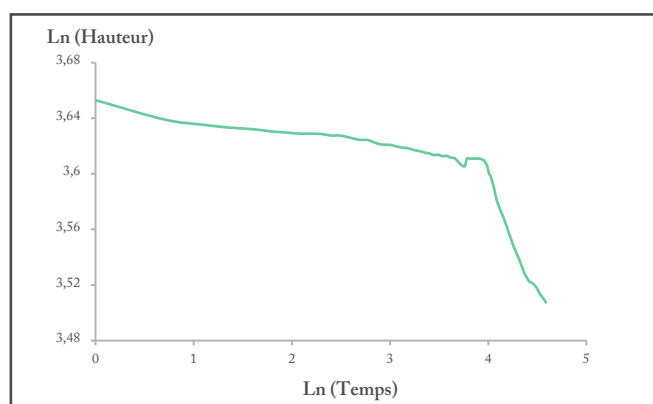
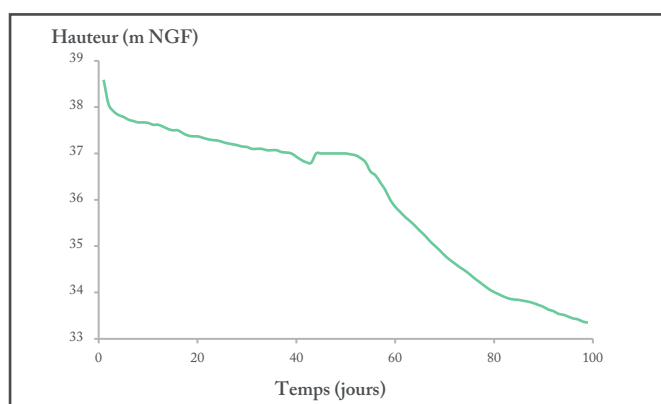
G23.3.4 EVOLUTION DU NIVEAU PIÉZOMÉTRIQUE DURANT LA RÉCESSION DE 2015



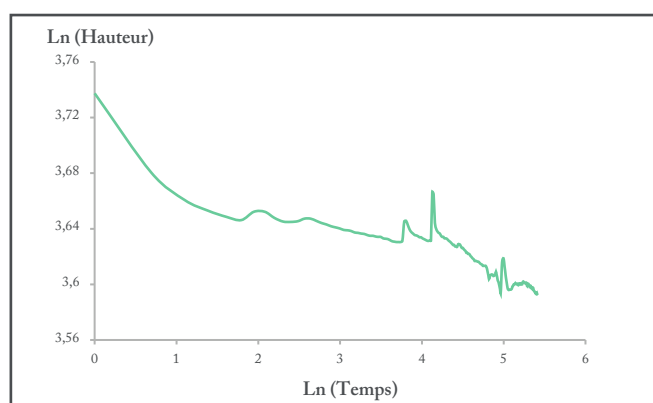
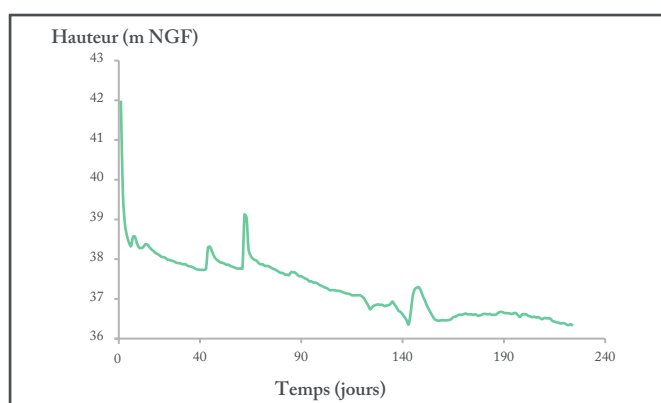
G23.4.1 EVOLUTION DU NIVEAU PIÉZOMÉTRIQUE DURANT LA RÉCESSION DE 2007



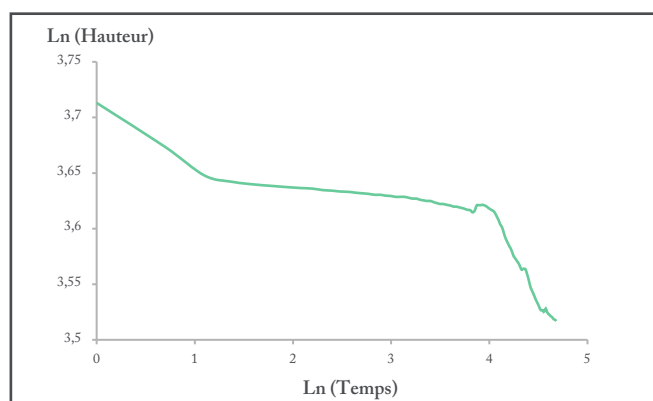
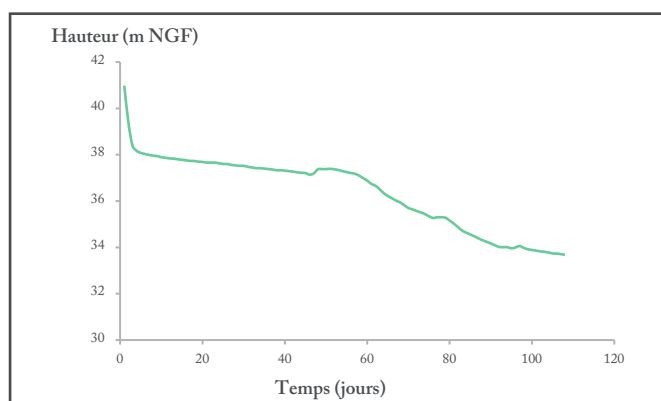
G23.4.2 EVOLUTION DU NIVEAU PIÉZOMÉTRIQUE DURANT LA RÉCESSION DE 2012



G23.4.3 EVOLUTION DU NIVEAU PIÉZOMÉTRIQUE DURANT LA RÉCESSION DE 2013



G23.4.4 EVOLUTION DU NIVEAU PIÉZOMÉTRIQUE DURANT LA RÉCESSION DE 2015



Au vu de ces constats, la question de la nature de ces différences et de ces fluctuations se pose. Sont-elles imputables à la qualité (douteuse ?) de la mesure, ou s'agit-il d'une spécificité locale, propre au site de mesure (*e.g.* configuration morphologique ou hydrogéologique particulière, prélèvements anthropiques importants). En effet, les courbes enregistrées au second poste de mesure (Massillargues – Attuech), pourtant situé sur une commune voisine et sur la même unité hydrogéologique, ne corroborent pas les dynamiques observées à Cardet. Les deux phases sont davantage marquées, et les courbes apparaissent plus lisses (moins de fluctuations).

Cela étant, le tarissement s'amorce globalement plus tôt sur l'aquifère alluvial que sur le karst. Cette grande hétérogénéité appuie ainsi l'intérêt de recourir à une approche statistique, afin de rendre comparables des dynamiques potentiellement hétérogènes, sur des territoires *a priori* homogènes d'un point de vue hydrologique.

Conclusion — Au vu de ces derniers exemples, il apparaît difficile de définir un poste de référence pour une entité, à partir des seules courbes de hauteurs piézométriques. De surcroît, l'hétérogénéité des dynamiques de vidange est relativement bien perceptible entre les milieux hydrogéologiques (poreux et karstiques). C'est pourquoi tous les postes localisés sur le bassin feront l'objet d'une analyse. S'il s'agit, ensuite, comme pour les séries de débit, de s'assurer que les dynamiques et les structurations hydrogéologiques révélées, le cas échéant, soient confirmées par les indicateurs nouvellement créés.

7.2 Analyse graphique des courbes de l'indicateur et des paramètres de loi du modèle associé

Les indicateurs retenus sont identiques à ceux ayant contribué à la caractérisation de la dynamique d'écoulement des débits en récession, à savoir :

- L'indice volumique pour la résolution journalière ;
- La surface spécifique de récession pour la résolution annuelle.

Dans un souci de clarté, l'indice volumique journalier se référant au volume souterrain est noté IHN_j (pour Indice journalier de Hauteur de la nappe). En premier lieu, il s'agit de s'assurer que les courbes des valeurs de IHN_j traduisent bien les dynamiques de variations des hauteurs piézométriques. Les caractéristiques et les paramètres de loi issus de l'indice seront ensuite analysés de sorte à vérifier qu'ils correspondent à une réalité hydrogéologique. Pour cela une étude comparative est menée sur les entités similaires, puis sur les entités différentes (*e.g.* karst, alluvions, socle).

7.2.1 Les courbes de récession des indices piézométriques journaliers (IHN_j)

Sur les courbes des indices calculés aux postes situés sur les entités poreuses, deux paliers (trois pour l'année 2013) sont distingués. Ils ne coïncident pas pour autant avec les deux phases de décroissance observées précédemment sur les courbes de niveau piézométriques. Ils sembleraient, en revanche, refléter une structuration particulière de la dynamique de vidange de l'aquifère.

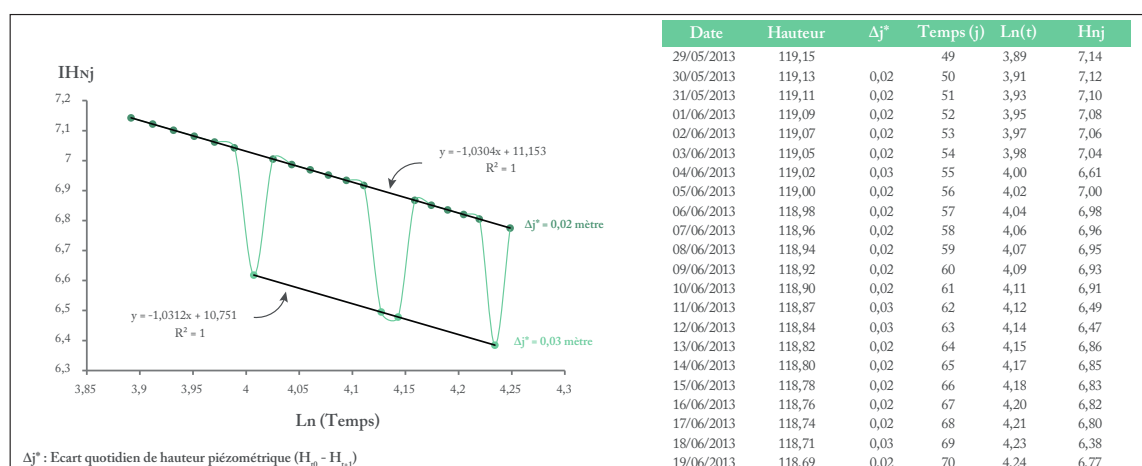


FIGURE 7.4 : STRUCTURATION PAR PALIERS DE LA DÉCROISSANCE DES HAUTEURS PIÉZOMÉTRIQUES

Dans le détail, lorsque la vidange est continue et régulière (*i.e.* même écart quotidien du niveau piézométrique), les valeurs de l'indice s'alignent sur une même droite décroissante. Dès que l'écart quotidien du niveau (Δj) varie, à la hausse ou à la baisse, les nouvelles valeurs se décalent, respectivement vers le haut ou vers le bas. Pour que cette dernière série reprenne une dynamique linéaire, la décroissance qui suit la fluctuation doit rester régulière et continue, c'est-à-dire avec le même écart quotidien de niveau (Δj identique). En d'autres termes, des séries parallèles se constituent, leur décalage sur le graphique étant relatif à l'écart quotidien du niveau piézométrique (FIGURE 7.4).

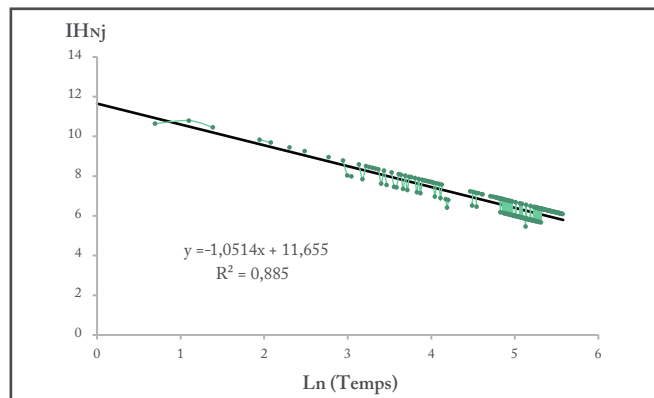
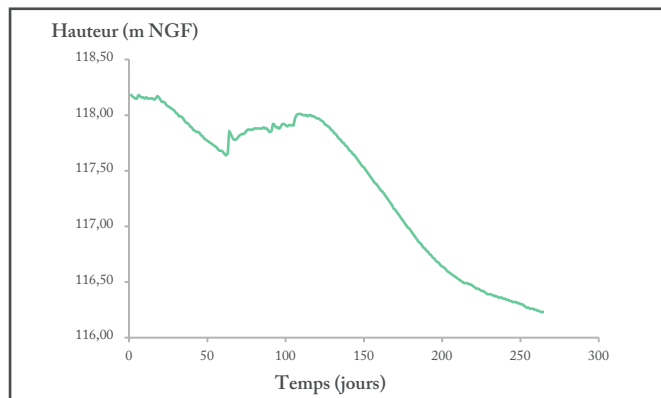
C'est pourquoi la dynamique apparaît globalement très linéaire, dévoilant une structure des variations durant la vidange, au cours d'une même récession. Cette dernière est rendue possible, car les fluctuations quotidiennes sont extrêmement faibles (à l'inverse de celles observées sur les courbes des débits), et parce la variation quotidienne du niveau piézométrique présente une certaine régularité. En effet, les aquifères souterrains étant plus étendus que les lits des cours d'eau, la mobilisation d'un volume, même important, chaque jour se traduit par une baisse quotidienne du niveau du réservoir relativement faible.

C'est la raison pour laquelle, même lorsque la vidange est perturbée (mais dans une mesure relative), la structure semble se maintenir. Un palier supplémentaire apparaît, plus ou moins éloigné de la droite de décroissance non perturbée.

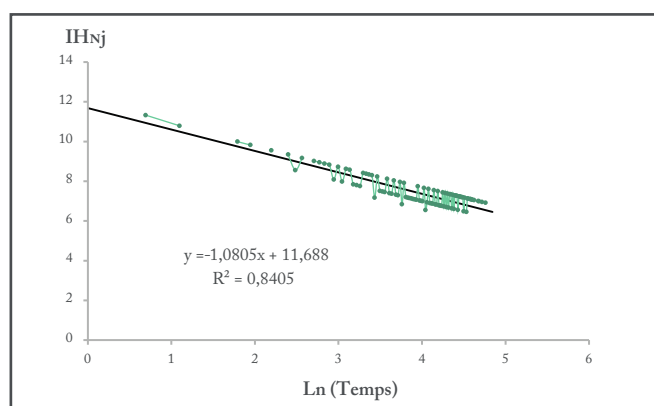
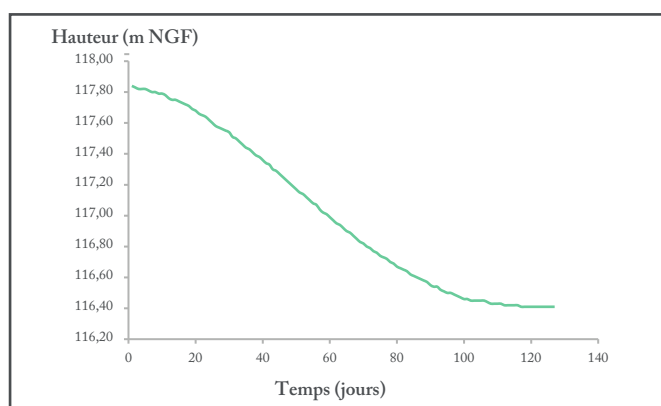
Cette structure est également rendue possible, car la vidange qui suit la perturbation reprend généralement un rythme régulier, même s'il est dans certains cas plus rapide. Cela s'observe d'ailleurs assez nettement sur les courbes enregistrées au poste de Cardet (ENCADRÉ E24.2). En 2015, le palier est plus bas qu'en 2013, année au cours de laquelle un début de troisième palier semble par ailleurs se profiler en milieu et fin de récession.

En revanche, la fin de récession étant souvent très rapide et marquée par de nombreuses perturbations successives, la logique des paliers disparaît, ces derniers n'ayant pas le temps de se former.

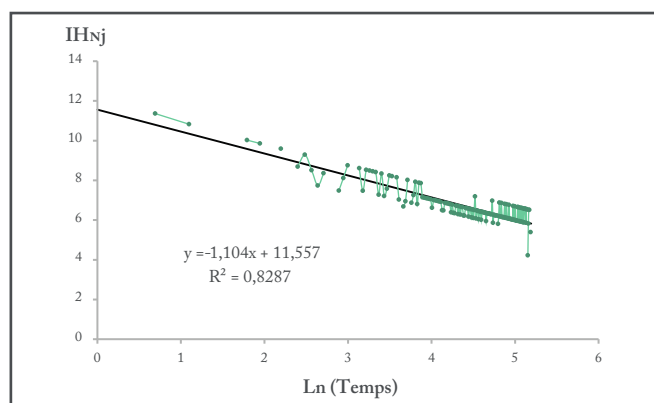
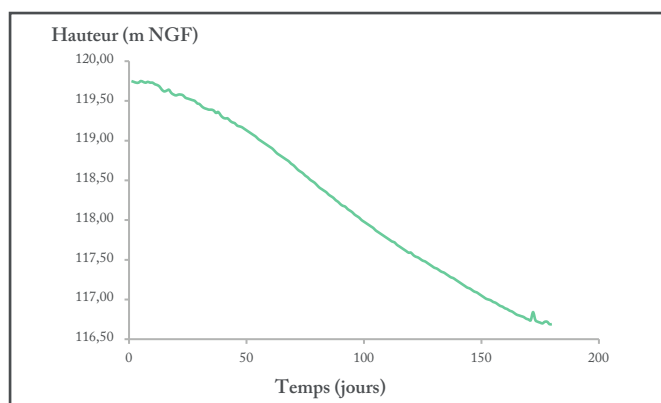
G24.1.1 DYNAMIQUE DES INDICES PIÉZOMÉTRIQUES DURANT LA RÉCESSION DE 2007



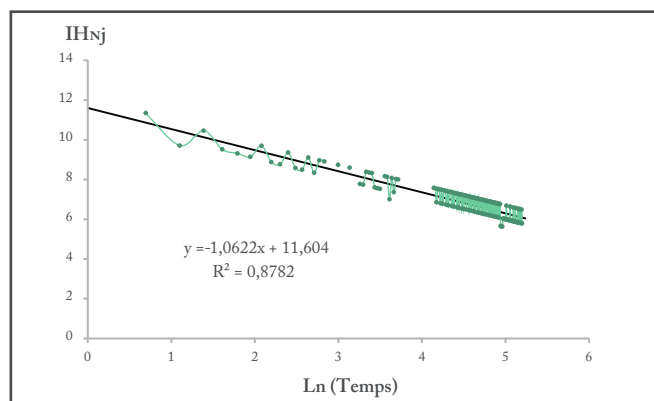
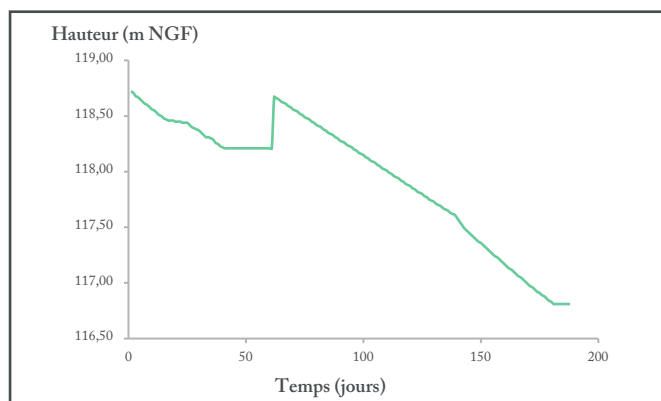
G24.1.2 DYNAMIQUE DES INDICES PIÉZOMÉTRIQUES DURANT LA RÉCESSION DE 2012



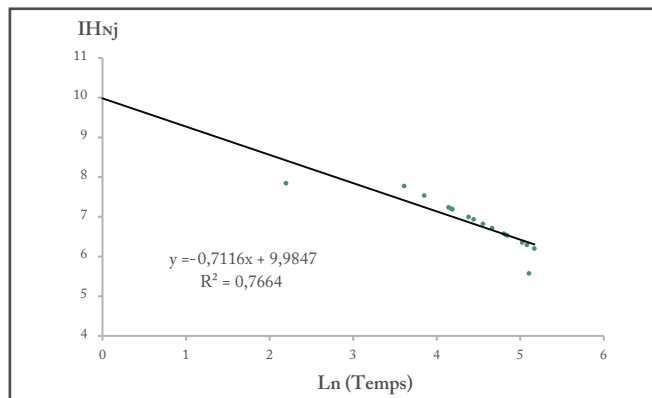
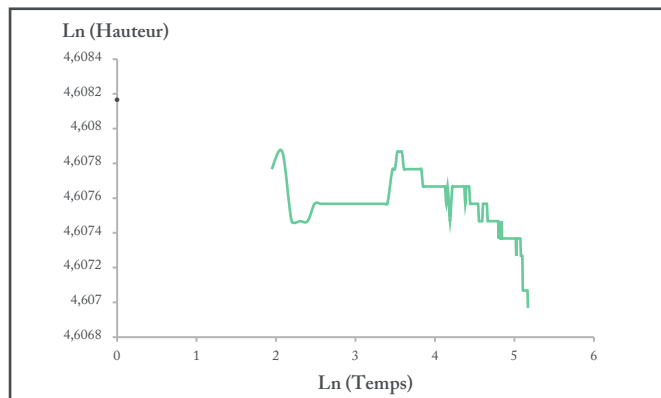
G24.1.3 DYNAMIQUE DES INDICES PIÉZOMÉTRIQUES DURANT LA RÉCESSION DE 2013



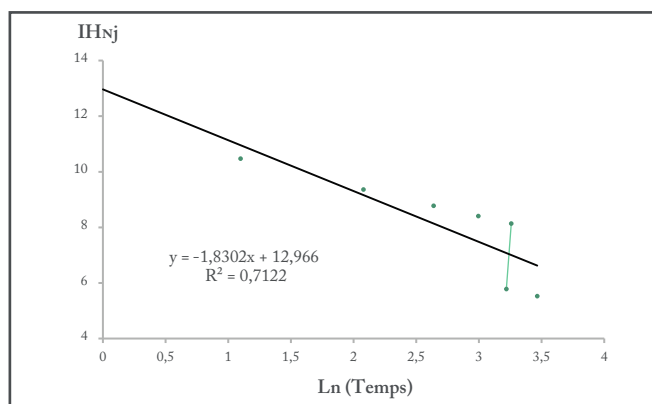
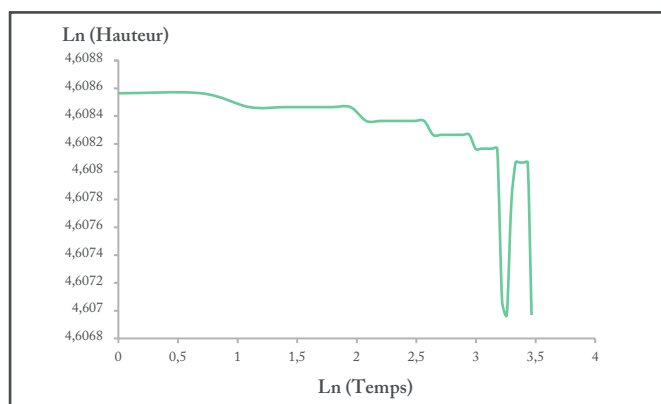
G24.1.4 DYNAMIQUE DES INDICES PIÉZOMÉTRIQUES DURANT LA RÉCESSION DE 2015



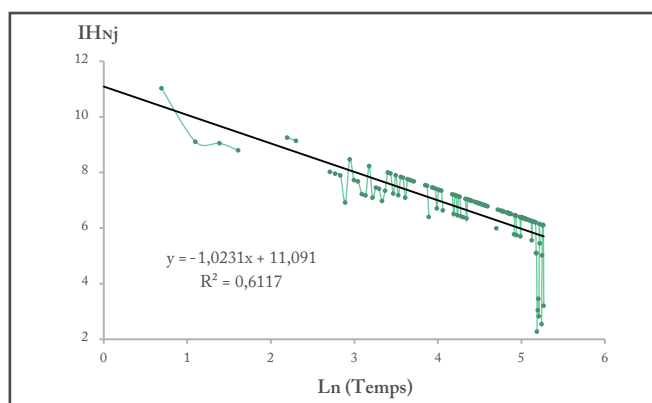
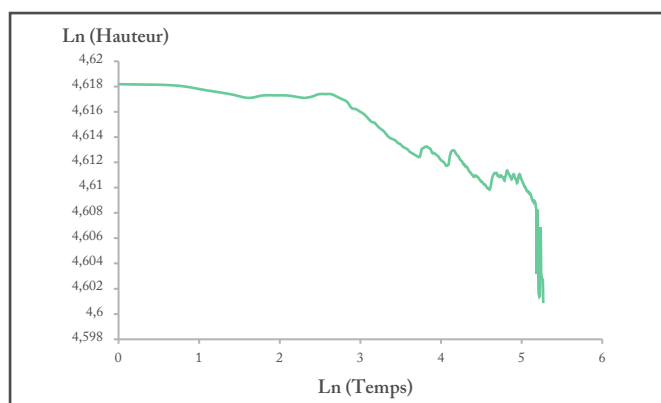
G24.2.1 DYNAMIQUE DES INDICES PIÉZOMÉTRIQUES DURANT LA RÉCESSION DE 2007



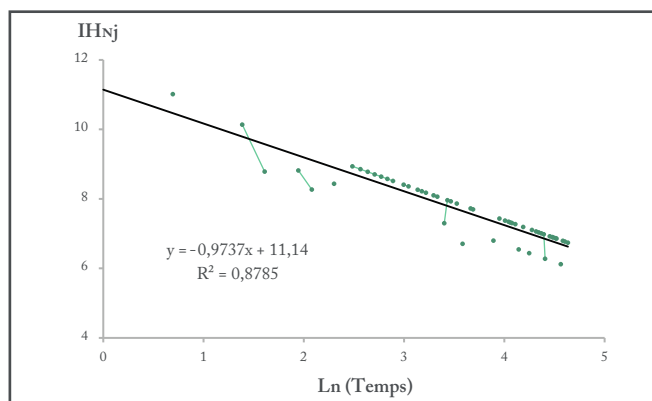
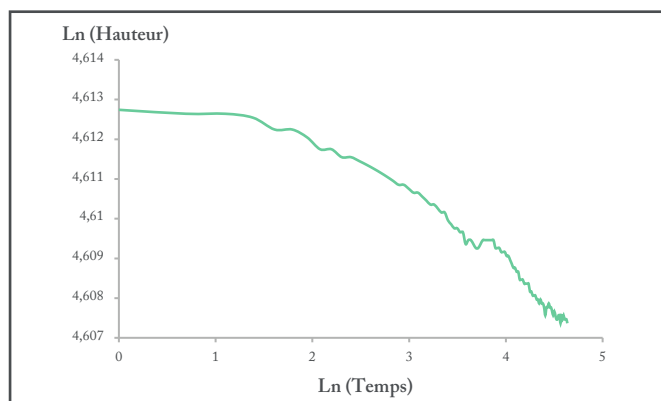
G24.2.2 DYNAMIQUE DES INDICES PIÉZOMÉTRIQUES DURANT LA RÉCESSION DE 2012



G24.2.3 DYNAMIQUE DES INDICES PIÉZOMÉTRIQUES DURANT LA RÉCESSION DE 2013



G24.2.4 DYNAMIQUE DES INDICES PIÉZOMÉTRIQUES DURANT LA RÉCESSION DE 2015



Karstique										Poreux					
K1	K2	K3	K3	K3	K3	K3	K3	K4	K5	K5	P1	P2	P2	P2	P3
Collorgues COMBET	Ste Anastasie NICOLAS	Bourdic F	Castelnau GAEI	La Calmette OULE	Moussac Pz1	Moussac MAISON	St Geniès F5	La Grand Combe HBCM	St Quentin PIEZO	Bourdic F1	Montfrin MONFR	Cardet C	La Calmette VIGNOT	Massillargues MAIRIE	Comps CNR20
534 AH	534 AJ	534 AN						533 AR	643 AD		561 AJ	750 BF			750 AJ

FIGURE 7.5 : RAPPEL SUR LE MILIEU DES ENTITÉS HYDROGÉOLOGIQUES ET DES POSTES DE MESURE ASSOCIÉS

Toutefois, il est curieux de constater que, sans évènement pluvieux (décroissance continue), la valeur de l'IHN_j remonte régulièrement, pour former ces paliers. Serait-ce lié à un problème de mesure ? À la sensibilité de la sonde ? Ou encore à un problème d'apports variables (*e.g.* effet de la végétation, de l'évapotranspiration) ?

Cette structuration particulière est beaucoup moins évidente sur les entités karstiques (ENCADRÉS E24.3 et E24.4). Elle se devine néanmoins sur la courbe de Sainte Anastasie, particulièrement au cours de l'année 2013, et sur celle de Saint Geniès de Malgoirès durant la fin de récession de 2012 et au milieu de la récession de 2015. Ces entités hydrogéologiques seraient probablement caractérisées par un nombre plus important de paliers (au moins quatre semblent émerger au poste de Sainte Anastasie pour 2012 et 2013), si les dynamiques de vidange étaient plus continues et régulières. Or, la variation très importante des valeurs des indices semble indiquer que leur dynamique de vidange n'est pas stable, et que cette dernière s'effectue avec des écarts quotidiens très (trop) hétérogènes. Pourtant, à l'inverse des courbes piézométriques propres aux entités poreuses, les courbes de niveau du domaine karstique apparaissent moins fluctuantes (plus lisses).

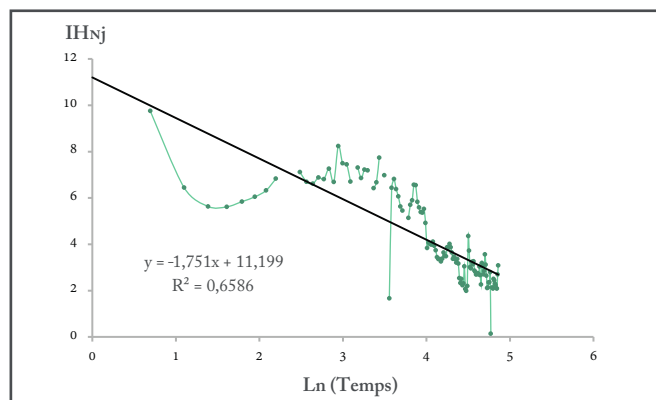
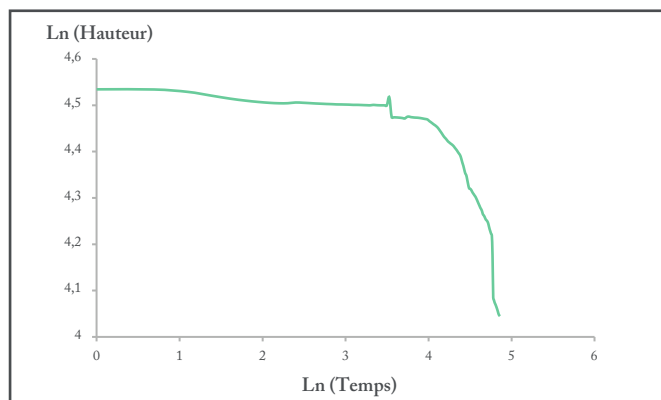
La spécificité structurelle des entités karstiques est de surcroît renforcée par une tendance absente des courbes relatives aux aquifères alluviaux. En effet, les phases de décroissance, sur les entités karstiques, s'amorcent certaines années par une augmentation des valeurs des indices journaliers. Le volume mobilisé semblerait donc augmenter dans un premier temps en début de phase de décroissance, avant de décroître progressivement.

La structuration par paliers tout juste décrite se dessine relativement bien (et mieux) sur l'ensemble des postes de mesure, notamment lorsque la totalité des récessions enregistrées est superposée (ENCADRÉS E25.1 à E25.4). Pour une meilleure lecture des observations, un rappel du détail des relations entre les postes et les entités hydrogéologiques est présenté dans le FIGURE 7.5.

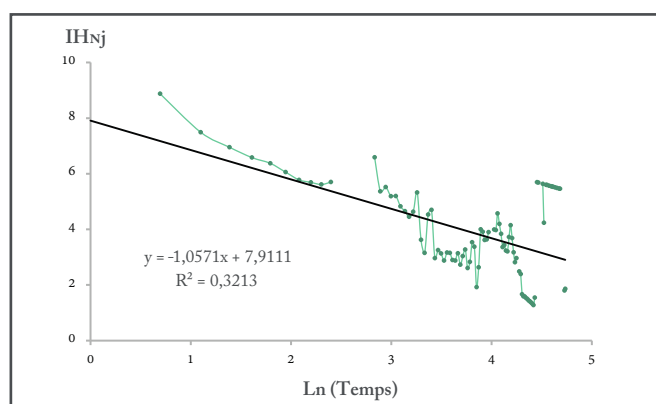
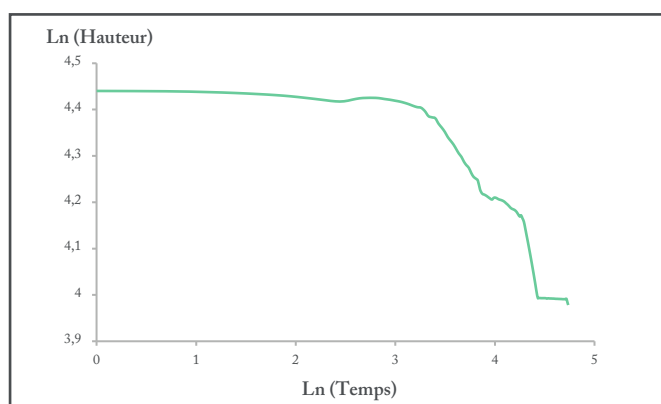
Dans l'ensemble, les pentes moyennes les plus faibles (toutes récessions confondues) sont obtenues sur les postes situés sur les entités poreuses (essentiellement alluviales), et sur celui de La Grand Combe, situé sur le karst (ancien secteur minier). Sur ces postes, les structures sont assez similaires (*e.g.* La Calmette VIGNOT et Cardet), et les paliers apparaissent parallèles, très proches, avec toutefois plus ou moins de petites variations selon les postes. Cela peut sans doute s'expliquer par des spécificités locales, mais aussi, et très certainement, par le nombre d'années pris en compte (enregistré), qui diffère d'un poste à l'autre.

Un constat similaire peut être fait sur les courbes relatives aux postes Saint Quentin la Poterie et de Bourdic F1, situés sur une entité karstique identique (643AD), mais également sur Bourdic F, la

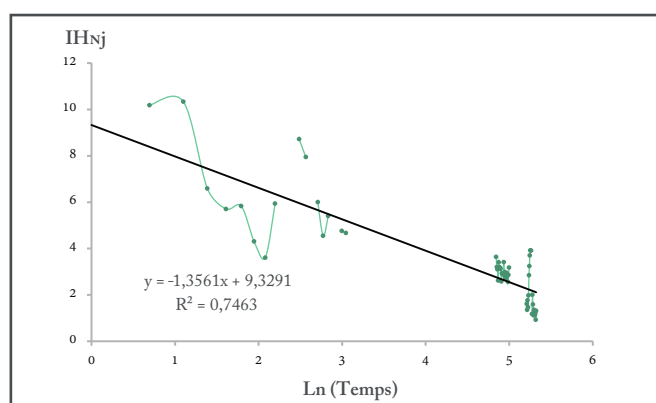
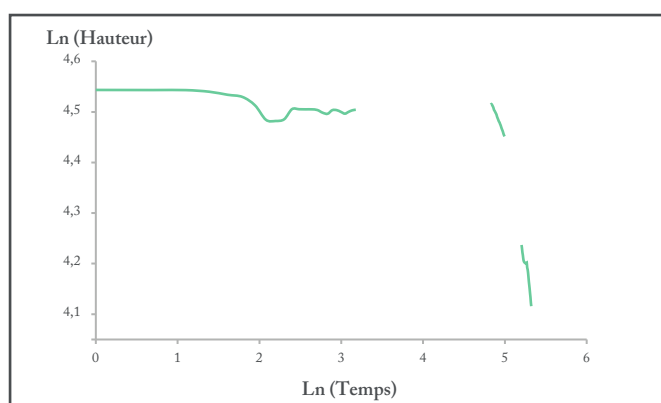
G24.3.1 DYNAMIQUE DES INDICES PIÉZOMÉTRIQUES DURANT LA RÉCESSION DE 2007



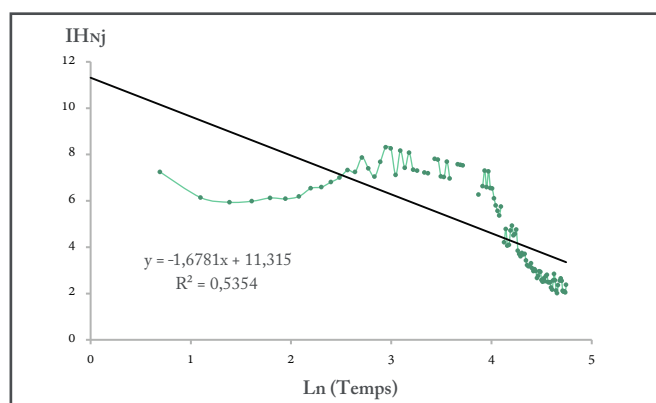
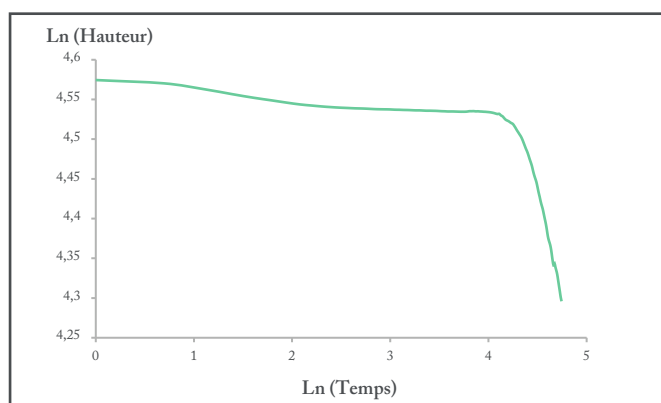
G24.3.2 DYNAMIQUE DES INDICES PIÉZOMÉTRIQUES DURANT LA RÉCESSION DE 2012



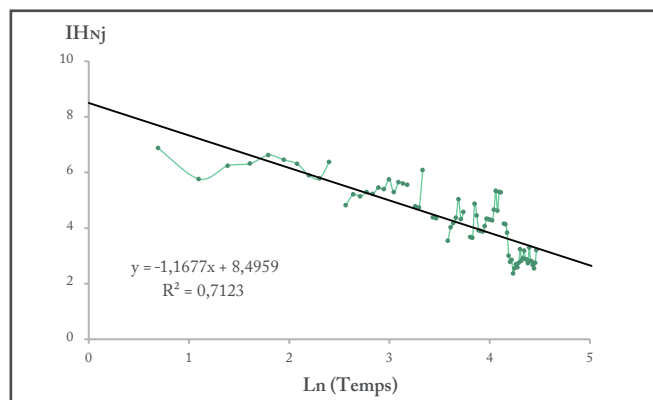
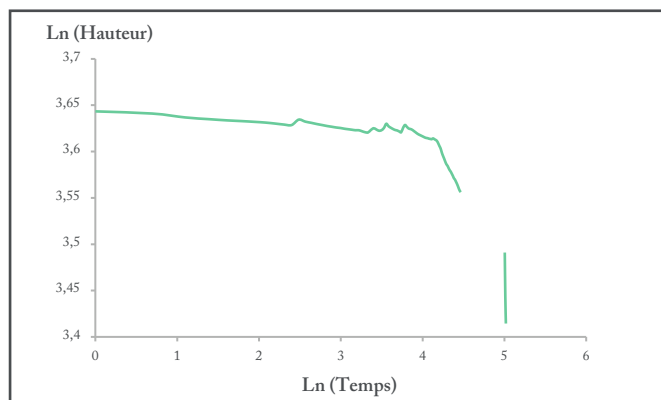
G24.3.3 DYNAMIQUE DES INDICES PIÉZOMÉTRIQUES DURANT LA RÉCESSION DE 2013



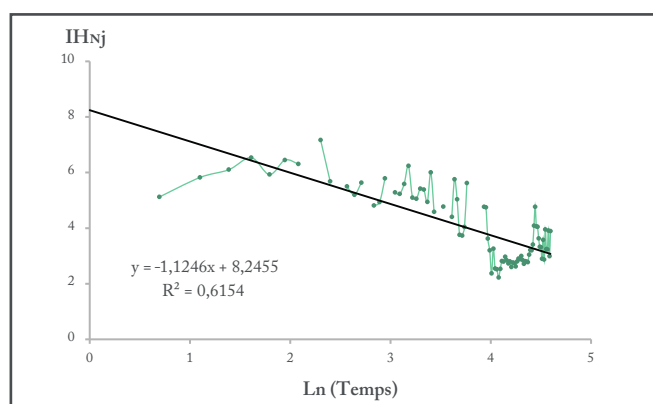
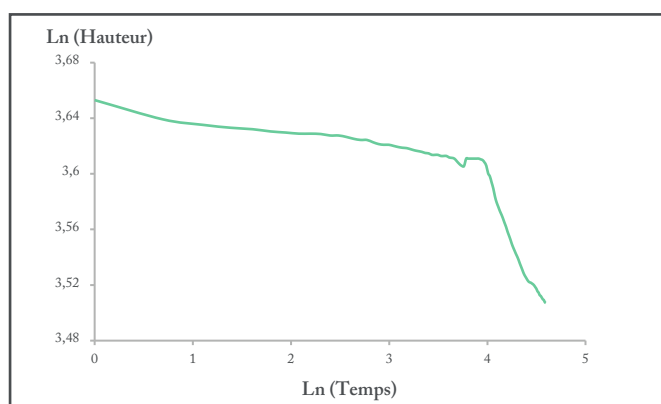
G24.3.4 DYNAMIQUE DES INDICES PIÉZOMÉTRIQUES DURANT LA RÉCESSION DE 2015



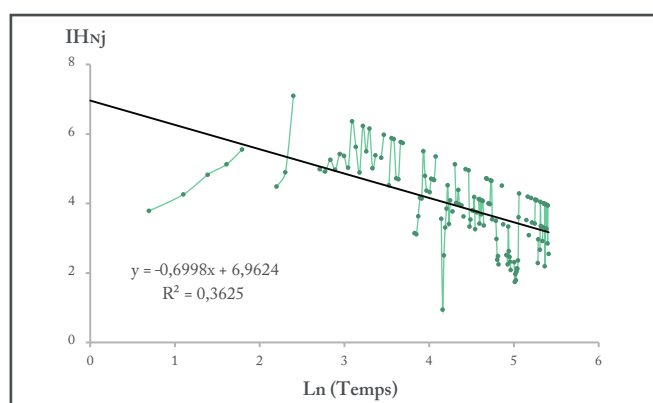
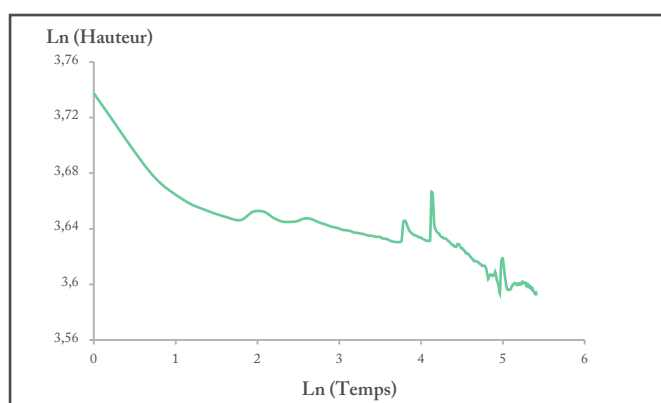
G24.4.1 DYNAMIQUE DES INDICES PIÉZOMÉTRIQUES DURANT LA RÉCESSION DE 2007



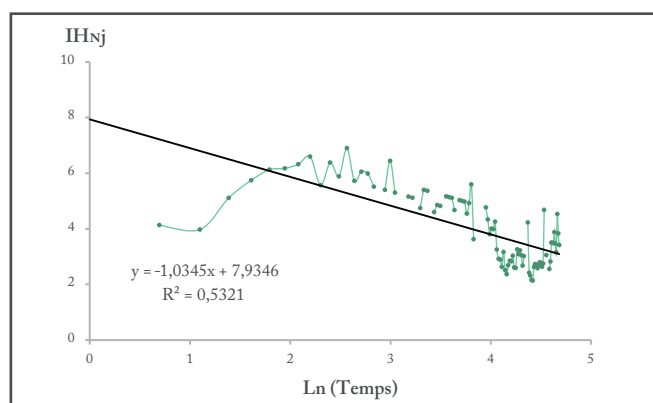
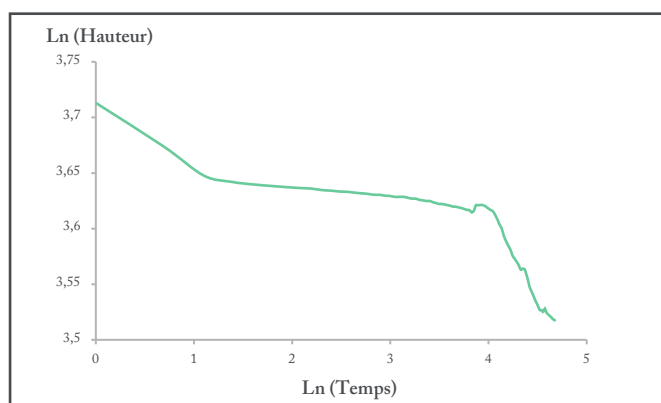
G24.4.2 DYNAMIQUE DES INDICES PIÉZOMÉTRIQUES DURANT LA RÉCESSION DE 2012



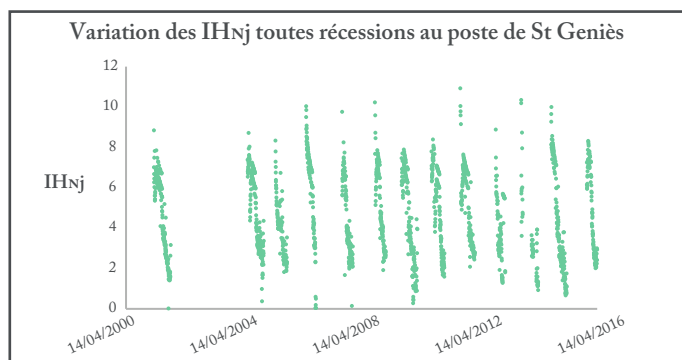
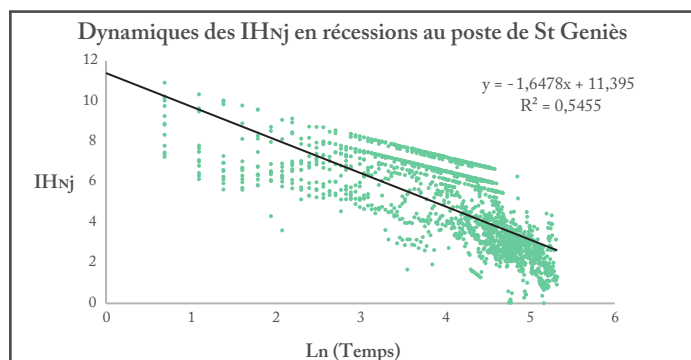
G24.4.3 DYNAMIQUE DES INDICES PIÉZOMÉTRIQUES DURANT LA RÉCESSION DE 2013



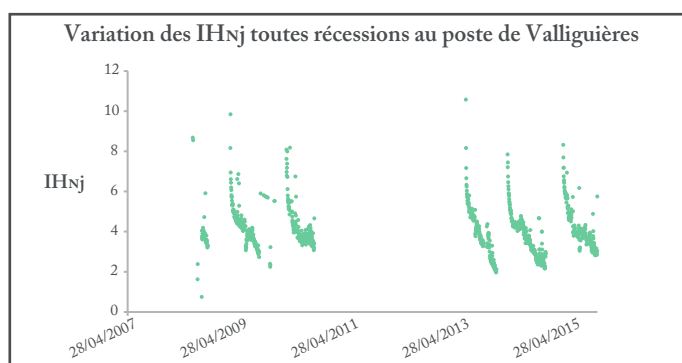
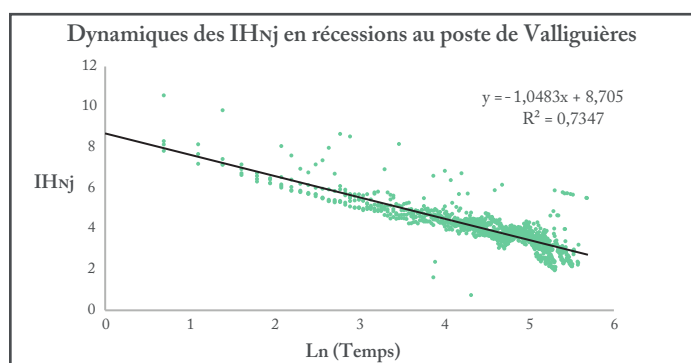
G24.4.4 DYNAMIQUE DES INDICES PIÉZOMÉTRIQUES DURANT LA RÉCESSION DE 2015



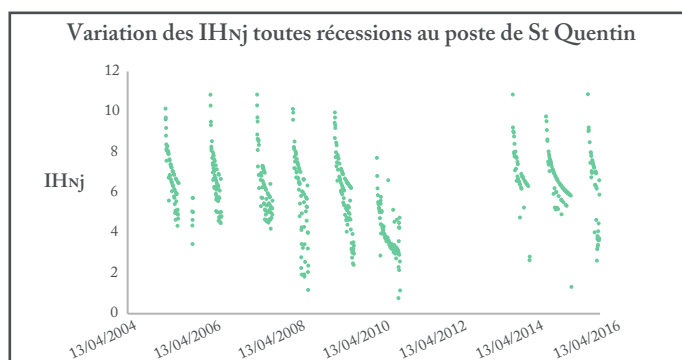
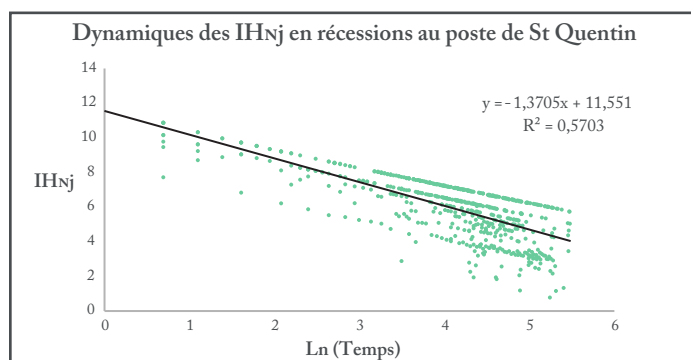
G25.1.1 VARIATION TEMPORELLE DE L'INDICE PIÉZOMÉTRIQUE AU POSTE DE ST GENIÈS DE MALGOIRÈS



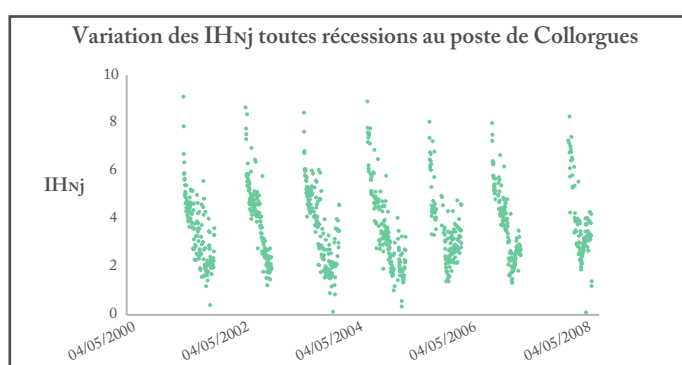
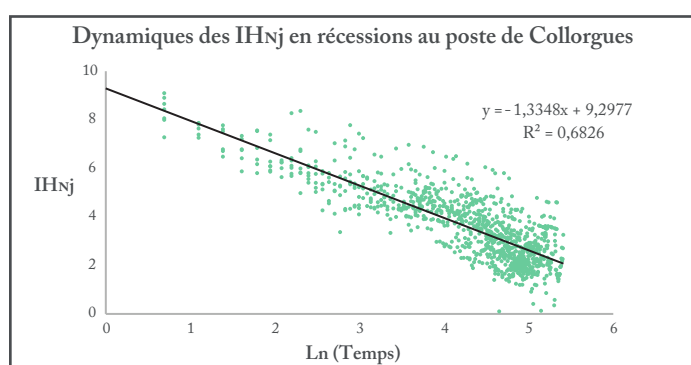
G25.1.2 VARIATION TEMPORELLE DE L'INDICE PIÉZOMÉTRIQUE AU POSTE DE VALLIGUIÈRES



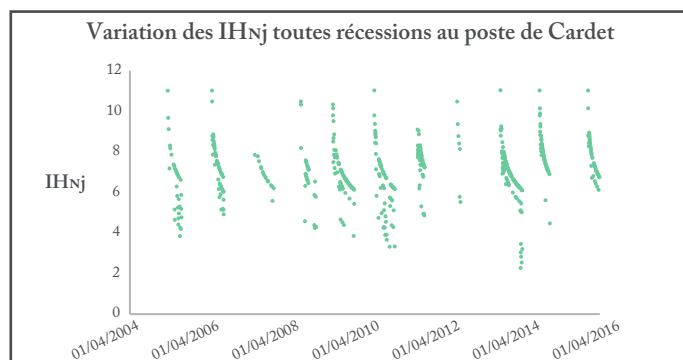
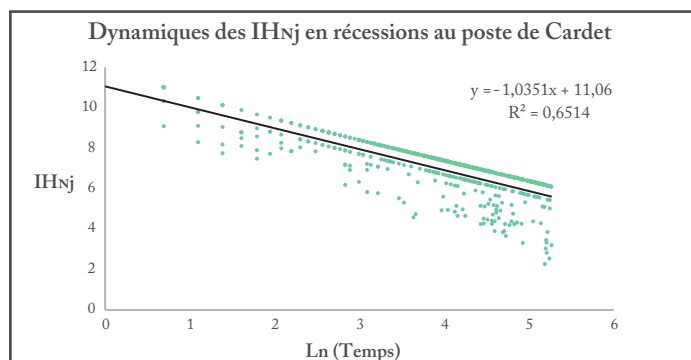
G25.1.3 VARIATION TEMPORELLE DE L'INDICE PIÉZOMÉTRIQUE AU POSTE DE ST QUENTIN LA POTERIE



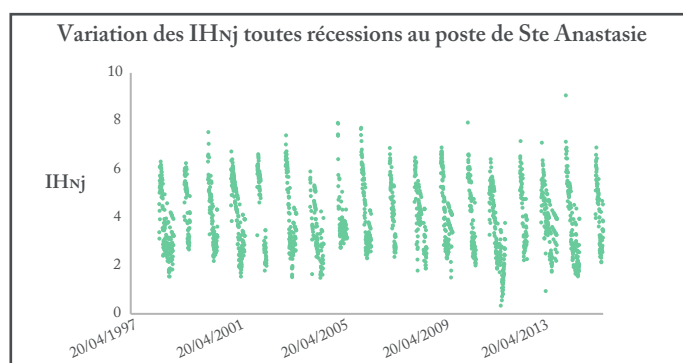
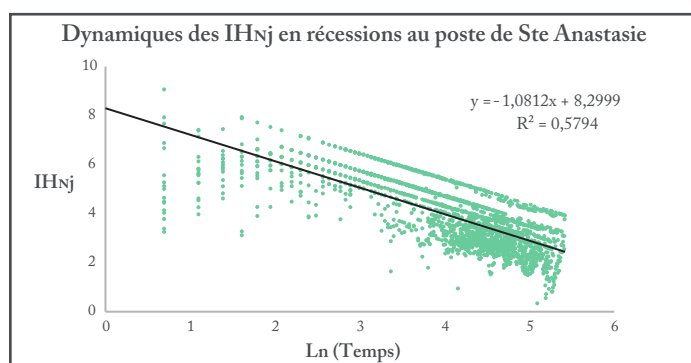
G25.1.4 VARIATION TEMPORELLE DE L'INDICE PIÉZOMÉTRIQUE AU POSTE DE COLLORGUES



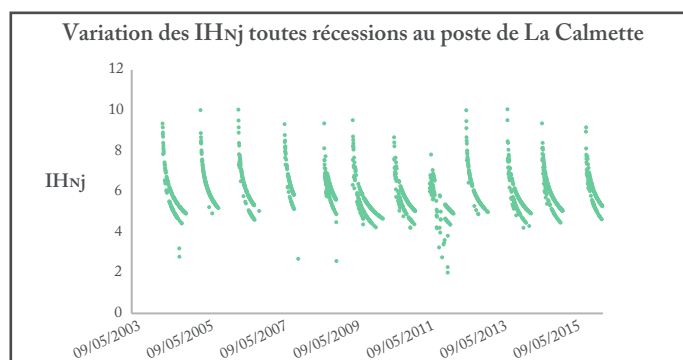
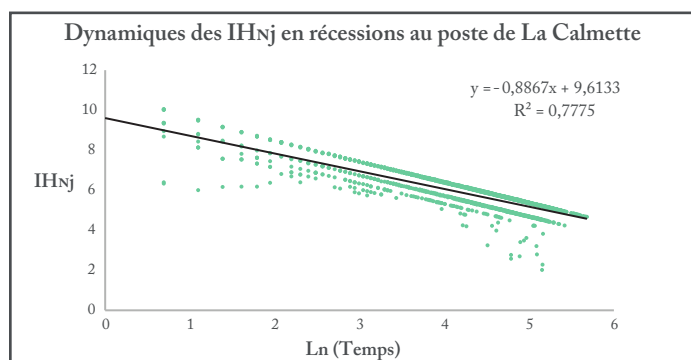
G25.2.1 VARIATION TEMPORELLE DE L'INDICE PIÉZOMÉTRIQUE AU POSTE DE CARDET



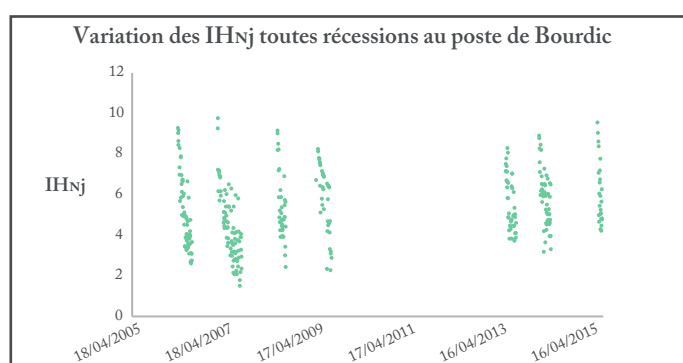
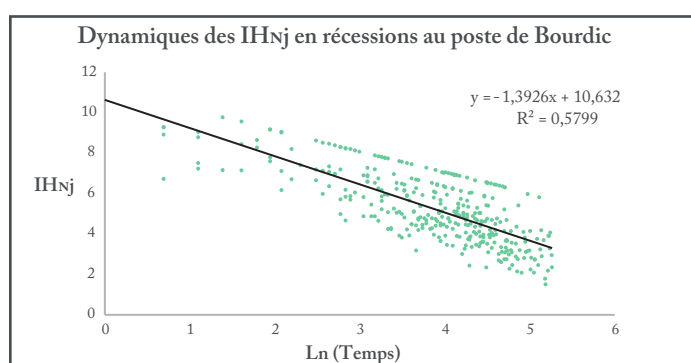
G25.2.2 VARIATION TEMPORELLE DE L'INDICE PIÉZOMÉTRIQUE AU POSTE DE SAINTE ANASTASIE



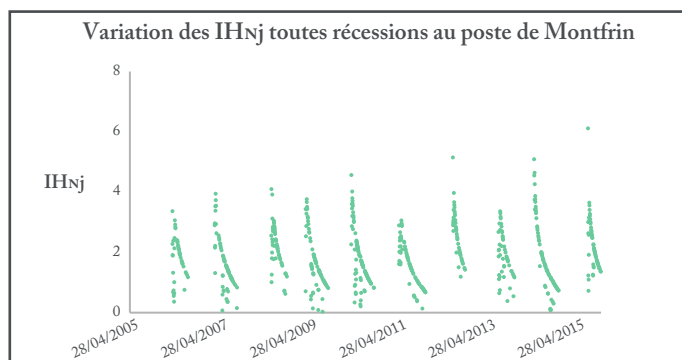
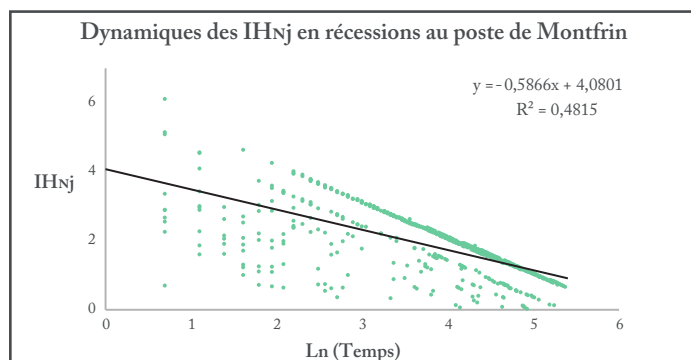
G25.2.3 VARIATION TEMPORELLE DE L'INDICE PIÉZOMÉTRIQUE AU POSTE DE LA CALMETTE - VIGNOT



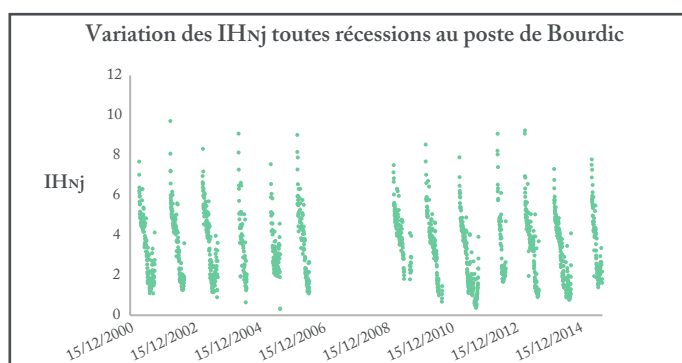
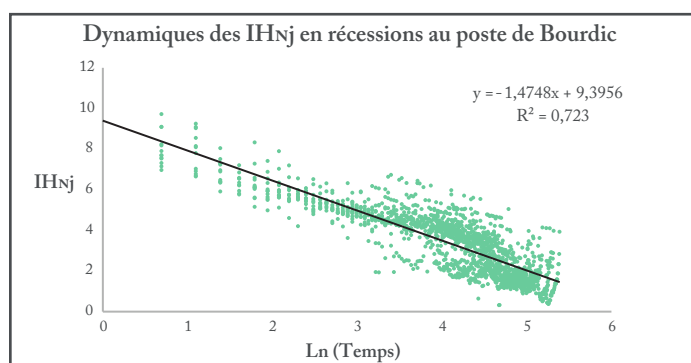
G25.2.4 VARIATION TEMPORELLE DE L'INDICE PIÉZOMÉTRIQUE AU POSTE DE BOURDIC - F1



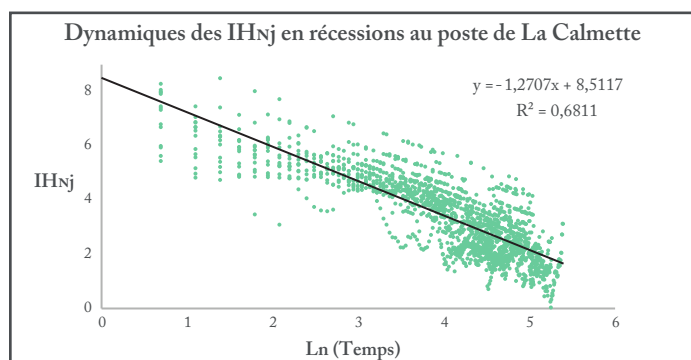
G25.3.1 VARIATION TEMPORELLE DE L'INDICE PIÉZOMÉTRIQUE AU POSTE DE MONTFRIN



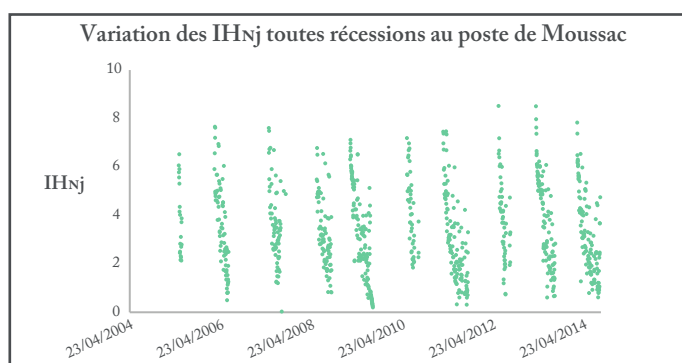
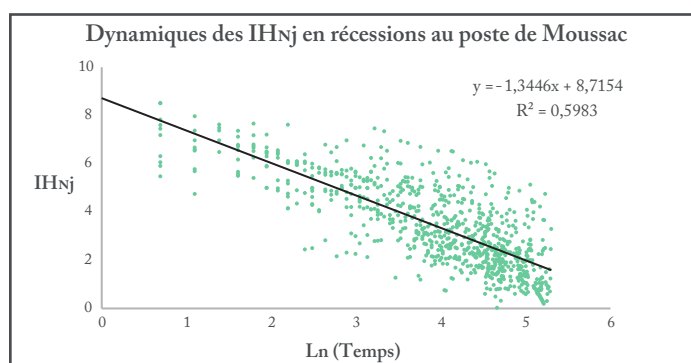
G25.3.2 VARIATION TEMPORELLE DE L'INDICE PIÉZOMÉTRIQUE AU POSTE DE BOURDIC - F



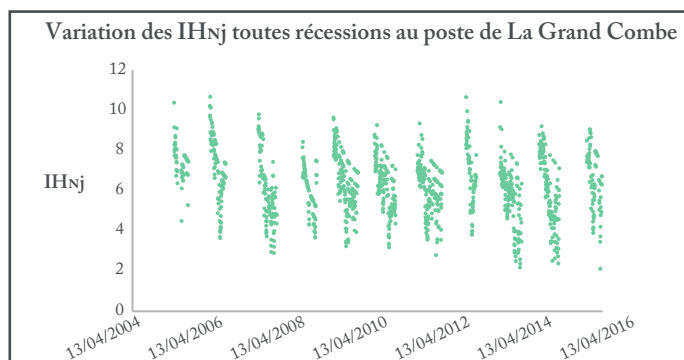
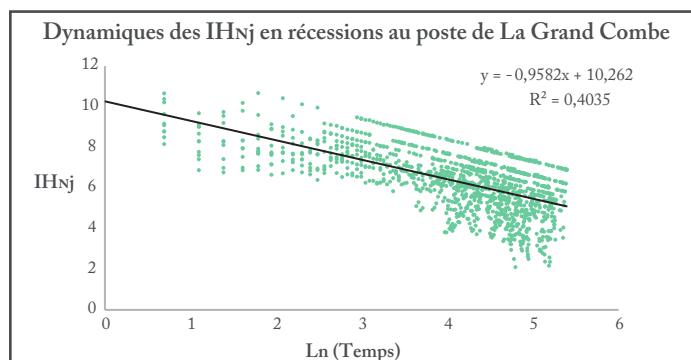
G25.3.3 VARIATION TEMPORELLE DE L'INDICE PIÉZOMÉTRIQUE AU POSTE DE LA CALMETTE - OULE



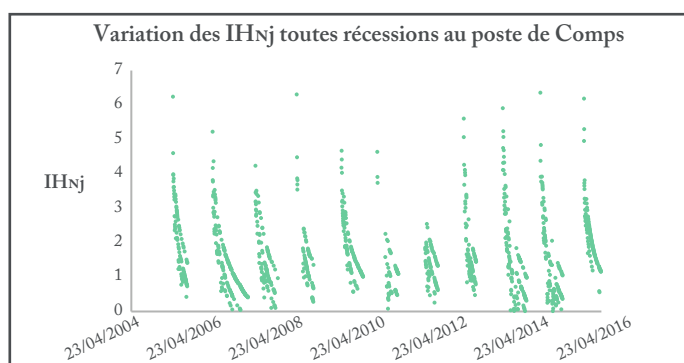
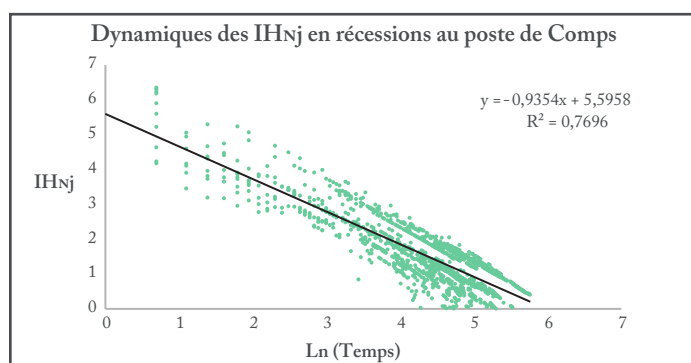
G25.3.4 VARIATION TEMPORELLE DE L'INDICE PIÉZOMÉTRIQUE AU POSTE DE MOUSSAC - PZ1



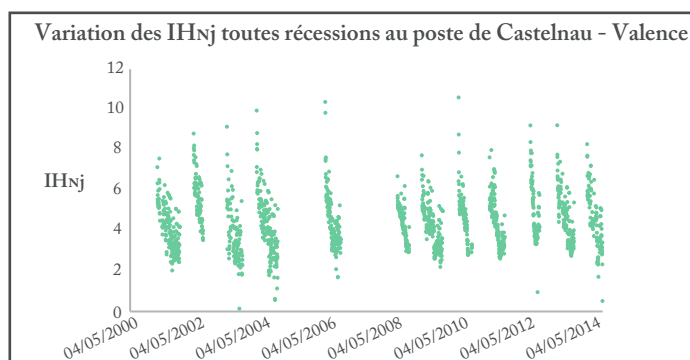
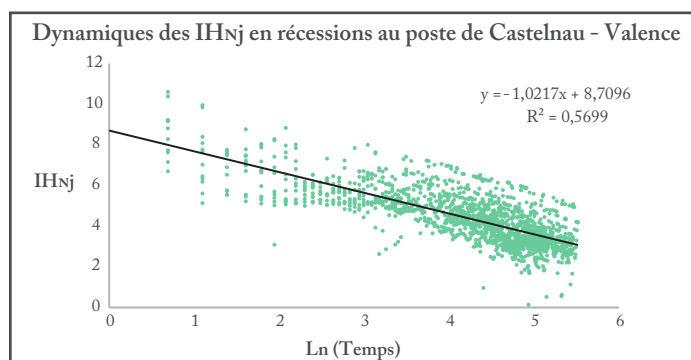
G25.4.1 VARIATION TEMPORELLE DE L'INDICE PIÉZOMÉTRIQUE AU POSTE DE LA GRAND COMBE



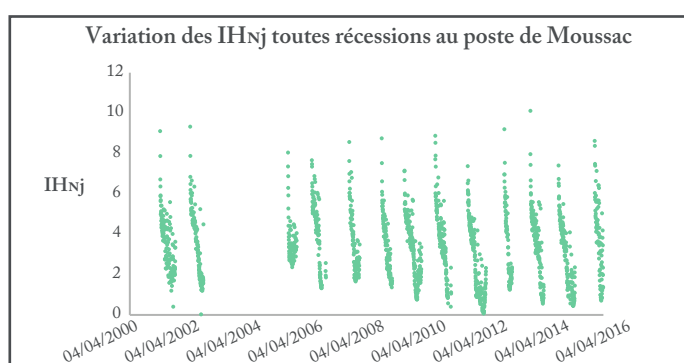
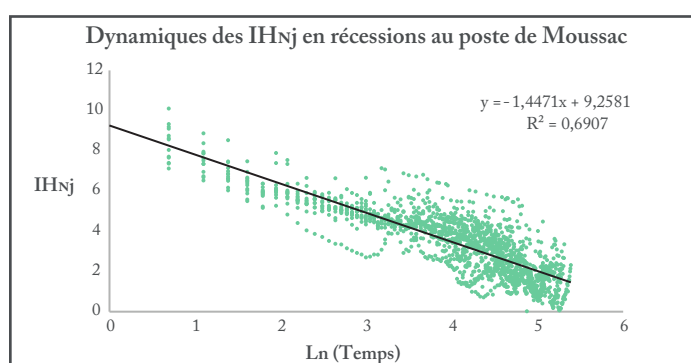
G25.4.2 VARIATION TEMPORELLE DE L'INDICE PIÉZOMÉTRIQUE AU POSTE DE COMPS



G25.4.3 VARIATION TEMPORELLE DE L'INDICE PIÉZOMÉTRIQUE AU POSTE DE CASTELNAU - VALENCE



G25.4.4 VARIATION TEMPORELLE DE L'INDICE PIÉZOMÉTRIQUE AU POSTE DE MOUSSAC - MAISON



Calmette OULE et Moussac PZI, situés sur une même autre entité karstique (534AN). De manière générale, sur ces unités, les pentes dessinées sont plus élevées, mais toutefois assez variables. Elles varient non seulement au sein d'entités similaires (entre -1,02 à Castelnau-Valence et -1,6 à Saint Geniès de Malgoirès, sur l'entité 534AN), mais aussi entre entités différentes (-0,95 à la Grand Combe (533AR), -1,37 à Saint-Quentin la Poterie (643AD) et -1,47 à Bourdic F (534AN), pour ne citer que quelques exemples).

Il n'est, par conséquent, pas non plus envisageable de retenir un poste unique pour chaque milieu (karstique et poreux) à partir de ces seuls exemples. Il faut donc étendre l'analyse à l'ensemble des postes disponibles sur le bassin des Gardons. Cela étant, il n'est pas à exclure que les résultats concluent sur la nécessité de définir un poste de référence par code d'entité hydrogéologique, voire davantage si des spécificités locales se révèlent (ce qui semble être le cas à Saint Geniès de Malgoirès, par exemple).

À partir de la représentation graphique, des indices calculés sur l'ensemble des récessions, les années les plus humides ou les plus sèches, ainsi que l'évolution interannuelle des dynamiques de vidange de récession à chaque poste, peuvent être discernées d'un simple coup d'œil. À titre d'exemple, 2009 et 2010 comptent parmi les années durant lesquelles les récessions affichent, sur la majorité des postes, les indices de début et de fin de récession les plus faibles. De même, les postes caractérisés par les minima les plus faibles (Montfrin, Bourdic F, Moussac MAISON et Comps (entre 1 et 0)) et les plus élevés (Cardet, la Grand Combe, La Calmette VIGNOT (entre 4 et 2)) sont, de la sorte, rendus clairement identifiables. Cela permet ainsi de faire une première distinction entre les postes et les années les plus potentiellement problématiques.

7.2.2 Les paramètres de loi du modèle puissance de l'indicateur en récession : une structuration hydrogéologique de l'écoulement souterrain ?

Un complément d'analyse des dynamiques de vidange souterraine en phase de récession peut être apporté par d'autres descripteurs. Ils sont ici limités aux pentes et aux surfaces spécifiques de récession du modèle de puissance (modèle d'ajustement des IH_{Nj}) et comparés sur les postes situés sur une même entité (et sur des années communes), puis sur l'ensemble des postes (et sur la totalité des années disponibles). L'objectif repose sur l'établissement d'une typologie à partir de l'un de ces descripteurs, de sorte à définir des postes de référence, puisque cela s'est avéré irréalisable à partir des seules hauteurs piézométriques.

La démarche porte par ailleurs sur la recherche d'une structuration hydrogéologique plutôt que spatiale, comme cela a été établi pour les débits.

En effet, si les entités hydrogéologiques sont globalement distribuées selon une logique amont-aval (socle en amont, plaine alluviale en aval), elles ne sont généralement pas interconnectées, et sont aussi parfois localement réparties (*e.g.* zones karstiques, linéaire alluvial entrecoupé). De surcroît, elles présentent un régime et une vulnérabilité propres, tous deux influencés par les forçages climatiques et anthropiques plus ou moins locaux (*e.g.* pratiques agricoles, artificialisation des sols).

7.2.2.1 Pentas du modèle puissance de l'indice piézométrique journalier de récession

Les pentes du modèle puissance des indices journaliers (IH_{Nj}) les plus fortes sont observées au poste de Saint Geniès de Malgoirès, tandis que les plus faibles sont enregistrées sur les postes situés sur les milieux poreux (à l'exception du karst à la Grand Combe) (ENCADRÉ E26.1). Cela s'accorde avec le constat précédemment réalisé à partir des courbes de dynamique des indices piézométriques aux postes de Massillargues-Attuech et de Cardet : la diminution des niveaux s'effectuant de manière progressive sur deux à trois paliers très proches, et à un rythme régulier, se traduisant donc par des pentes relativement faibles.

En revanche, les courbes plutôt chaotiques observées aux postes situés sur les milieux karstiques enregistrent des variations négatives (décroissance) très importantes, ce qui pourrait expliquer des pentes plus fortes. Cela est d'autant plus marqué pour les années au cours desquelles la fin de la récession est peu perturbée par les précipitations, provoquant une chute brutale des valeurs des indices, donc une augmentation de la pente.

En comparant à présent les postes situés sur des entités hydrogéologiques similaires, peu de corrélations satisfaisantes apparaissent entre les pentes, que ce soit sur le milieu karstique (à l'exception de l'entité 643AD, notée k5) ou sur le milieu poreux (ENCADRÉ E26.2). Ce constat semble confirmer l'hypothèse selon laquelle il n'existerait pas de profil unique au sein d'une même entité. Cela peut sans doute s'expliquer par l'action hétérogène de l'homme (*e.g.* prélèvements, changement de l'occupation du sol) sur ces milieux, mais aussi parce que les comparaisons sont réalisées sur un nombre trop faible d'années (entre huit et dix), parfois lacunaires. Il est par ailleurs très probable que la pente ne constitue pas un indicateur suffisamment complet pour autoriser une comparaison pertinente et révéler une structuration hydrogéologique claire.

Il est à noter enfin que le poste de Saint Geniès de Malgoirès se distingue à nouveau, en affichant des corrélations négatives, proches de zéro, avec la totalité des autres postes. Cela soulève à nouveau la question plus générale de l'origine d'une telle hétérogénéité : (mauvaise) qualité des enregistrements, configuration hydrogéologique particulière, ou encore pression anthropique plus pesante (surexploitation de la ressource), etc.

7.2.2.2 Les surfaces de récession

Afin d'affirmer ou d'infirmer l'hypothèse d'une structuration hydrogéologique, un dernier descripteur de récession est analysé. Ayant révélé précédemment une bonne cohérence structurelle de l'écoulement superficiel, les surfaces de récession sont calculées à partir des paramètres de loi du modèle de puissance des indices piézométriques journaliers. Ne disposant pas d'informations relatives à la taille des aquifères, seules les surfaces de récession (S_r) sont ici considérées, à défaut des surfaces spécifiques (SS_r).

Sur les différentes unités karstiques, les valeurs de ce descripteur sont assez variables, les plus importantes étant relatives à l'entité 533AR, et la plus faible à l'entité 534AH. Les valeurs les plus fortes se retrouvent toutefois en majorité sur le milieu poreux, plus particulièrement sur l'entité 750BF, qui,

E26.1

COMPARAISON DES PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES RÉCESSIONS SUR LES DIFFÉRENTES ENTITÉS HYDROGÉOLOGIQUES
DU BASSIN VERSANT DES GARDONS

T26.1.1

LES PENTES DE RÉCESSION DES INDICES PIÉZOMÉTRIQUES JOURNALIERS

	K1	K2	K3	K3	K3	K3	K3	K3	K4	K5	K5	P1	P2	P2	P2	P3
	Collorgues COMBET	Ste Anastasie NICOLAS	Bourdic F	Castelnau GAEI	La Calmette OULE	Moussac Pz1	Moussac MAISON	St Geniès F5	La Grand Combe HBCM	St Quentin PIEZO	Bourdic F1	Montfrin MONFR	Cardet C	La Calmette VIGNOT	Massillargues MAIRIE	Comps CNRP20
Pente Moyenne	-1,3601	-1,1061	-1,5276	-1,0455	-1,266	-1,4365	-1,4907	-1,6829	-0,9665	-1,3496	-1,5622	-0,5859	-1,0609	-0,8836	-1,031	-0,9147
Nombre d'années	7	13	11	12	7	11	14	12	11	11	11	10	13	9	18	13

T26.1.2

LES SURFACES DE RÉCESSION DES INDICES PIÉZOMÉTRIQUES JOURNALIERS

	K1	K2	K3	K3	K3	K3	K3	K3	K4	K5	K5	P1	P2	P2	P2	P3
	Collorgues COMBET	Ste Anastasie NICOLAS	Bourdic F	Castelnau GAEI	La Calmette OULE	Moussac Pz1	Moussac MAISON	St Geniès F5	La Grand Combe HBCM	St Quentin PIEZO	Bourdic F1	Montfrin MONFR	Cardet C	La Calmette VIGNOT	Massillargues MAIRIE	Comps CNRP20
Surface Moyenne	181,761	213,1034	144,9176	282,015	158,5102	134,3748	147,2665	202,3157	631,2153	367,5458	248,9962	177,026	701,7686	538,9107	629,824	84,1912
Nombre d'années	7	13	11	12	7	11	14	12	11	11	11	10	13	9	18	13

MILIEU DES ENTITÉS HYDROGÉOLOGIQUES

Karstique

K1

534 AH

K2

534 AJ

K3

534 AN

K4

533 AR

K5

643 AD

Poreux

P1

561 AJ

P2

750 BF

P3

750 AJ



E26.2

COMPARAISON DES PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES RÉCESSIONS SUR LES DIFFÉRENTES ENTITÉS HYDROGÉOLOGIQUES
DU BASSIN VERSANT DES GARDONS

T26.2.1

CORRÉLATIONS ENTRE LES CARACTÉRISTIQUES DE RÉCESSION DES ENTITÉS KARSTIQUES

		K3	K3	K3	K3	K3	K3			K5	K5
Poste		Bourdic F	Castelnau GAEI	La Calmette OULE	Moussac Pz1	Moussac MAISON	St Geniès F5	Poste		St Quentin PIEZO	Bourdic F1
Pente	Bourdic F	-	0,85	0,44	0,07	0,78	-0,39	Pente	St Quentin PIEZO	-	0,94
	Castelnau GAEI	0,85	-	0,3	0,15	0,57	-0,26		Bourdic F1	0,94	-
	La Calmette OULE	0,44	0,3	-	-0,45	0,69	-0,02	Surface	St Quentin PIEZO	-	0,77
	Moussac Pz1	0,07	0,15	-0,45	-	0,18	-0,54		Bourdic F1	0,77	-
	Moussac MAISON	0,78	0,57	0,69	0,18	-	0				
	St Geniès F5	-0,39	-0,26	-0,02	-0,54	-0,54	-				
Surface	Bourdic F	-	0,77	0,81	0,47	0,66	0,02				
	Castelnau GAEI	0,77	-	0,6	0,73	0,38	-0,12				
	La Calmette OULE	0,81	0,6	-	0,7	0,94	-0,02				
	Moussac Pz1	0,47	0,73	0,7	-	0,64	-0,27				
	Moussac MAISON	0,66	0,38	0,94	0,64	-	0,17				
	St Geniès F5	0,02	-0,12	-0,02	-0,27	0,17	-				

T26.2.2

CORRÉLATIONS ENTRE LES CARACTÉRISTIQUES DE RÉCESSION DES ENTITÉS POREUSES - ALLUVIALES

		P2	P2	P2						
Poste		Cardet C	La Calmette VIGNOT	Massillargues MAIRIE						
Pente	Cardet C	-	0,49	0,53						
	La Calmette VIGNOT	0,49	-	0,26						
	Massillargues MAIRIE	0,53	0,26	-						
Surface	Cardet C	-	0,18	0,46						
	La Calmette VIGNOT	0,18	-	-0,04						
	Massillargues MAIRIE	0,46	-0,04	-						

MILIEU DES ENTITÉS HYDROGÉOLOGIQUES

Karstique

K1

534 AH

K2

534 AJ

K3

534 AN

K4

533 AR

K5

643 AD

Poreux

P1

561 AJ

P2

750 BF

P3

750 AJ

comme souligné précédemment, affiche en moyenne une pente moins forte. Cette dernière est, de surcroît, caractérisée par une constante moyenne (en lien avec la hauteur piézométrique de début de récession) parmi les plus élevées. Ces résultats ne sont donc pas surprenants, puisque, la surface de récession se calcule à partir de la pente et la constante du modèle de puissance (voir *supra* 6.2.3.3).

Les corrélations entre les postes situés sur la même entité karstique sont nettement meilleures que celles calculées pour les pentes, excepté pour le poste de Saint Geniès de Malgoirès, qui n'affiche que des corrélations négatives, proches de zéro.

Les corrélations satisfaisantes ne signifient pas pour autant que les différents aquifères offrent des volumes en eau équivalents, sinon qu'ils réagissent de manière similaire au cours des mêmes récessions. Les postes de la Calmette OULE et de Moussac MAISON (0,94), par exemple, offrent la même information sur la dynamique de vidange en récession. Il pourrait ainsi être envisagé de ne retenir qu'un seul des deux postes, comme référent de l'unité 534AN. En revanche, pour d'autres postes situés sur une entité identique, voire sur une même commune (Moussac PZI et Moussac MAISON) ou encore deux communes voisines (Massillargues-Attuech et Cardet), les corrélations sont nettement moins bonnes.

Cela introduit à nouveau la question des facteurs responsables de ces hétérogénéités, dont la qualité des mesures (*e.g.* la validité des données), le nombre d'années considérées, ainsi que les spécificités et les pressions locales, qu'il faudrait définitivement identifier et caractériser.

Dans l'ensemble, et pour une approche annuelle globale et synthétique, cet indicateur apparaît mieux adapté que la seule pente du modèle de puissance pour caractériser l'état du volume souterrain en récession, et plus particulièrement pour le milieu karstique. En effet, sur la même entité poreuse (750BF), les corrélations entre les postes n'offrent aucune perspective de définition d'un poste de référence.

Conclusion — Les indices piézométriques (IH_{Nj}) présentent une variabilité moins forte que celle observée sur les indices volumiques journaliers (I_{vj}). Une meilleure stabilisation de l'information sera toutefois proposée en changeant le pas de calcul de l'indice (sur 3, 6 jours, etc.) ou en effectuant un lissage des valeurs journalières (moyennes sur 3, 6, 9 jours, etc.) (Voir CHAPITRE 10).

Par ailleurs, l'indice piézométrique a révélé une structuration par paliers de la vidange des aquifères, qu'il est possible d'appréhender à l'aide de la pente du modèle de vidange (*i.e.* la pente du modèle de puissance), voire de la surface sous la récession, qui semble plus adaptée, notamment sur les entités karstiques.

Cela étant, une amélioration de l'analyse pourrait être faite en recherchant, pour chaque valeur de $\ln(t)$, la valeur maximale et la valeur minimale de l'IH_{Nj} (FIGURE 7.6). Il serait ensuite possible de calculer des régressions de puissance pour IH_{Nj} max *vs.* $\ln(t)$ et pour IH_{Nj} min *vs.* $\ln(t)$, à partir desquelles, les valeurs des surfaces de récessions (SR_{max} et SR_{min}) pourraient être obtenues. Deux droites-enveloppe seraient ainsi obtenues, les deux surfaces de récession rendant compte des limites de variation du stockage de l'aquifère.

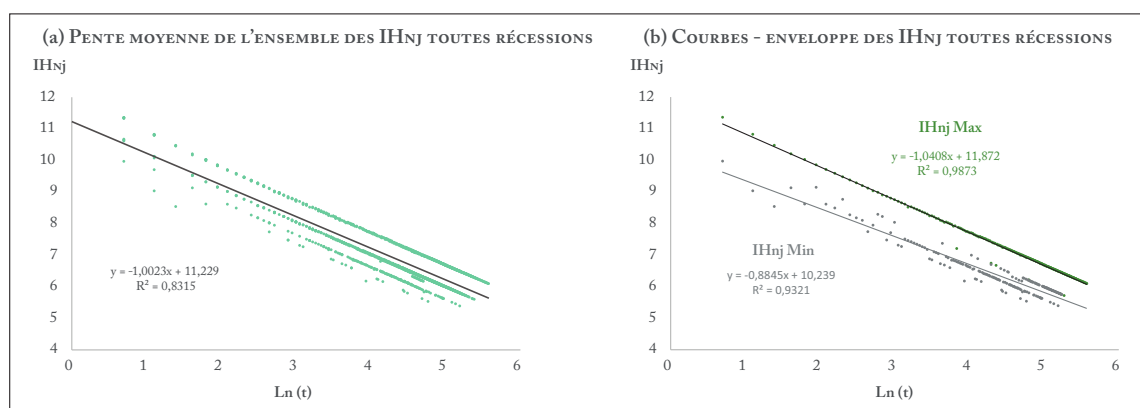


FIGURE 7.6 : DÉTERMINATION DES COURBES-ENVELOPPE DU MODÈLE DE VIDANGE DE L'AQUIFÈRE À MASSILARGUES-ATTUECH

Toutefois, afin de réaliser une comparaison sur l'ensemble des indicateurs du modèle final de basses eaux (*i.e.* issus des débits, des hauteurs de nappe, et des précipitations (voir CHAPITRE 8)), dans des temporalités (*e.g.* phase hydrologique, saison, date) et à des résolutions spatiales et temporelles identiques, les indices piézométriques journaliers sont conservés pour l'analyse journalière et les surfaces spécifiques de récessions sont ici seulement suggérées en vue d'une analyse annuelle.

7.3 Structure statistique de l'indicateur retenu et détermination des seuils de criticité

Dans une démarche analogue à celle menée sur les indices volumiques journaliers (pour caractériser l'état du volume superficiel), la recherche de la structure statistique de l'indicateur piézométrique journalier (IHnj) est dans un premier temps effectuée. Une fois cette dernière mise en évidence, la série est ajustée à la loi correspondante, et les seuils statistiques de criticité sont alors définis.

7.3.1 Détermination de la loi statistique pour l'ajustement de la distribution de l'indicateur

Il est supposé que la distribution des valeurs de l'indice piézométrique journalier, calculées sur l'ensemble des récessions, est gaussienne (ou peut être ramenée à une distribution gaussienne), comme cela s'est avéré pour les valeurs de l'indicateur de l'écoulement superficiel journalier.

Pour s'en assurer, l'histogramme représentant la répartition des valeurs (effectifs) par classe est construit (FIGURE 7.7). L'exemple pris au poste de Cardet confirme la structure subgaussienne de la distribution des valeurs des indices journaliers. Cependant, à l'inverse de la structure identifiée pour les indices volumiques journaliers, les classes des valeurs les plus élevées sont mieux représentées ici que celles des valeurs les plus faibles. Cela est vraisemblablement lié à l'effet inertiel de début de récession, révélé précédemment par les courbes de vidange.

En effet, au cours de cette première phase de vidange, les valeurs restent élevées, sur un temps plus ou moins long suivant la nature de l'aquifère, avant de décroître plus rapidement, au cours

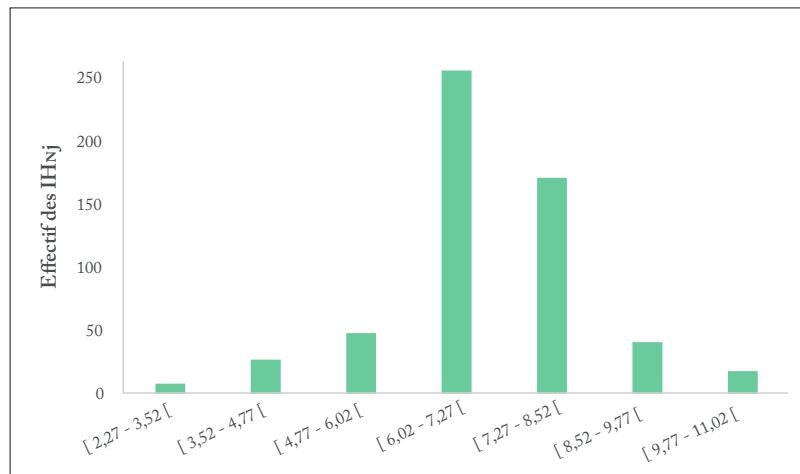


FIGURE 7.7 : EFFECTIF PAR CLASSE DES IHnj AU POSTE DE CARDET – 10 RÉCESSIONS

d'une seconde phase, correspondant probablement au tarissement. Les valeurs les plus faibles correspondent donc à la fin de récession, et, étant donné la plus grande régularité caractéristique des aquifères souterrains, ces valeurs n'oscillent pas et sont par conséquent moins nombreuses.

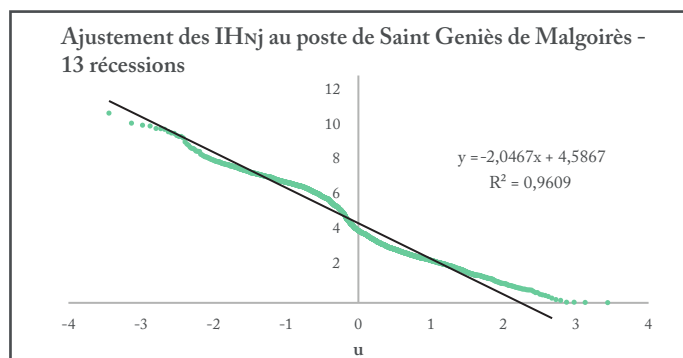
Les séries de chaque poste sont ensuite ajustées à l'aide de la droite de Henri (ENCADRÉS E27.1 à E27.4). Quatre structurations statistiques semblent se profiler :

- Une linéarisation presque parfaite des valeurs est d'abord observable aux postes de La Grand Combe et Saint Quentin la Poterie (peu d'écarts au modèle), situés sur des unités karstiques.
- Une deuxième structuration, caractérisée par un détachement des valeurs extrêmes faibles (*i.e.* de fin de récession) de la droite d'ajustement, est distinguée sur les postes de Sainte Anastasie, La Calmette OULE, Moussac PZI, Saint Geniès de Malgoirès et de Bourdic F1, situés également en milieu karstique.
- Sur les postes de La Calmette VIGNOT (en milieu poreux) et de Castelnau-Valence (en milieu karstique), une structuration similaire s'observe, mais sur les valeurs extrêmes élevées (*i.e.* de début de récession).
- Enfin, sur les autres postes, ces deux structures sont conjointement constatées. Les valeurs extrêmes (dans l'humide comme dans le sec) ne s'ajustent pas correctement, et la distribution tend vers une forme légèrement courbée à chacune de ses extrémités (« S » inversé). La forme particulière de début de phase est sans doute imputable au découpage de la chronique en phase de récession, telle que définie ici.

Cela étant, l'ensemble des ajustements demeure relativement satisfaisants (R^2 supérieur à 0,90) pour autoriser la discrétisation des états en fonction de seuils statistiques. L'ajustement pourrait toutefois être amélioré sur les postes pour lesquels sont observés les écarts les plus importants sur les valeurs extrêmes des séries, en ajustant la série constituée de la racine carrée des valeurs de l'IHnj, par exemple (FIGURE 7.8).

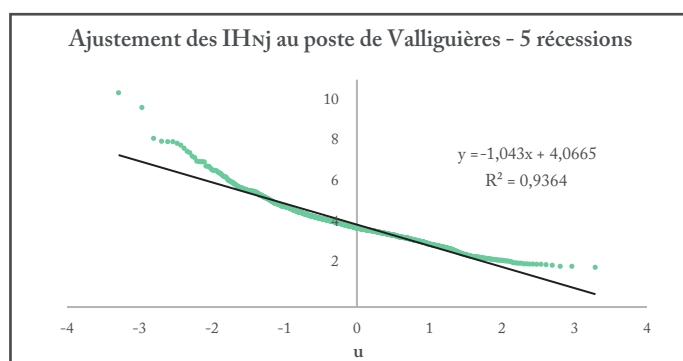
G27.1.1 SEUILS DE CRITICITÉ AU POSTE DE SAINT GENIÈS DE MALGOIRÈS - 09387X0059/F5

Rang	Fréquence	IH _{Nj} _Récession	u
1	0,00029189	10,9168666	-3,43904455
2	0,00087566	10,3402185	-3,12945424
3	0,00145943	10,2259596	-2,9761568
⋮	⋮	⋮	⋮
1711	0,99854057	0,03618589	2,9761568
1712	0,99912434	0,03402984	3,12945424
1713	0,99970811	0,01192887	3,43904455



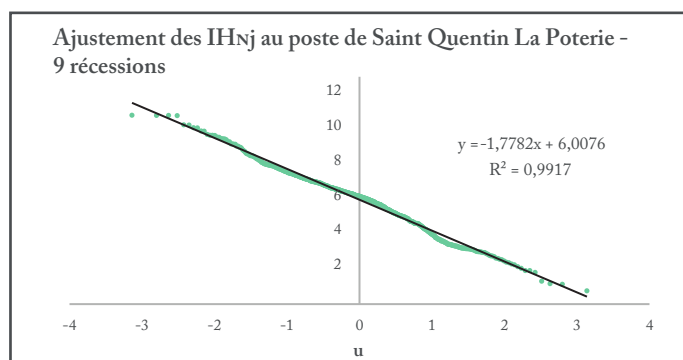
G27.1.2 SEUILS DE CRITICITÉ AU POSTE DE VALLIGUIÈRES - 09398X0028/VALL

Rang	Fréquence	IH _{Nj} _Récession	u
1	0,00050505	10,57063	-3,28769808
2	0,00151515	9,83985399	-2,96464713
3	0,00252525	8,32226199	-2,80379472
⋮	⋮	⋮	⋮
988	0,99747475	2,01155442	2,80379472
989	0,99848485	2,00972334	2,96464713
990	0,99949495	1,96676533	3,28769808



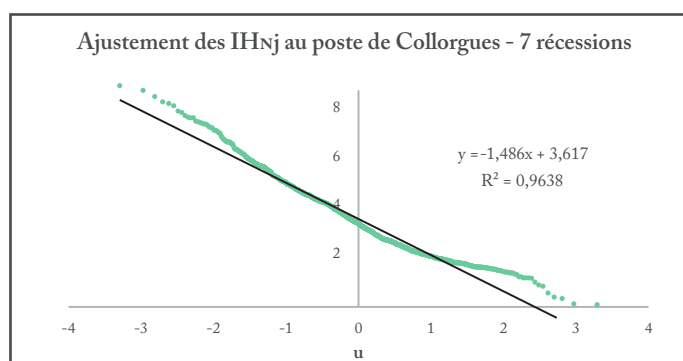
G27.1.3 SEUILS DE CRITICITÉ AU POSTE DE SAINT QUENTIN LA POTERIE - 09392X0045/PIÉZO

Rang	Fréquence	IH _{Nj} _Récession	u
1	0,00085324	10,8683243	-3,1370647
2	0,00255973	10,8578287	-2,79941976
3	0,00426621	10,8563248	-2,6302415
⋮	⋮	⋮	⋮
584	0,99573379	1,17902035	2,6302415
585	0,99744027	1,15096804	2,79941976
586	0,99914676	0,77284002	3,1370647



G27.1.4 SEUILS DE CRITICITÉ AU POSTE DE COLLORGUES - 09384X0005/COMBET

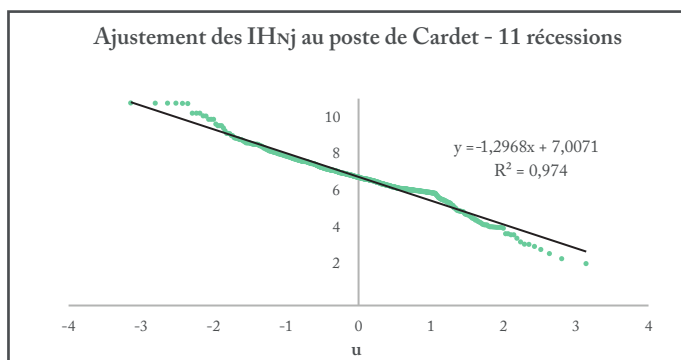
Rang	Fréquence	IH _{Nj} _Récession	u
1	0,00049505	9,09665323	-3,29332515
2	0,00148515	8,90115708	-2,97079529
3	0,00247525	8,65119931	-2,81023752
⋮	⋮	⋮	⋮
1008	0,99752475	0,34872076	2,81023752
1009	0,99851485	0,12720405	2,97079529
1010	0,99950495	0,09997245	3,29332515



E27.2 DÉFINITION DES SEUILS DE CRITICITÉ DE L'INDICE PIÉZOMÉTRIQUE JOURNALIER À CHAQUE POSTE DE MESURE DE HAUTEUR PIÉZOMÉTRIQUE - BASE RÉCESSION

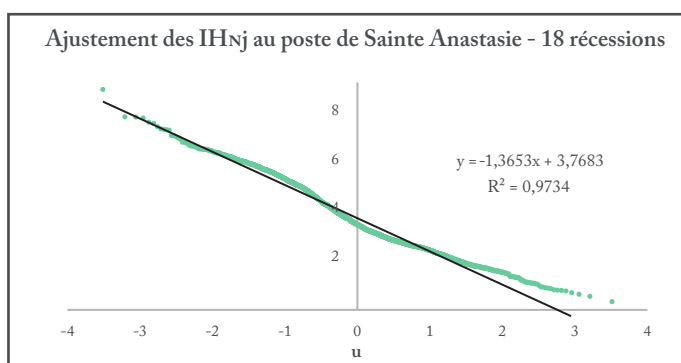
G27.2.1 SEUILS DE CRITICITÉ AU POSTE DE CARDET - 09382X0052/C

Rang	Fréquence	IHNj_Récession	u
1	0,00084602	11,0262106	-3,13955485
2	0,00253807	11,021269	-2,80216172
3	0,00423012	11,0190908	-2,63312835
⋮	⋮	⋮	⋮
589	0,99576988	2,82498766	2,63312835
590	0,99746193	2,54572583	2,80216172
591	0,99915398	2,27362727	3,13955485



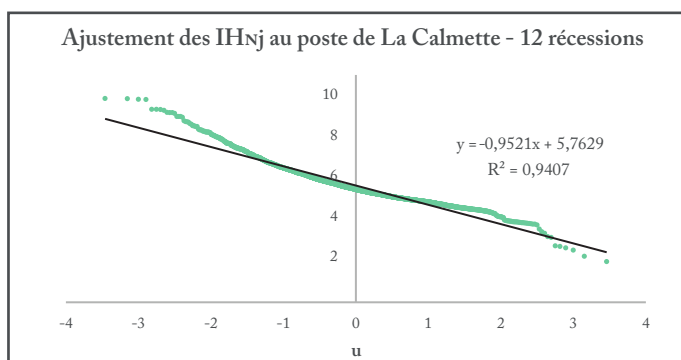
G27.2.2 SEUILS DE CRITICITÉ AU POSTE DE SAINTE ANASTASIE - 09395X0065/NICOLA

Rang	Fréquence	IHNj_Récession	u
1	0,00022321	9,06335071	-3,51099752
2	0,00066964	7,93518439	-3,20742587
3	0,00111607	7,92349153	-3,05746959
⋮	⋮	⋮	⋮
2238	0,99888393	0,6438351	3,05746959
2239	0,99933036	0,55583616	3,20742587
2240	0,99977679	0,34081405	3,51099752



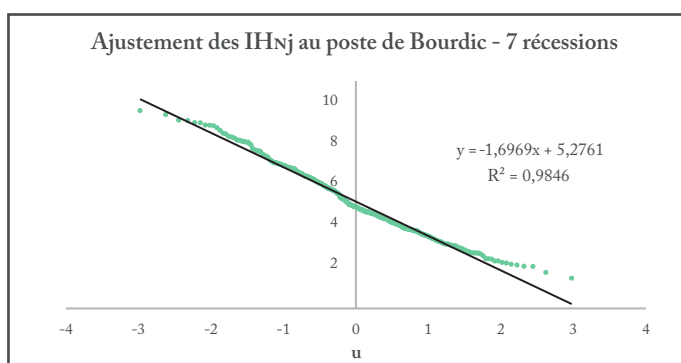
G27.2.3 SEUILS DE CRITICITÉ AU POSTE DE LA CALMETTE - 09388X0052/VIGNOT

Rang	Fréquence	IHNj_Récession	u
1	0,00027086	10,0553368	-3,45923512
2	0,00081257	10,0444003	-3,15135732
3	0,00135428	10,0161405	-2,99901283
⋮	⋮	⋮	⋮
1844	0,99864572	2,57734864	2,99901283
1845	0,99918743	2,2759771	3,15135732
1846	0,99972914	2,01501573	3,45923512



G27.2.4 SEUILS DE CRITICITÉ AU POSTE DE BOURDIC - 09395X0059/F1

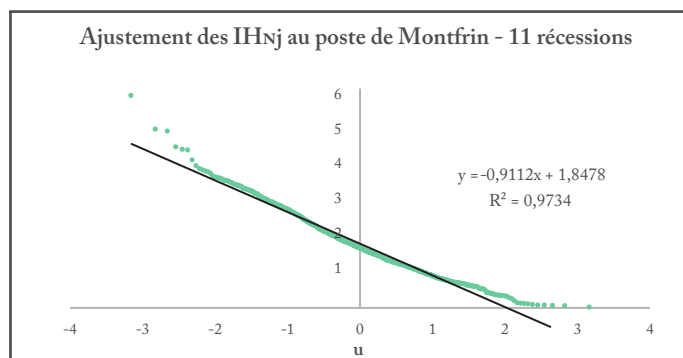
Rang	Fréquence	IHNj_Récession	u
1	0,00145773	9,7689796	-2,97651461
2	0,00437318	9,55974289	-2,62181242
3	0,00728863	9,28795638	-2,44271461
⋮	⋮	⋮	⋮
341	0,99271137	2,07794918	2,44271461
342	0,99562682	1,78433386	2,62181242
343	0,99854227	1,50068969	2,97651461



E27.3 DÉFINITION DES SEUILS DE CRITICITÉ DE L'INDICE PIÉZOMÉTRIQUE JOURNALIER À CHAQUE POSTE DE MESURE DE HAUTEUR PIÉZOMÉTRIQUE - BASE RECESSION

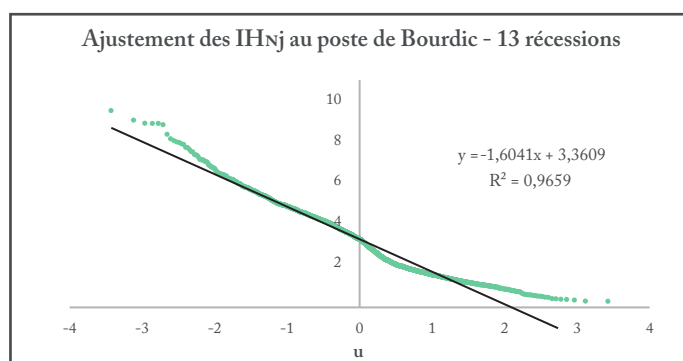
G27.3.1 SEUILS DE CRITICITÉ AU POSTE DE MONTFRIN - 09654X0575/MONTFR

Rang	Fréquence	IH _{Nj} _Récession	u
1	0,00078989	6,11365989	-3,15961474
2	0,00236967	5,14644817	-2,82423674
3	0,00394945	5,08750211	-2,65636128
⋮	⋮	⋮	⋮
631	0,99605055	0,07045518	2,65636128
632	0,99763033	0,06541474	2,82423674
633	0,99921011	0,02384439	3,15961474



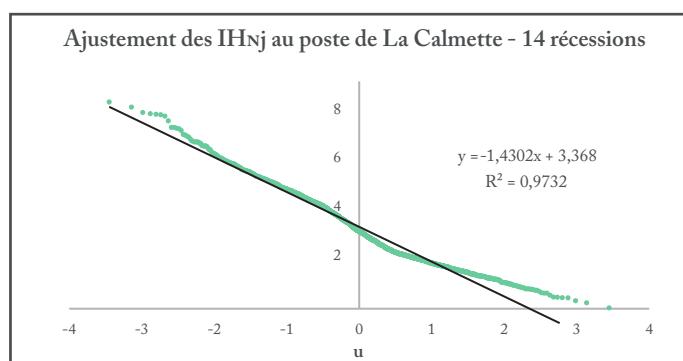
G27.3.2 SEUILS DE CRITICITÉ AU POSTE DE BOURDIC - 09395X0067/F

Rang	Fréquence	IH _{Nj} _Récession	u
1	0,00030581	9,7182665	-3,42640805
2	0,00091743	9,24227012	-3,11573636
3	0,00152905	9,08597507	-2,96183623
⋮	⋮	⋮	⋮
1633	0,99847095	0,36702523	2,96183623
1634	0,99908257	0,32161159	3,11573636
1635	0,99969419	0,30914039	3,42640805



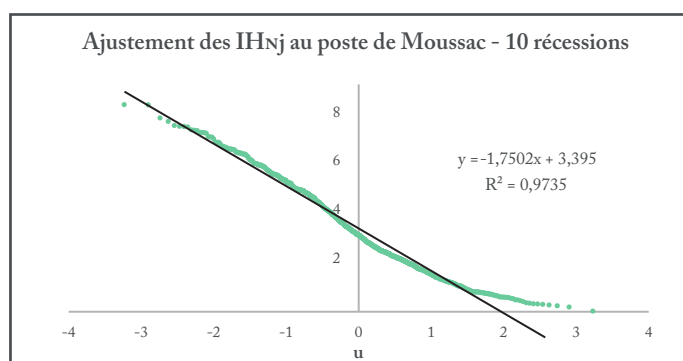
G27.3.3 SEUILS DE CRITICITÉ AU POSTE DE LA CALMETTE - 09388X011/OULE

Rang	Fréquence	IH _{Nj} _Récession	u
1	0,00028313	8,50002042	-3,44728475
2	0,00084938	8,29223077	-3,13839562
3	0,00141563	8,06825566	-2,98548858
⋮	⋮	⋮	⋮
1764	0,99858437	0,32953072	2,98548858
1765	0,99915062	0,24782548	3,13839562
1766	0,99971687	0,03336659	3,44728475



G27.3.4 SEUILS DE CRITICITÉ AU POSTE DE MOUSSAC - 09388X0108/Pz1

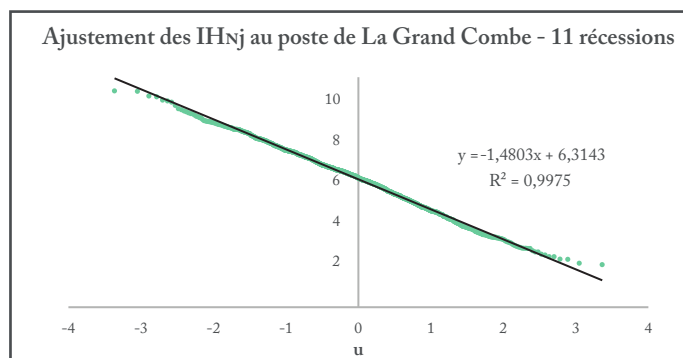
Rang	Fréquence	IH _{Nj} _Récession	u
1	0,00061501	8,51556426	-3,23182763
2	0,00184502	8,5026777	-2,90351127
3	0,00307503	7,96476162	-2,73967152
⋮	⋮	⋮	⋮
811	0,99692497	0,24788309	2,73967152
812	0,99815498	0,19578029	2,90351127
813	0,99938499	0,02528148	3,23182763



E27.4 DÉFINITION DES SEUILS DE CRITICITÉ DE L'INDICE PIÉZOMÉTRIQUE JOURNALIER À CHAQUE POSTE DE MESURE DE HAUTEUR PIÉZOMÉTRIQUE - BASE RÉCESSION

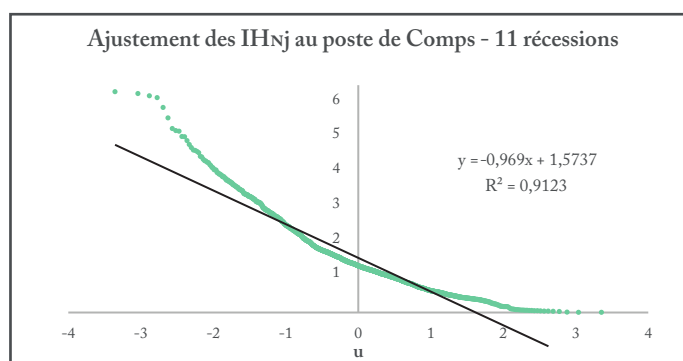
G27.4.1 SEUILS DE CRITICITÉ AU POSTE DE LA GRAND COMBE - 09125X0083/HBCM

Rang	Fréquence	IHNj_Récession	u
1	0,0003858	10,6719688	-3,36278478
2	0,00115741	10,6548538	-3,04655324
3	0,00192901	10,4165504	-2,88954281
⋮	⋮	⋮	⋮
1294	0,99807099	2,3647457	2,88954281
1295	0,99884259	2,16993015	3,04655324
1296	0,9996142	2,10437175	3,36278478



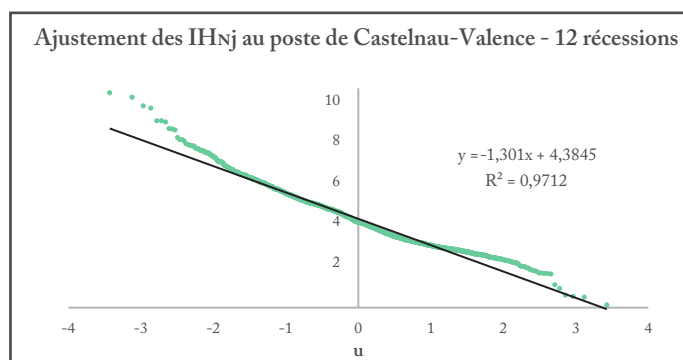
G27.4.2 SEUILS DE CRITICITÉ AU POSTE DE COMPS - 09654X0569/CNRP20

Rang	Fréquence	IHNj_Récession	u
1	0,00039714	6,35414401	-3,35478003
2	0,00119142	6,30244818	-3,03783504
3	0,0019857	6,23643206	-2,88042408
⋮	⋮	⋮	⋮
1257	0,9980143	0,01348531	2,88042408
1258	0,99880858	0,0095011	3,03783504
1259	0,99960286	0,00949112	3,35478003



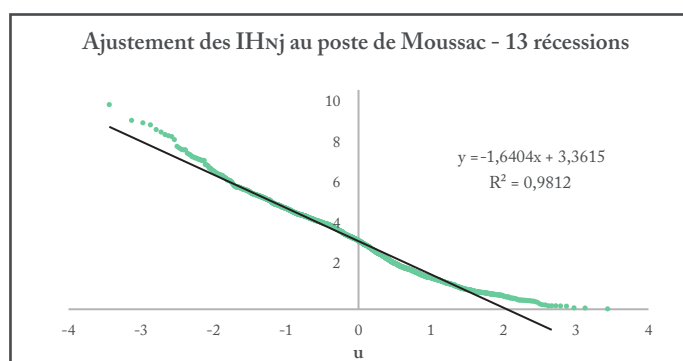
G27.4.3 SEUILS DE CRITICITÉ AU POSTE DE CASTELNAU - VALENCE - 09384X0014/GAEI

Rang	Fréquence	IHNj_Récession	u
1	0,00030358	10,6020473	-3,42839357
2	0,00091075	10,3813969	-3,11789228
3	0,00151791	9,95546343	-2,96408718
⋮	⋮	⋮	⋮
1645	0,99848209	0,56252936	2,96408718
1646	0,99908925	0,51666932	3,11789228
1647	0,99969642	0,13484954	3,42839357



G27.4.4 SEUILS DE CRITICITÉ AU POSTE DE MOUSSAC - 09388X0114/MAISON

Rang	Fréquence	IHNj_Récession	u
1	0,00029394	10,1010042	-3,437141
2	0,00088183	9,32356572	-3,12738827
3	0,00146972	9,1938672	-2,97400035
⋮	⋮	⋮	⋮
1699	0,99853028	0,07412649	2,97400035
1700	0,99911817	0,06566745	3,12738827
1701	0,99970606	0,02085214	3,437141



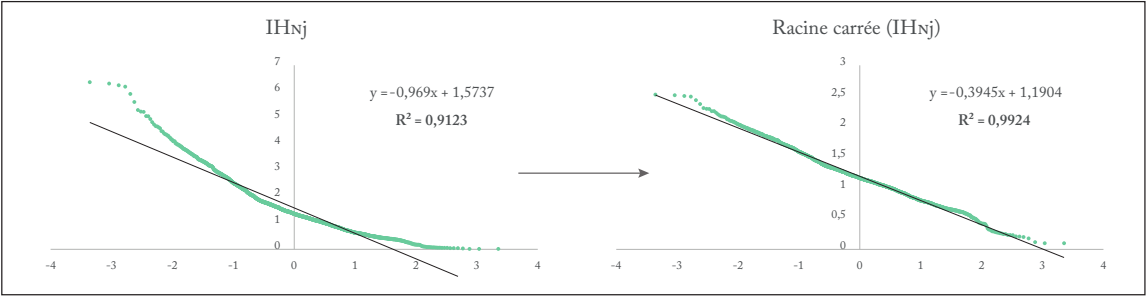


FIGURE 7.8 : AJUSTEMENTS DES SÉRIES DE VALEURS DES INDICES (ANAMORPHOSE), EXEMPLE AU POSTE DE COMPS – 11 RÉCESSIONS







Etats de criticité		Intervalles (σ) - Seuils 1	Effectif - Seuils 1	Intervalles (σ) - Seuils 2	Effectif - Seuils 2
	Etat humide	< -1	8	< -0,5	22
	Etat moyen	[-1 ; 0 [	38	[-0,5 ; 0,5 [	56
	Etat sub-critique	[0 ; 1 [	61	[0,5 ; 1,5 [	41
	Etat critique	[1 ; 2 [	12	[1,5 ; 2,5 [	2
	Etat super-critique	[2 ; 3 [	5	[2,5 ; 3,5 [	4
	Etat exceptionnel	> 3	1	> 3,5	0

FIGURE 7.9 : RÉPARTITION DES VALEURS JOURNALIÈRES DE L'INDICATEUR DANS LES ÉTATS DE CRITICITÉ SELON LES CLASSES DE SEUILS - EXEMPLE AU POSTE DE CARDET - RÉCESSION 2013

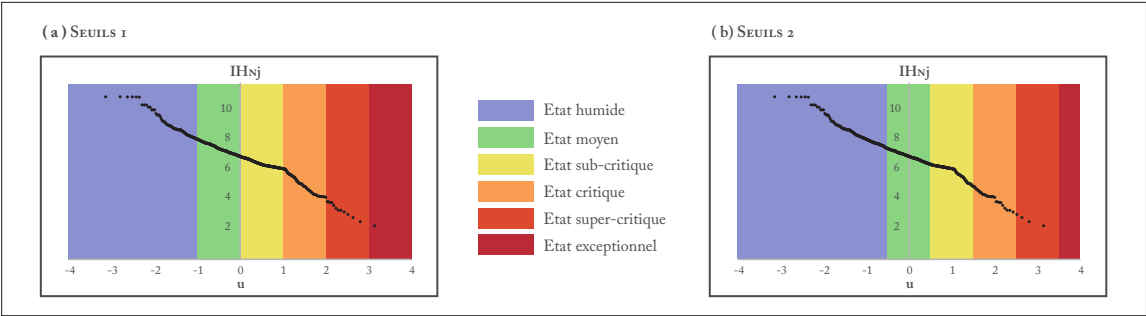


FIGURE 7.10 : RÉPARTITION DES VALEURS JOURNALIÈRES DANS LES ÉTATS DE CRITICITÉ SELON LES CLASSES DE SEUILS - EXEMPLE AU POSTE DE CARDET - 11 RÉCESSIONS

7.3.2 Discrétisation des états de criticité

À partir des ajustements obtenus, des seuils peuvent donc être établis à partir de la variable centrée réduite u , qui correspond aux écarts-types. Comme pour l'indicateur de l'état du volume superficiel, les seuils sont ici aussi prédéfinis statistiquement, sans besoin de recourir au préalable à un choix arbitraire ou à une évaluation d'expert. La question relative au choix des classes d'état à associer à chaque seuil, qui conditionne la répartition des valeurs (notamment les plus extrêmes dans le sec) dans les classes critiques se pose également ici (FIGURE 7.9).

Cependant, afin de maintenir une cohérence méthodologique, et d'autoriser d'autre part la comparaison ultérieure des états pris par chaque indicateur, des seuils identiques à ceux relatifs aux indices volumiques sont retenus. Ces derniers correspondent ainsi aux intervalles de classes 1 (FIGURE 7.10).

7.4 Le Chrono-kindénogramme ou l'évolution temporelle de l'état de criticité de l'indicateur

Une fois les seuils établis, une analyse chronologique des niveaux de criticité de l'indice volumique journalier par poste peut être réalisée graphiquement par le biais du chrono-kindénogramme (ENCADRÉ E28).

Sur l'exemple de Cardet, l'état journalier des valeurs peut être observé et les périodes les plus problématiques peuvent être identifiées d'un simple coup d'œil, selon les deux seuils proposés précédemment.

Sans entrer dans le détail des trois années représentées, l'année 2013 apparaît la plus sévère. En considérant les seuils définis selon les intervalles de classes 1, les valeurs prises par les indices, après avoir oscillé entre un état humide et sub-critique sur l'équivalent des trois quarts de la période de récession, s'engagent ensuite dans un état critique, durant un temps relativement court. À l'approche de la fin de la période de récession, elles chutent finalement dans un état super-critique jusqu'à atteindre l'état exceptionnel quelques jours avant l'étiage strict.

De manière générale, des constats similaires à ceux avancés à partir des chrono-kindénogrammes de l'indice volumique peuvent être établis. Les intervalles de classes 1 s'avèrent sensiblement moins discriminants au regard des valeurs extrêmes (*i.e.* valeurs les plus faibles). Cela se traduit par des fins de récession jugées plus sévèrement et l'atteinte plus précoce de l'état supérieur, que lorsque les intervalles de classes 2 sont considérés.

Toutefois, le choix du découpage est porté sur les intervalles de classes 1, de sorte à approcher des situations exceptionnelles, et à constituer une base cohérente pour la comparaison ultérieure de l'état du volume souterrain à celui du volume superficiel (voir CHAPITRE 9).

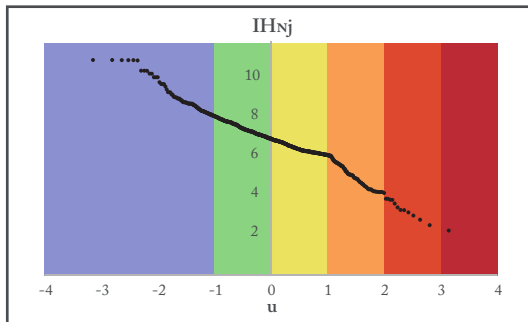
Conclusion — Les indicateurs d'état du volume souterrain ont été élaborés suivant les étapes développées pour la construction des indicateurs d'état du volume superficiel en récession. Ayant révélé une bonne cohérence structurelle de la dynamique d'écoulement des débits en récession de fin de cycle, l'indice volumique journalier et les paramètres de loi du modèle de puissance associé ont été retenus par défaut, afin de caractériser le régime de vidange des aquifères en phase de récession.

L'indice volumique journalier (nouvellement défini comme indice piézométrique journalier, noté IH_{Nj}) a révélé une structuration des variations durant la vidange, plus nette toutefois pour le milieu poreux que pour le karst. Le modèle de puissance semble bien adapté (sauf pour le poste de Saint Geniès de Malgoirès), mais une question demeure sur le meilleur ajustement du modèle, à savoir s'il est plus pertinent de l'ajuster sur l'ensemble des séries (pente moyenne, comme présentée ENCADRÉS 25.1 à 25.4), ou s'il est préférable de l'ajuster sur la série constituée des points le plus hauts, ou encore sur celle des points les plus bas.

En revanche, bien qu'ayant permis de distinguer les régimes propres aux milieux karstiques et poreux, les paramètres de loi (*i.e.* la pente et la surface de récession) n'ont pas donné lieu à l'établissement d'une typologie claire de dynamique de vidange, et donc à l'identification d'un poste de

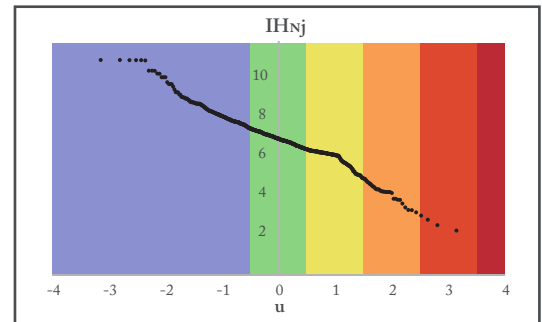
G28.1 DÉTERMINATION DES SEUILS DE CRITICITÉ AU POSTE DE CARDET

Seuils 1



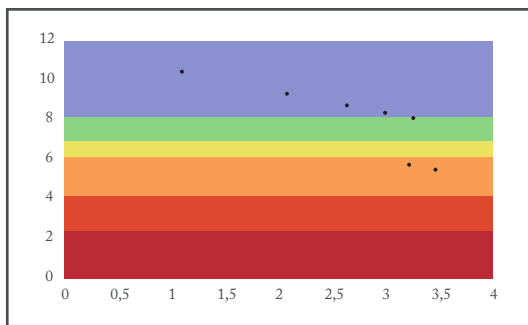
- Etat humide
- Etat moyen
- Etat sub-critique
- Etat critique
- Etat super-critique
- Etat exceptionnel

Seuils 2



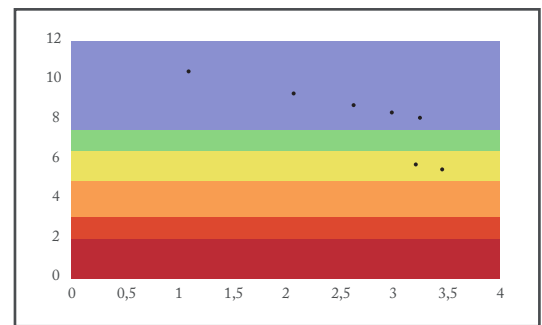
G28.2 CHRONO-KINDÉNOGRAMMES DE LA RÉCESSION DE 2012

Seuils 1



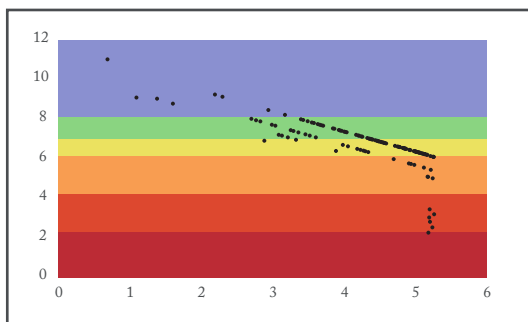
- Etat humide
- Etat moyen
- Etat sub-critique
- Etat critique
- Etat super-critique
- Etat exceptionnel

Seuils 2



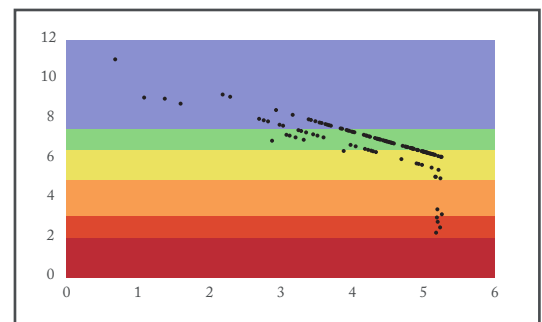
G28.3 CHRONO-KINDÉNOGRAMMES DE LA RÉCESSION DE 2013

Seuils 1



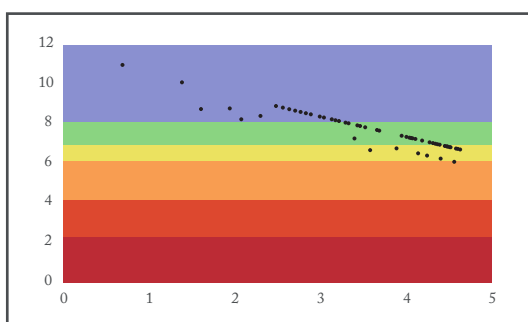
- Etat humide
- Etat moyen
- Etat sub-critique
- Etat critique
- Etat super-critique
- Etat exceptionnel

Seuils 2



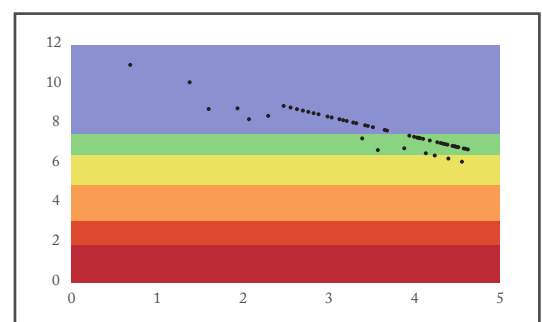
G28.4 CHRONO-KINDÉNOGRAMMES DE LA RÉCESSION DE 2015

Seuils 1



- Etat humide
- Etat moyen
- Etat sub-critique
- Etat critique
- Etat super-critique
- Etat exceptionnel

Seuils 2



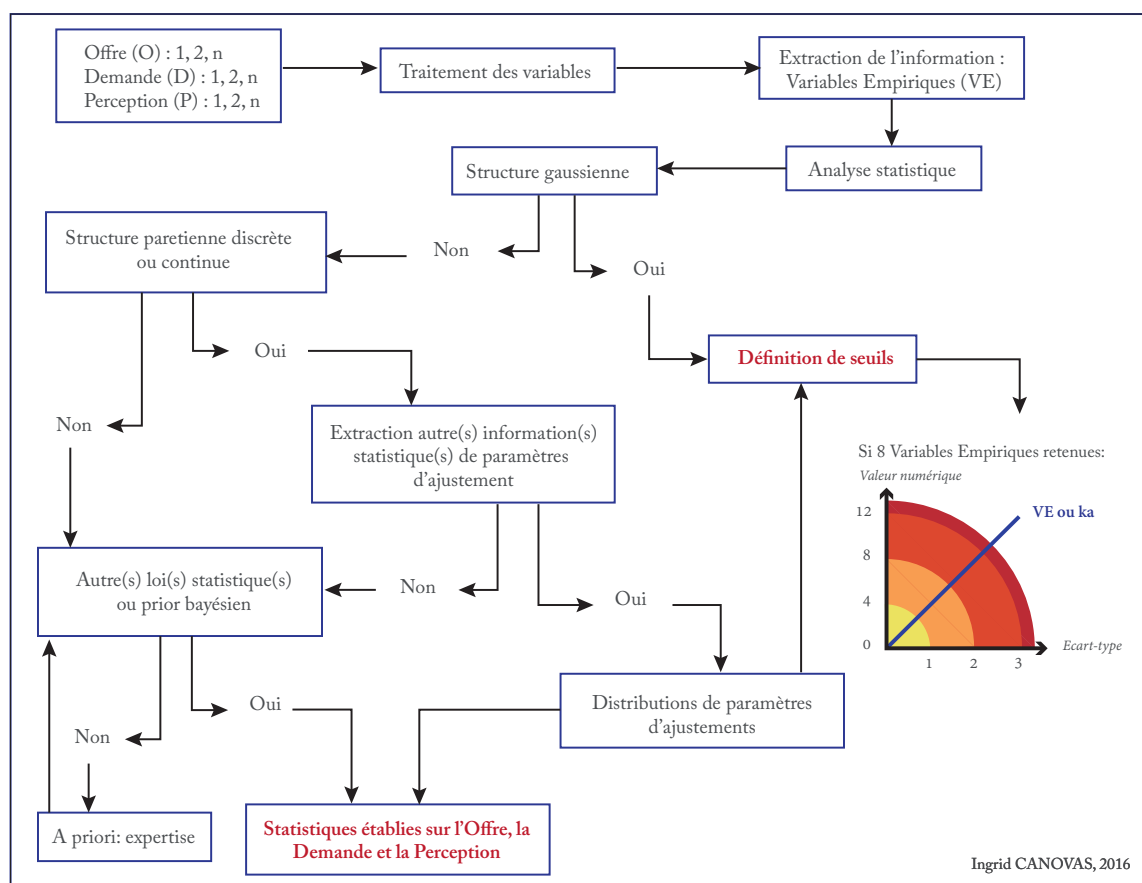
référence par entité hydrogéologique. Ces résultats laissent ainsi supposer l'existence de facteurs qui modifieraient fortement la structure du régime souterrain. C'est pourquoi, pour une étude pertinente et réaliste des basses eaux, il apparaît indispensable de considérer les paramètres extérieurs, susceptibles de contrôler l'état de la ressource en eau, aussi bien globalement que plus localement.

En ce sens, un indicateur synthétisant l'action des facteurs climatiques est également proposé (voir CHAPITRE 8), et l'intégration des facteurs anthropiques sera par la suite envisagée, pour une synthèse finale plus juste de l'état de criticité (voir CHAPITRE 10).

Il est enfin à noter que le manque de profondeur historique des données et les nombreuses lacunes ont également dû contribuer à la difficulté à mettre en évidence une structure propre à chaque entité hydrogéologique. Par conséquent, il s'agira de constater si les seuils tels que définis pourront corriger ces résultats et/ou si la mise en relation des indicateurs sera en mesure d'expliquer cette hétérogénéité de fonctionnement.

Cela étant, cette méthode permet d'avoir une analyse globale de chaque piézomètre, lesquels peuvent dès lors être comparés.

VERS LA CRÉATION D'INDICATEURS D'ÉTAT DU FORÇAGE CLIMATIQUE



8.1	Identification des dynamiques climatiques/atmosphériques	261
8.1.1	Analyse graphique des dynamiques générales des précipitations	261
8.1.2	Calcul des « durées sans pluie »	263
8.1.3	Dynamiques des précipitations - « durées sans pluies »	263
8.1.4	Dynamiques générales des précipitations utiles	264
8.2	Les courbes des « durées sans pluie utile » en récession : vers une structuration spatiale de l'indicateur ?	269
8.3	Identification de la structure statistique de l'indicateur et détermination des seuils de criticité	272
8.3.1	Le modèle d'ajustement des périodes d'absence de pluie	272
8.3.2	Comparaison des ajustements des durées « sans pluie utile » (IP0) . . .	274
8.3.3	Discretisation des états de criticité de l'information climatique	279
8.4	Le Chrono-kindénogramme ou l'évolution temporelle de l'état de criticité de l'indicateur	280

La phase de récession a été ici définie, de sorte à inclure les apports pluviométriques printaniers et/ou estivaux (voir *supra* 6.1.1). Par ailleurs, comme semble le révéler l'analyse des débits et des hauteurs piézométriques, certains facteurs climatiques contribueraient, aussi bien globalement que plus localement, à l'état de la ressource en eau (*i.e.* états de criticité des indicateurs relatifs aux volumes superficiel et souterrain disponibles). Le forçage climatique doit donc également faire l'objet d'une analyse propre, à l'issue de laquelle un indicateur synthétisant les principaux facteurs d'influence sera conçu. Afin de compléter la démarche analytique globale des basses eaux, il sera finalement confronté aux indicateurs caractérisant l'état de la réserve en eau, afin d'en vérifier l'impact sur cette dernière (voir CHAPITRE 9 et 10).

En récession, ce sont surtout les périodes sans pluie qui vont conditionner les états de basses eaux. Ce constat a été confirmé lors de l'analyse des phases de décroissance des débits, au cours desquelles, même lors d'épisodes pluvieux importants, ou successifs, les valeurs de l'indice n'augmentent pas systématiquement, ou seulement sur un temps très court. Au contraire, une fois l'épisode passé, la décroissance reprend immédiatement et presque toujours rapidement. Ainsi, l'attention sur les cumuls de jours sans apports (*i.e.* sans précipitations) a été privilégiée, à défaut d'une analyse des cumuls de pluies ou des intensités des événements.

Par ailleurs, l'approche de la période estivale se caractérise par une augmentation de la température et de l'évaporation. Ce facteur est, par conséquent, à inclure dans l'information synthétisant la pression climatique. Cela revient, par exemple, à déduire des précipitations les volumes évapotranspirés, et peut se traduire ainsi par des périodes « sans pluie utile ».

Le point essentiel sur lequel repose la réflexion est donc celui de l'absence de pluie, et plus particulièrement sur la détermination de son influence : est-elle le moteur ou du moins un facteur prépondérant du niveau de sécheresse, et donc de l'état des basses eaux ? Dans le cas présent, l'absence est celle de la pluie mesurée en longueur de périodes sèches. Aussi, la longueur des périodes peut-elle servir de mesure d'une tension vers une situation aride, donc constituer un indicateur de tension sur

la ressource ? Le cas échéant, la question du poids que pourrait prendre cet indicateur dans la mesure de la criticité se pose également.

Des premiers éléments de réponse peuvent être fournis par la détermination de la structuration de cette information d'absence de pluie, dans le temps et dans l'espace. Il faudra ensuite se poser la question du seuil (*e.g.* absence absolue, seuil réglementaire) à partir duquel l'information est considérée comme pertinente dans la caractérisation du phénomène (voir CHAPITRE 10).

En outre, il s'agit d'une nouvelle démarche de recherche, qui doit toutefois être menée en tâchant de conserver des étapes méthodologiques similaires à celles suivies pour l'élaboration des deux précédents indicateurs (ENCADRÉ E29). Cependant, étant donné la prise en compte d'une deuxième variable, il faudra nécessairement compter sur une étape supplémentaire, relative à son intégration. Le développement méthodologique conduit donc à un nouvel indicateur journalier et à l'identification du modèle associé. Par conséquent, un modèle d'ajustement statistique de l'ensemble des valeurs relatives au nouvel indicateur est dès lors à concevoir, à partir duquel les seuils de criticité pourront être déterminés.

L'objectif présent demeure, comme pour les analyses précédentes, la mise en évidence d'une structuration et/ou d'une dynamique de l'information climatique durant les phases de récession, de sorte à pouvoir la comparer ensuite avec celle(s) relative(s) à ses états de criticité.

8.1 Identification des dynamiques climatiques/atmosphériques

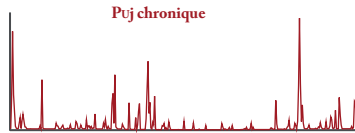
Préalablement à l'élaboration d'un indicateur capable de rendre compte des forçages climatiques pesant sur l'état des différents réservoirs en eau (superficiel et souterrain) en basses eaux, une analyse globale est menée sur les deux variables retenues : les précipitations et les précipitations utiles (*i.e.* corrigées de ETP). L'objectif étant de mettre en évidence la structure de ces deux informations, afin de déterminer laquelle est à la fois la plus pertinente et la plus adaptée pour répondre aux exigences de la méthode. En d'autres termes, le choix de l'information à retenir sera aussi déterminé selon la capacité de sa structure statistique à définir des seuils logiques (statistiques) et probabilisés.

8.1.1 Analyse graphique des dynamiques générales des précipitations

Pour démontrer la pertinence de la prise en compte de l'évapotranspiration potentielle (notée ETP), choisie ici pour caractériser les pertes attribuables à la température et à la demande évaporatoire de la végétation, les chroniques des périodes « sans pluie » et « sans pluie utile » sont dans un premier temps comparées, sur une année choisie aléatoirement. Pour compléter cette première analyse simple et graphique, et afin de révéler une éventuelle structuration spatiale de l'information climatique, les deux chroniques des quatre pluviomètres sont comparées. Ces derniers ont été retenus en raison de la longueur de leurs chroniques, mais aussi en fonction de leur localisation sur, et/ou, en bordure du bassin des Gardons (FIGURE 8.1).

CALCUL DE LA PLUIE EFFICACE

1



Dans un premier temps,
la pluie efficace est calculée
sur la chronique totale

CALCUL DE L'INDICE

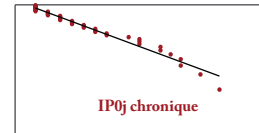
2

Puj	Décompte	Durée	IP0j
-0.20	1	2	2

La série de pluie efficace est ensuite
transformée en nouvelle série, constituée
des valeurs de l'indicateur calculé

AJUSTEMENT STATISTIQUE

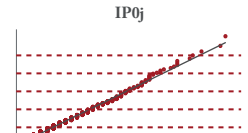
3



Les valeurs de la nouvelle série sont
ajustées à une loi statistique, après en
avoir identifié la nature de la distribution

SEUILS DE CRITICITÉ

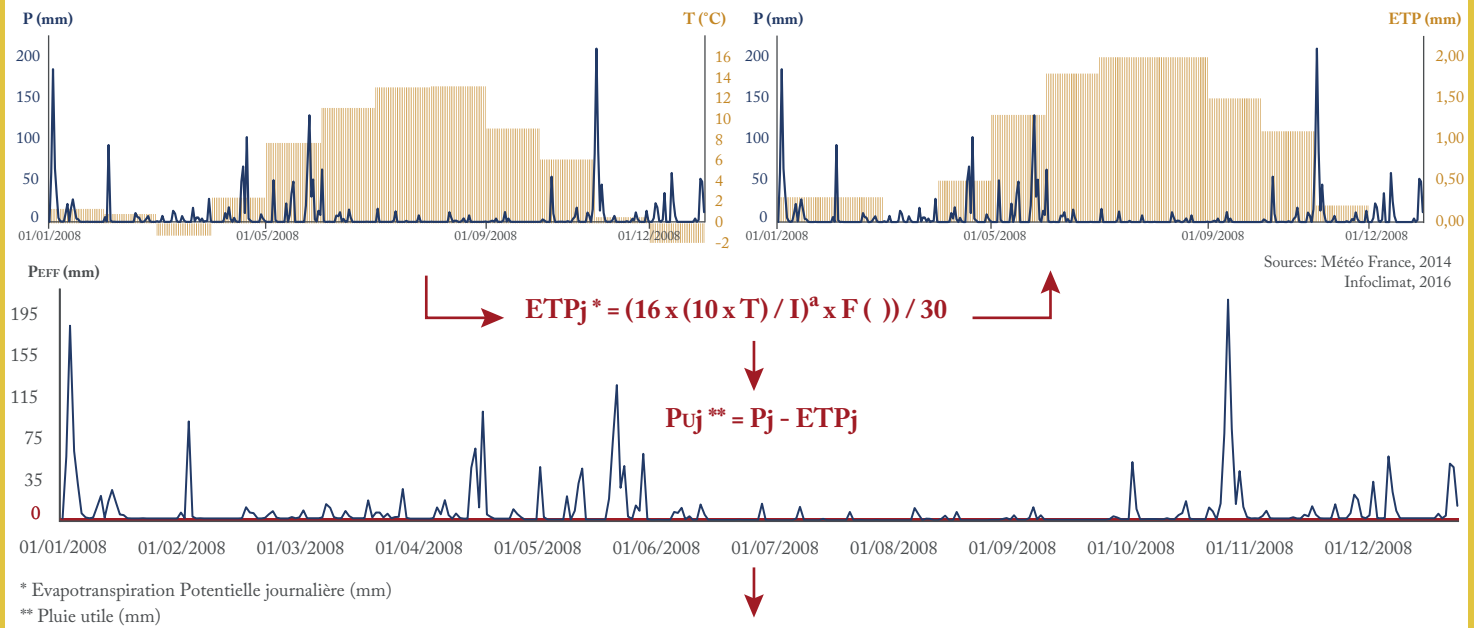
4



Enfin, suivant la loi statistique
définie, des seuils statistiques de
criticité sont obtenus

G29.1

DÉTERMINATION DE LA PLUIE UTILE JOURNALIÈRE À PARTIR DES PLUIES ET DES TEMPÉRATURES MOYENNES MENSUELLES



* Evapotranspiration Potentielle journalière (mm)
** Pluie utile (mm)

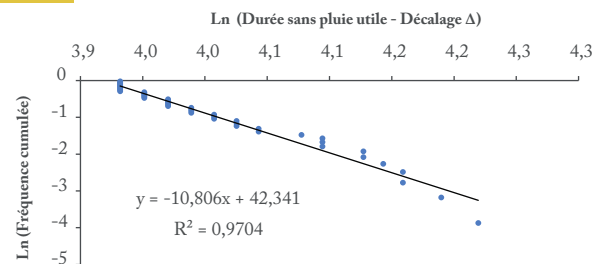
CALCUL DES DURÉES SANS PLUIE (IP0)

T29.1 INDICES JOURNALIERS - EXEMPLE 2008

Date	Puj	Décompte	Durée	IP0j
29/04/2008	0.90	0	0	- *
30/04/2008	-1.30	1	1	-
01/05/2008	-1.30	1	2	-
02/05/2008	-1.30	1	3	-
03/05/2008	-1.30	1	4	4
04/05/2008	49.30	0	0	-
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

* Ne sont conservées que les durées supérieures ou égales à 1 jour «sans pluie utile»

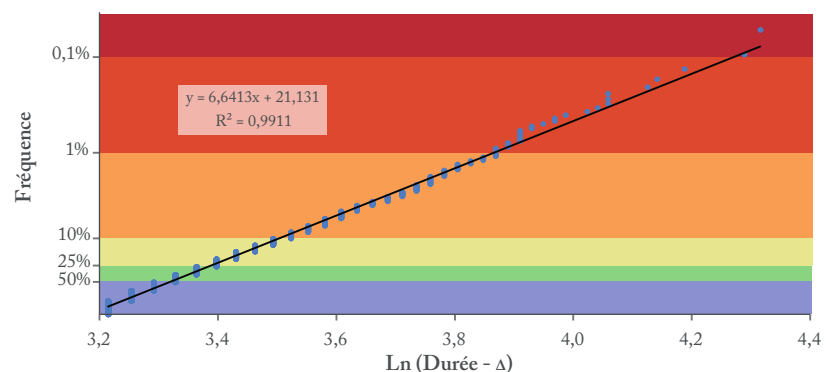
G29.2 AJUSTEMENT* DES IP0j - EXEMPLE 2008



* Modèle d'Estoup-Ziepf étendu par Mandelbrot, et adapté par Ph. Martin (2016):
introduction d'un décalage (Δ) sur les longueurs de périodes sans pluie.

G29.3 AJUSTEMENT STATISTIQUE DES IP0j ET DÉTERMINATION DES SEUILS DE CRITICITÉ - 58 ANNÉES

- Etat humide: situation satisfaisante
- Etat moyen: situation normale
- Etat sub-critique: situation à surveiller
- Etat critique: situation problématique
- Etat super-critique: situation de crise
- Etat exceptionnel: situation catastrophique



* Les IP0j, issus des 58 années enregistrées à Valleraugue, sont ajustées au modèle étendu d'Estoup-Ziepf. La fréquence est utilisée comme seuil de criticité des variables «précipitations» et «pertes évaporatoires» journalières (ici l'IP0j).

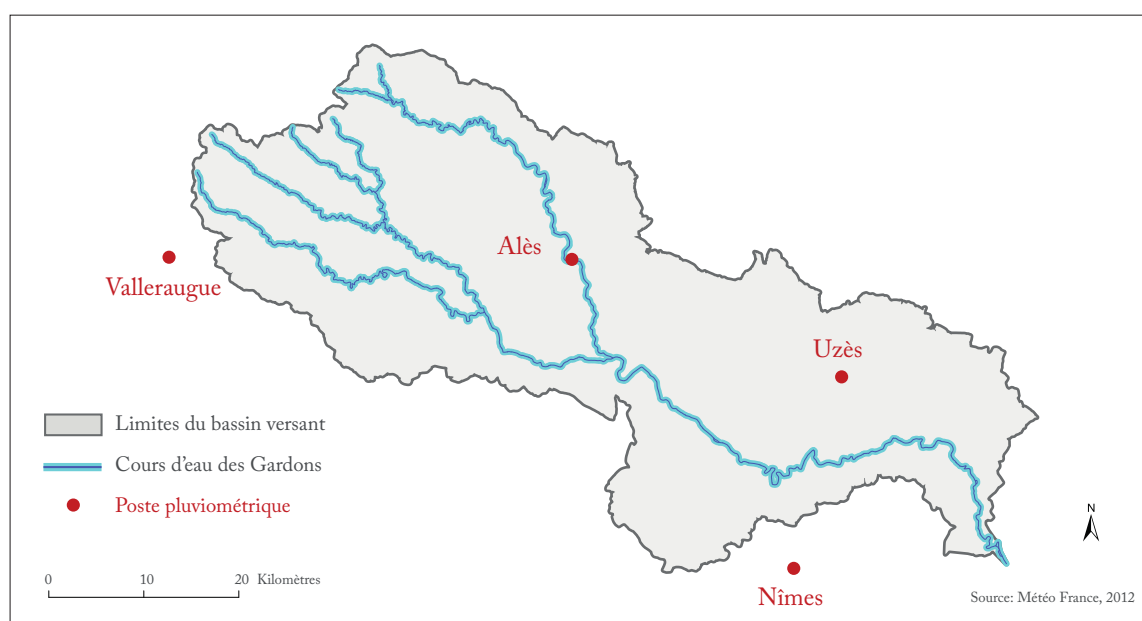


FIGURE 8.1 : LOCALISATION DES POSTES PLUVIOMÉTRIQUES RETENUS

8.1.2 Calcul des « durées sans pluie »

Le calcul des périodes « sans pluie » peut être effectué, à chaque poste pluviométrique, sur la totalité de la chronique de pluie, sur le découpage des cycles hydrologiques, des récessions, ou encore sur une période donnée.

À ce stade, l'approche porte sur l'observation de la statistique globale des périodes « sans pluie ». Par conséquent, les jours successifs de pluies nulles (égales à 0 mm) sont comptabilisés sur la totalité de la chronique disponible à chaque poste. À l'issue de cette étape préliminaire, une nouvelle série est obtenue pour chaque poste, recensant l'ensemble des durées « sans pluie ». À partir de ces dernières, une première analyse comparative simple peut être menée, afin d'examiner la structuration de l'information « absence de pluie ».

8.1.3 Dynamiques des précipitations - « durées sans pluies »

Dans un premier temps, la comparaison est conduite entre les quatre postes, sur l'ensemble de l'année 1985, retenue sans critères particuliers, à simple titre d'illustration. Grâce à une vision plus globale (non centrée sur les seules phases de récession), la période de l'année durant laquelle les précipitations sont les plus déficitaires est soulignée (FIGURE 8.2).

Trois constats peuvent être avancés de ces observations. En premier lieu, et sans grande surprise, les périodes « sans pluie » les plus longues apparaissent majoritairement concentrées sur la période estivale. En revanche, du moins pour l'année 1985, et sur les postes d'Uzès et d'Alès plus particulièrement, des durées « sans pluie » relativement longues sont également observées à la fin de l'automne et au début de l'hiver. Cela semble suggérer que certaines années seraient susceptibles de connaître

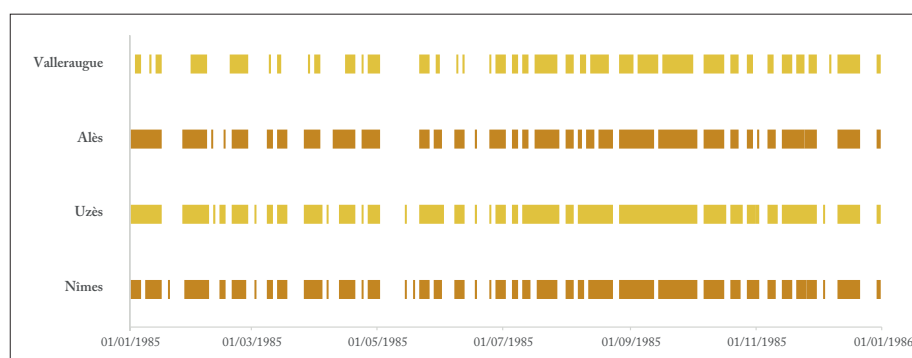


FIGURE 8.2 : CHRONIQUES DES JOURS SANS PLUIE DES QUATRE POSTES RETENUS - EXEMPLE ANNÉE CALENDRAIRE 1985

des périodes sèches relativement problématiques, notamment si elles font suite à un étiage (au sens large) sévère, puisqu'elles peuvent s'étendre au-delà de la saison estivale.

D'autre part, une augmentation assez générale de la fragmentation des durées « sans pluie » sur la période estivale apparaît, à partir d'Uzès et jusqu'au Mont Aigoual (Vallerargue). Cela se traduit par des périodes « sans pluies » plus courtes et plus nombreuses en montagne et des durées plus longues en plaine.

Enfin, même si elles se ressemblent sensiblement, la série de durées « sans pluie » de Nîmes présente une fragmentation légèrement plus marquée que celle d'Uzès. Ce dernier poste, plus éloigné de la mer, serait probablement moins impacté par les influences marines, facteur potentiel du découpage des périodes (0,1 mm de pluie enregistré étant suffisant pour segmenter les durées sous un seuil à zéro).

8.1.4 Dynamiques générales des précipitations utiles

L'analyse est ensuite reproduite sur les séries de périodes « sans pluie utile », afin d'identifier les différences qu'engendre l'intégration du facteur « température » au travers des pertes par évapotranspiration. Le cas échéant, il s'agira d'observer dans quelles mesures l'ETP modifie la structure du forçage climatique, définie précédemment par les seules périodes d'absence de pluie brute.

8.1.4.1 Calcul de l'ETP à partir des températures

Pour calculer les durées « sans pluie utile », le volume potentiellement évapotranspiré (ETP) est d'abord déterminé, à partir de la température. Un des avantages inhérents au recours à l'ETP repose sur son unité commune avec celle des précipitations, exprimées toutes deux en millimètres. Ainsi, la nouvelle information climatique synthétique est obtenue en déduisant simplement la valeur de l'ETP à celle de la hauteur précipitée.

Cela étant, la transformation de l'information de température en ETP est délicate, et les méthodes employées sont souvent controversées. L'information est obtenue dans des degrés de précision variables, et généralement à des pas de temps mensuels, parfois décennaux (très rarement journaliers).

Suivant les besoins, il faut ensuite rapporter la valeur à une résolution plus fine, ce qui accroît alors les approximations et réduit davantage la précision de l'information finale.

Toutefois, en cas d'absence de données d'évapotranspiration, il s'avère utile de recourir à l'une des méthodes existantes, ne serait-ce que pour tenter d'approcher au mieux les conditions réelles. Une telle configuration se présentant ici, et dans le but d'illustrer la méthodologie générale, le calcul de l'ETP est effectué suivant la méthode de Thornthwaite, formulée comme suit :

$$(8.1) \quad \text{ETP}(m) = 16 \times \left(\frac{10 \times T(m)}{I} \right)^\alpha \times F(m, \varphi)$$

Avec :

- $\text{ETM}(m)$: l'évapotranspiration moyenne en mm du mois m ($m = 1$ à 12) ;
- T : la moyenne interannuelle des températures en °C du mois m ;
- $\alpha = 0,016 \times I + 0,5$
- I : l'indice thermique annuel donné par :

$$(8.2) \quad I = \sum_{m=1}^{12} i(m)$$

- $i(m)$: l'indice thermique mensuel donné par :

$$(8.3) \quad i(m) = \left(\frac{T(m)}{5} \right)^{1,514}$$

- $F(m, \varphi)$: le facteur correctif fonction du mois (m) et de la latitude.

Sans discuter du bien-fondé de son utilisation, ni de ses limites de validité, et parce que la précision et l'exhaustivité ne sont pas particulièrement recherchées ici, la méthode de Thornthwaite est adoptée pour des raisons de simplicité d'utilisation. L'ETP étant calculée à l'échelle mensuelle, elle est ensuite divisée par le nombre de jours de chaque mois, afin d'obtenir une résolution journalière, en adéquation avec les précipitations.

Dans le cadre de cette étude, les données de température ont été recueillies aux stations de Nîmes et de Valleraugue. Les séries de durées « sans pluie utile » ont, dans un premier temps, été reconstituées pour chacun des quatre postes pluviométriques, par association des postes Pluie - ETP.

Par ailleurs, puisque la méthodologie générale est développée sur les récessions de fin de cycle, les chroniques sont ensuite découpées suivant les phases de récession établies aux postes de mesure de débit. Cela a conduit à faire des associations de trois postes suivant la logique simple consistant à regrouper les postes les plus proches (FIGURE 8.3).

Pour s'approcher d'une réalité climatique, les valeurs d'ETP sont nuancées sur un gradient mer - montagne. Ainsi, la série de durées « sans pluie » est corrigée à Uzès de l'ETP calculée à partir des

Stations météo	Pluie	ETP *	Pluie	ETP *	Pluie	ETP *	Pluie	ETP *
Limnimètre	Nîmes	Nîmes	Alès	Nîmes /Valleraugue	Uzès	Nîmes	Valleraugue	Valleraugue
Saumane	-	-	-	-	-	-	-	36
Alès	-	-	13	-	-	-	-	-
Saniilhac	14**	-	-	-	14	-	-	-

* Evapotranspiration potentielle calculée à partir des relevés de température

** Nombre de récessions prises en compte pour le calcul des périodes «sans pluie»

FIGURE 8.3 : LES POSTES DE MESURE DES PRÉCIPITATIONS ASSOCIÉS AUX STATIONS DE MESURE DES DÉBITS POUR LE CALCUL DES PÉRIODES « SANS PLUIE UTILE »

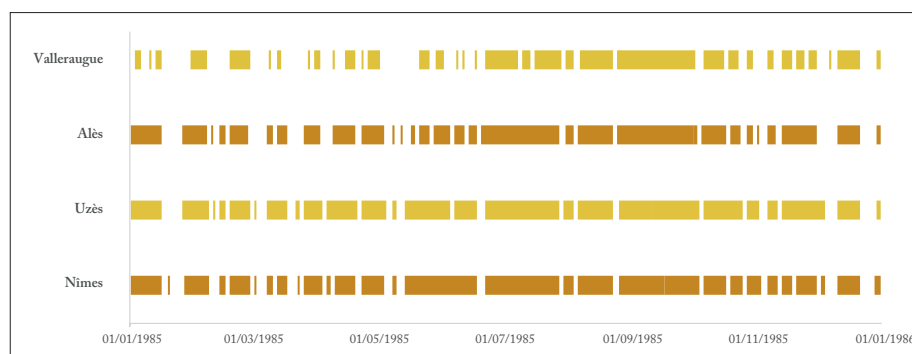


FIGURE 8.4 : CHRONIQUES DES JOURS « SANS PLUIE UTILE » DES QUATRE POSTES RETENUS - EXEMPLE ANNÉE CALENDRAIRE 1985

températures enregistrées à Nîmes. La série relative au poste d'Alès est quant à elle corrigée de la moyenne de l'ETP calculé à partir des températures enregistrées à Nîmes et à Valleraugue, soit :

$$(8.4) \quad ETP j_{Alès} = \frac{ETP j_{Nîmes} + ETP j_{Valleraugue}}{2}$$

La méthode est très discutable, mais elle s'inscrit dans une démarche méthodologique et d'observation très générale. En ce sens, dans le cadre de cette étude, il n'apparaît pas pertinent de rechercher une précision très fine, d'autant que les données relatives aux autres indicateurs (qui seront confrontés ultérieurement) présentent des lacunes, des résolutions différentes, etc. Par ailleurs, l'objectif n'est pas de quantifier un volume disponible (démarches hydrologique et climatique pointues), sinon de déterminer des états plus globaux et éventuellement de dégager des tendances.

8.1.4.2 Comparaison des dynamiques des forçages climatiques - « durées sans pluie utile »

De manière analogue aux séries de durées « sans pluie », les séries de durées « sans pluie utile » des quatre postes sont ensuite confrontées sur l'année 1985 (FIGURE 8.4).

Une diminution sensible de la fragmentation des séries est observée. Les petits résidus semblent en effet effacés. Il en résulte des périodes sèches globalement plus étendues, plus particulièrement au cours de la saison estivale. En revanche, les structurations qui semblaient se dégager de l'analyse graphique des durées « sans pluie » se confirment avec la prise en compte de l'ETP. Cela se traduit par une augmentation du nombre de durées courtes « sans pluie utile », depuis Uzès jusqu'à Valleraugue, et une fragmentation légèrement plus marquée à Nîmes qu'à d'Uzès en automne.

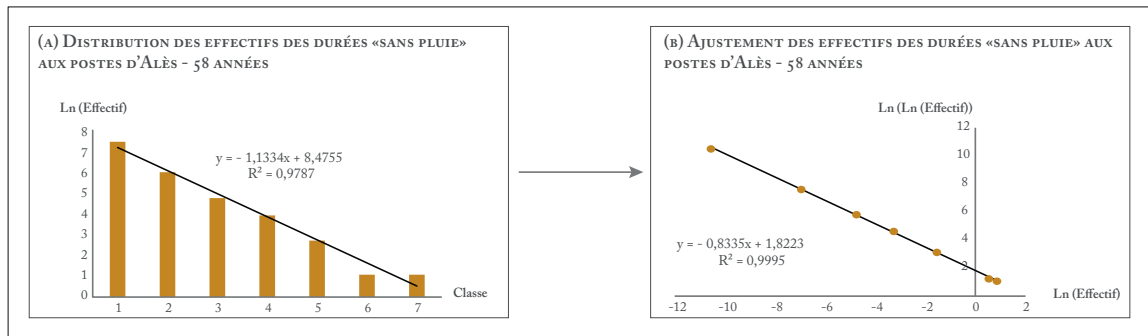


FIGURE 8.5 : AJUSTEMENT DES EFFECTIFS DES DURÉES SANS PLUIE AU MODÈLE « NORMALISÉ » DE PARETO

8.1.4.3 Comparaison des effectifs des classes de durées « sans pluie » et « sans pluie utile »

Pour confirmer ces premières constatations, une analyse comparative est menée entre les effectifs des durées « sans pluie » et « sans pluie utile » de chaque poste sur la période 1955 - 2012 (ENCADRÉ E30).

Les durées de chaque série, calculées sur l'ensemble des chroniques (*i.e.* tous les jours de toutes les années disponibles) sont réparties au sein de 7 classes, afin de faciliter la comparaison des distributions.

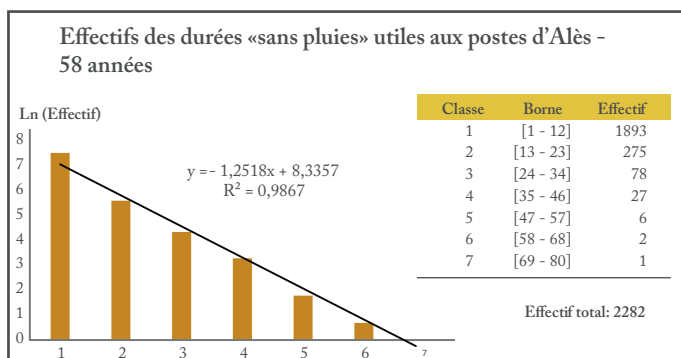
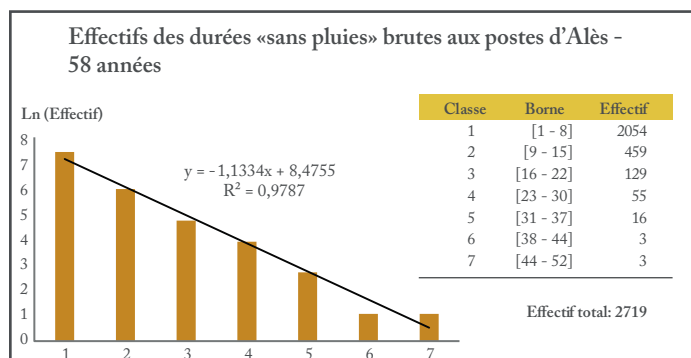
Comme attendu, les effectifs de la classe des durées « sans pluie utile » les plus courtes sont plus faibles que ceux des durées « sans pluie ». Cette structure s'accompagne, de surcroît, d'une augmentation des valeurs des durées « sans pluie utile » maximales à tous les postes, à l'exception de Valleraugue. Sur ce dernier, en revanche, et à défaut d'être plus extrêmes, les durées « sans pluie utile » les plus longues y sont plus nombreuses/représentées.

Par ailleurs, la représentation graphique de la distribution des valeurs des périodes révèle une structure parétienne. La hiérarchie des classes peut ainsi être donnée par la pente du modèle puissance, issu de l'ajustement des effectifs des classes à une loi log-normale FIGURE 8.5.

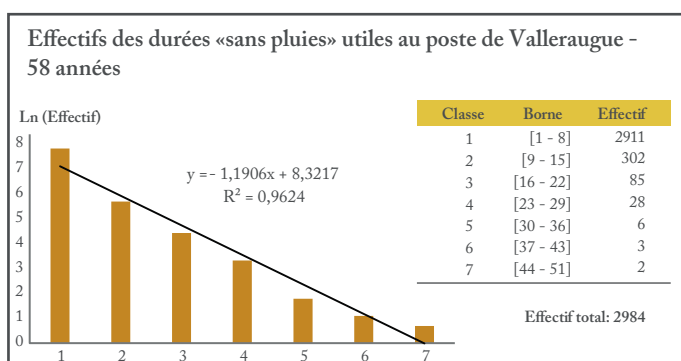
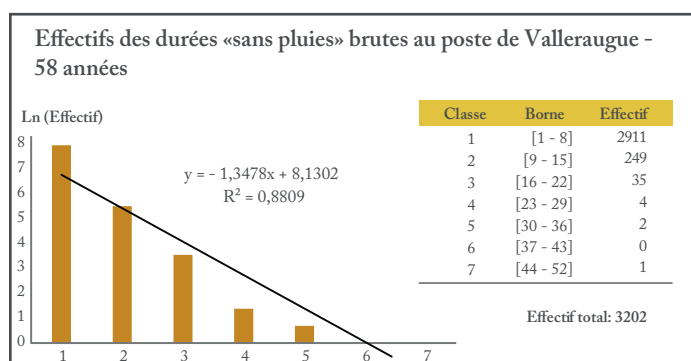
Pour cela, la première étape consiste à représenter les données sur une échelle bilogarithmique, afin de vérifier visuellement que la courbe suit le modèle attendu. Les classes sont ensuite créées, suivant la méthode classique du tracé d'histogrammes. Cette dernière consiste à employer le tracé normalisé des distributions statistiques et à déterminer le centre de classe pour permettre de tracer une courbe. La hauteur de la barre de l'histogramme est calculée en divisant l'effectif de la classe par sa largeur (*i.e.* l'intervalle). Cela permet une représentation normalisée des quantités, quel que soit l'intervalle choisi ou utilisé par défaut. Le centre de la classe n'est donc pas la moyenne arithmétique des extrémités, mais la moyenne géométrique, soit la racine carrée du produit de ses bornes supérieure et inférieure. L'abscisse du point tracé prend ainsi en compte le fait que l'effectif moyen de chaque classe est biaisé vers l'extrémité basse.

À partir de ce nouveau modèle « normalisé », une analyse des pentes peut alors être conduite (FIGURE 8.6), ces dernières étant d'autant plus élevées (*i.e.* valeurs faibles) que l'effectif de la classe des durées les plus courtes est important et celui de la classe des durées les plus longues est faible.

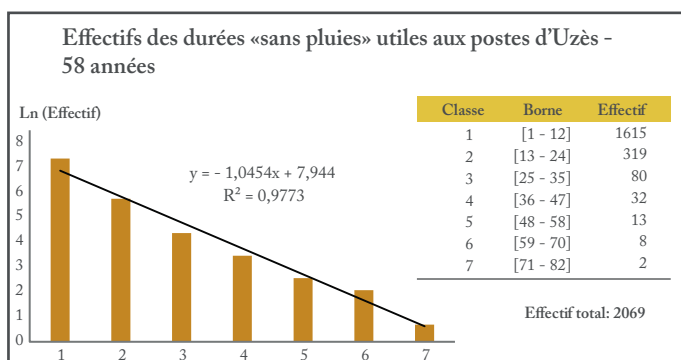
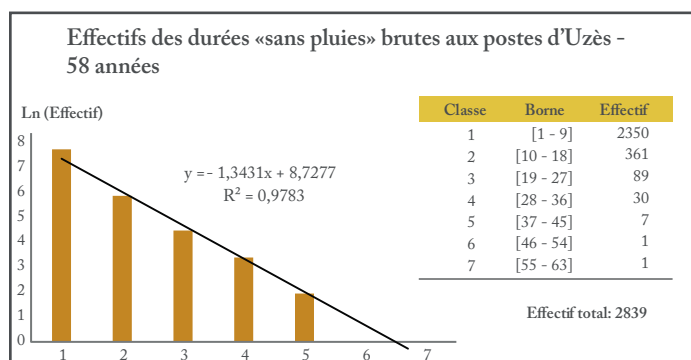
G30.1 EFFECTIFS DES DURÉES «SANS PLUIES» AUX POSTES D'ALÈS - 30007001 ET 30007004



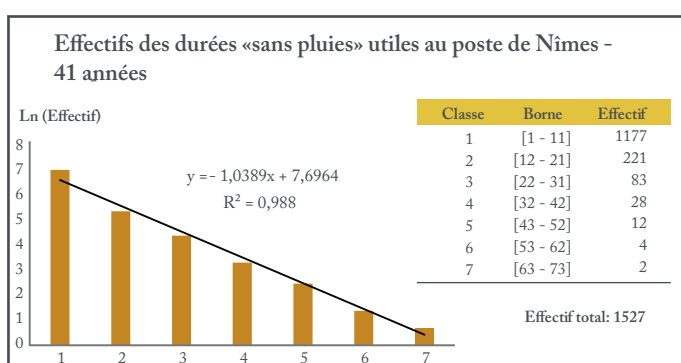
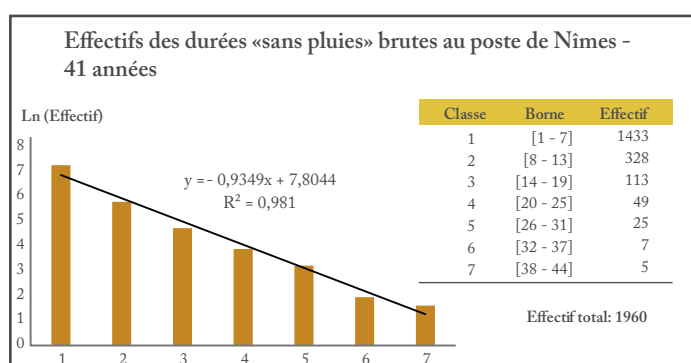
G30.2 EFFECTIFS DES DURÉES «SANS PLUIES» AU POSTE DE VALLERAUGUE - 30339001



G30.3 EFFECTIFS DES DURÉES «SANS PLUIES» AUX POSTES D'UZÈS - 30334001 ET 30334003



G30.4 EFFECTIFS DES DURÉES «SANS PLUIES» AU POSTE DE NÎMES - 30189002



8.2. Les courbes des « durées sans pluie utile » en récession : vers une structuration spatiale de l'indicateur ?

	Nîmes	Uzès	Alès	Valleraugue
1955 - 2012				
Pente - Durées «sans pluie»	-	-0,83	-0,83	-0,85
Pente - Durées «sans pluie utile»	-	-0,82	-0,84	-0,84
1955 - 1995				
Pente - Durées «sans pluie utile»	-0,82	-0,81	-0,84	-0,82

FIGURE 8.6 : VALEUR DE LA PENTE DU MODÈLE D'AJUSTEMENT DE LA DISTRIBUTION DES PÉRIODES « SANS PLUIE » ET « SANS PLUIE UTILE » DE CHAQUE PLUVIOMÈTRE - BASE CHRONIQUE

De manière générale, la valeur des pentes tend vers une (faible) diminution (*i.e.* pentes plus fortes) suivant un axe mer - montagne, avec toutefois un maintien entre Uzès et Alès pour les durées « sans pluie » et entre Alès et Valleraugue pour les durées « sans pluie utile ».

Par contre, la comparaison des pentes des « durées sans pluie utile » sur les périodes 1955-1995 et 1995-2012 révèle une légère modification de la structure statistique de l'information, qui se traduit par une augmentation de la pente à Valleraugue avec l'intégration de 17 années supplémentaires.

Ce changement est toutefois suffisamment important pour entraîner une modification de la structuration spatiale de l'information. En effet, sur la période 1955-1995, les pentes des durées « sans pluie utile » n'augmentent plus progressivement de Nîmes-Uzès jusqu'à Valleraugue, mais diminuent à partir d'Alès (ENCADRÉ 3 I.1). La hausse de la pente affichée à Valleraugue laisse à penser qu'un petit nombre de périodes très longues sont apparues entre 1995 et 2012, déséquilibrant ainsi les classes des plus courtes et des plus longues durées.

Bien qu'elle apporte un premier aperçu sur la dynamique climatique, la pente du modèle « normalisé » de Pareto ne semble pas être suffisamment stable pour être retenue comme indicateur pertinent, afin de décrire le phénomène d'absence de pluie (du moins sur une période large, qui inclue toutes les saisons). Il faut donc envisager le recours à un paramètre différent, notamment pour une approche synthétique du phénomène à l'échelle annuelle.

8.2 Les courbes des « durées sans pluie utile » en récession : vers une structuration spatiale de l'indicateur ?

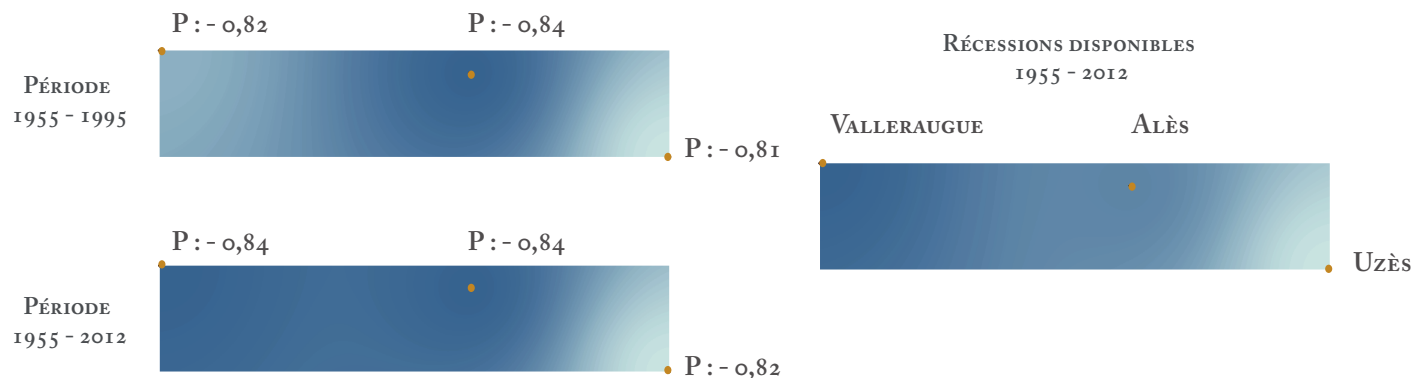
Pour s'assurer que la structure de l'information « absence de pluie utile » (notée IP0) évolue suivant une même dynamique spatiale mer - montagne, sur des périodes globalement plus sèches, l'analyse des effectifs des durées « sans pluie utile » est dupliquée sur chaque récession.

Dans un premier temps, les durées incluses dans les phases de récession sont extraites. Ces dernières correspondent aux découpages des chroniques de débit de récession des postes les plus proches (voir FIGURE 8.3). La hiérarchie moyenne des classes de périodes « sans pluie utile » (*i.e.* pente du modèle d'ajustement de Pareto) est ensuite comparée entre les différents postes. Afin de rendre comparables les résultats, un nombre identique de classes est conservé (soit 7 classes d'effectifs), et ce, bien que le nombre de valeurs (effectif total) diffère entre les postes.

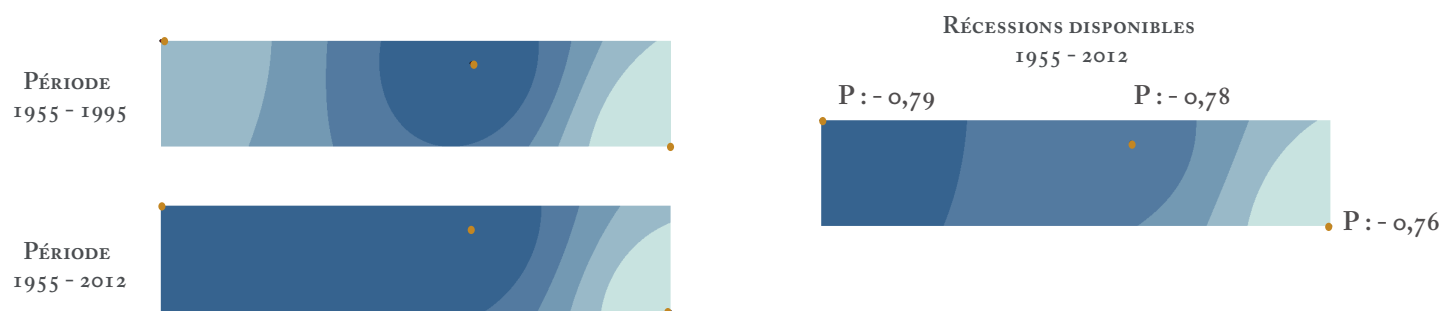
F31.1.1

INTERPOLATION SPATIALE DES PENTES DU MODÈLE DE PARETO DES DURÉES «SANS
PLUIE UTILE» - MÉTHODE IDW - TROIS POSTES

ETIREMENT



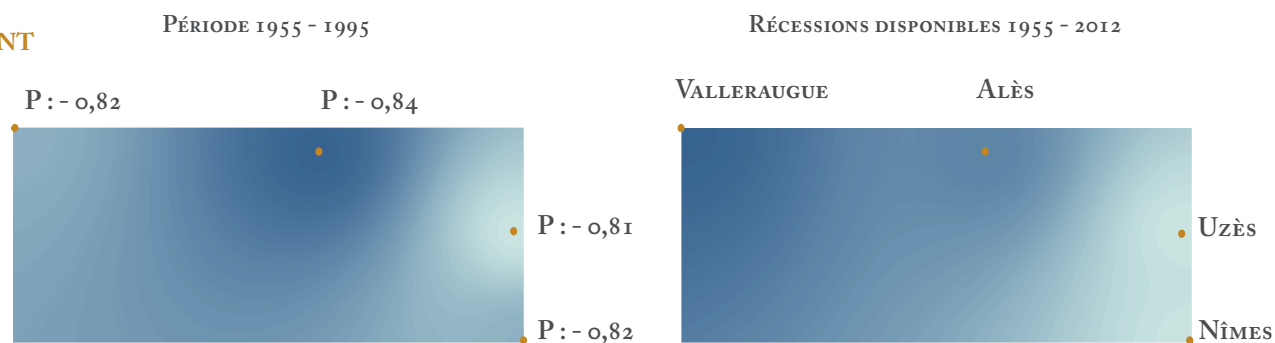
CLASSES DE JENKS



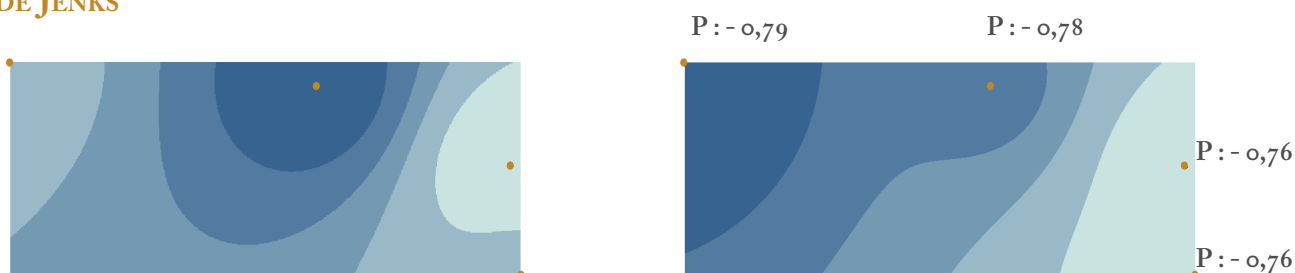
F31.2.1

INTERPOLATION SPATIALE DES PENTES DU MODÈLE DE PARETO DES DURÉES «SANS
PLUIE UTILE» - MÉTHODE IDW - QUATRE POSTES

ETIREMENT



CLASSES DE JENKS



Deux informations sont ainsi mises en parallèle sur les quatre postes : (1) les pentes du modèle traduisant la hiérarchie des effectifs par classe des valeurs de durées « sans pluie utile », extraites des chroniques complètes et (2) celles issues des phases de récession définies hydrologiquement au poste de mesure de débit le plus proche. Sur la base d'un découpage temporel identique, une mise en relation cohérente du forçage climatique sur la ressource superficielle pourra alors, à terme, être faite.

Bien entendu, cette analyse n'a de sens que dans le but d'observer les éventuelles différences (ou similitudes), de manière très élémentaire et globale, existantes entre la structure spatiale d'une information qui tient compte de l'ensemble des variations intra-annuelles (chronique complète) et celle d'une information caractérisant une période plus restreinte (chronique de récession) (ENCADRÉ 30).

Pour une meilleure représentation globale de la structuration spatiale des informations obtenues ponctuellement, la méthode d'interpolation Pondération par l'Inverse de la Distance (IDW, en anglais) est employée. Cet outil évalue les valeurs des cellules en calculant la moyenne des valeurs des points d'échantillonnage dans le voisinage de chaque cellule de traitement. Plus un point est proche du centre de la cellule en cours d'analyse, plus il a d'influence (ou poids) sur la procédure de calcul de la moyenne.

La chaîne de traitements est effectuée via un logiciel SIG (Arcgis), qui permet de restituer graphiquement une information lissée (méthode d'étirement) ou discrétisée (*e.g.* intervalles géométriques, intervalles réguliers, quantiles, écarts-types). À ce stade de l'étude, le choix de la méthode n'importe que dans une mesure très relative. Elle n'est donc ici employée que pour proposer un rendu visuel général et « parlant », sans chercher à déterminer les valeurs pouvant caractériser les zones situées entre les postes de mesure. Si tel avait été l'objectif, le recours à ce type d'interpolation n'aurait pas été choisi, puisqu'il s'affranchit des effets du relief, très marqué au poste du Mont Aigoual.

La représentation graphique obtenue atteste d'une diminution plus régulière (sans rupture) de la valeur des pentes des effectifs des durées « sans pluie utile » de récession, avec l'éloignement progressif à la mer. Cela semble révéler un meilleur équilibrage entre les effectifs des classes des durées les plus courtes et les plus longues, de la montagne vers la mer, soit une augmentation de la représentativité des durées longues avec l'éloignement à la montagne. Ce constat est cohérent, puisqu'en période de récession, les journées de pluie sont beaucoup moins nombreuses, notamment en plaine et sur le littoral.

Conclusion — La structure spatiale de l'information « absence de pluie utile » mise en évidence par la pente du modèle « normalisé » de Pareto semble cohérente dans l'ensemble, notamment pour les phases de récession. Elle pourrait donc être conservée comme indicateur synthétique de pression ou de forçage climatique, afin de renseigner les variables « apports pluviométriques » et « pertes évaporatoires » du modèle théorique « Basses Eaux ». D'une part parce qu'elle est plus « réaliste » que l'information d'absence normative (durée « sans pluie ») pour décrire l'influence des effets de la pluie sur les hydrosystèmes, malgré la méthode peu robuste employée pour définir l'ETP. D'autre part,

parce qu'elle permet de réduire les effectifs des durées courtes et d'augmenter celui des durées longues, ce qui devrait aboutir à une distribution statistique plus robuste et devrait faciliter l'ajustement des valeurs. Par ailleurs, cette information introduit des durées beaucoup plus longues, et de fait très pertinentes pour appréhender les situations les plus potentiellement critiques. Elle est notée par la suite $IP0$ (pour Indicateur de Précipitations nulles).

Enfin, il serait judicieux d'introduire l'information relative aux apports antérieurs (le cumul des précipitations entre les phases de récession, par exemple), soit de doubler l'étude de l'information climatique, en intégrant, en plus de l'absence de pluie, la présence de pluie entre les mois de septembre-octobre et avril.

À présent, il s'agit d'adopter un modèle qui autorise la définition de seuils statistiques (*i.e.* seuils de criticité) des séries de l'indicateur, qui confirmeront la structure mer - montagne pressentie.

8.3 Identification de la structure statistique de l'indicateur et détermination des seuils de criticité

Pour illustrer la démarche, et, à terme, combiner l'ensemble des indicateurs développés (I_{vj} , H_{nj} et $IP0$, en cours), l'indicateur de forçage climatique journalier est conservé ($IP0_j = i^{\text{ème}}$ jour « sans pluie utile »). Sa distribution étant déjà connue (parétienne), il s'agit dès lors de déterminer le modèle en mesure de répondre à trois exigences complémentaires : un ajustement statistique satisfaisant des valeurs, la définition statistique des seuils, et l'expression des valeurs et des seuils en termes de fréquence. Cette dernière condition est en effet essentielle pour faciliter la combinatoire finale de l'ensemble des indicateurs et obtenir un indice de criticité global (voir CHAPITRE 10).

8.3.1 Le modèle d'ajustement des périodes d'absence de pluie

La réflexion porte dès lors sur la meilleure description empirique possible des durées « sans pluie utile », c'est-à-dire sur un modèle qui puisse associer une fréquence à chacune des valeurs de la série considérée, tout en respectant les structures statistique et spatiale supposées de l'information.

Dans une étude menée pour appréhender le phénomène de sécheresse atmosphérique, au travers de la structuration des longueurs des périodes « sans pluie » supérieures à différents seuils, Ph. Martin a adapté un modèle afin d'ajuster les séries des durées « sans pluie », issues de la chronique d'enregistrement des précipitations au poste de Marseille (Martin, 2016).

Dans cette dernière étude, l'intérêt est porté sur les périodes longues sans pluies abondantes dans la perspective d'une étude de la sécheresse, qui représentent l'information la moins fournie de la série. Pour mettre en évidence la structuration de la distribution des durées « sans pluie », une approche discrète est en premier lieu adoptée. En portant le logarithme du logarithme des effectifs des classes, une visualisation de la variation presque linéique de l'effectif par classe est alors rendue possible. Toutefois, quel que soit le seuil considéré, il en ressort que seules les classes des petites périodes apparaissent bien ajustées à une double exponentielle.

Par conséquent, le recours à une approche continue est ensuite préféré. Puisque l'effectif varie selon les classes, en décroissant avec l'augmentation de leurs bornes, la fréquence des valeurs de durées « sans pluie » peut ainsi être mise en rapport avec un rang croissant. Cette relation, entre la fréquence d'apparition (FR) des longueurs des périodes « sans pluie » et la hiérarchie (donnée par le rang), correspond au modèle d'Estoup-Zipf que B. Mandelbrot (1975) a étendu, en introduisant un paramètre (ρ), qui correspond à un décalage sur le rang :

$$(8.5) \quad F_R = \omega(R + \rho)^{-\beta}$$

Avec :

- R le rang ;
- ρ le décalage ;
- β la pente du modèle ;
- ω une constante.

Cela permet de rendre compte d'une courbure assez générale, qui se dessine au niveau des fréquences les plus fortes (*i.e.* périodes les plus courtes), soit aux rangs les plus faibles.

L'objectif est alors de constater si, à partir de ce type de modèle, une relation entre les longueurs et leur fréquence cumulée (FC) peut être établie. Pour cela, les longueurs (L) des périodes sans pluies, classées des plus courtes aux plus longues, sont mises en regard de fréquences cumulées de la forme :

$$(8.6) \quad F_C = 1 - \left(\frac{R}{E} + 1 \right)$$

Avec :

- E étant l'effectif total des périodes sans pluies.

Les deux grandeurs étant exprimées sous forme logarithmique, elles sont ensuite projetées dans un graphique bilogarithmique. Ce dernier révèle alors une relation courbe, quel que soit le niveau du seuil considéré. Comme l'a montré B. Mandelbrot, cette courbure peut être modélisée en introduisant un décalage (Δ), que Ph. Martin a introduit sur la longueur, proportionnellement d'autant plus fort que le rang est faible, et inversement, dans la distribution :

$$(8.7) \quad \ln \left(1 - \frac{R}{E+1} \right) = \ln(\omega) - \beta \ln(L + \Delta)$$

La valeur de l'ajout (Δ) est obtenue par itération, jusqu'à l'obtention du meilleur coefficient de corrélation de la relation entre $\ln \left(1 - \frac{R}{E+1} \right)$ et $\ln(L + \Delta)$.

Ph. Martin a démontré que ce modèle s'ajuste correctement pour toutes les périodes, et en particulier pour les très longues périodes « sans pluie ». De surcroît, aucune suppression d'information au niveau des plus courtes périodes n'a été nécessaire.

Le modèle introduit, en outre, trois paramètres : un décalage, une constante et une pente. Le premier serait une mesure relative, pour chaque fréquence, de l'écart à l'ajustement final. Par conséquent, plus sa valeur est faible, plus le modèle de la distribution initiale est proche d'un modèle parétien strict. La pente, quant à elle, semble apporter une information relative à l'importance de la hiérarchie des tailles des périodes de longueurs croissantes. Il serait par ailleurs intéressant de voir dans quelle mesure ce dernier paramètre (estimé pour chaque année) pourrait constituer un indicateur synthétisant l'information « absence de pluie », pour caractériser l'état de pression climatique annuel, comme cela était précédemment suggéré pour la pente du modèle de Pareto.

8.3.2 Comparaison des ajustements des durées « sans pluie utile » (IP0)

Le modèle développé par Ph. Martin ayant montré de bons résultats sur la chronique de Marseille, les séries de durées « sans pluie utile » issues des chroniques enregistrées aux quatre postes pluviométriques, retenus sur le bassin des Gardons, sont donc ajustées au modèle précédemment décrit.

Les ajustements des valeurs issues des chroniques complètes sont dans un premier temps comparés entre les quatre postes pluviométriques, afin d'identifier l'apparition d'une structuration spatiale particulière de l'information climatique. L'analyse est ensuite complétée par une comparaison des ajustements des valeurs extraites des phases de récession, définies au droit des postes limnimétriques les plus proches, afin de constater si la structuration spatiale générale révélée est susceptible de se modifier selon la période considérée (*e.g.* chronique, récession, cycle hydrologique).

8.3.2.1 Structuration des séries issues des chroniques complètes

Les durées « sans pluie utile » sont extraites ici sur la période couvrant l'ensemble des enregistrements de débits disponibles, soit de 1955 à 2012. Les ajustements, pour chaque poste, sont très bons (ENCADRÉ E32.1). Les décalages sont les mêmes sauf pour Valleraugue où il est plus faible.

N'étant initialement envisagée que pour compléter la chronique d'Uzès en cas de lacunes, la chronique du poste de Nîmes n'a pas été étendue au-delà du 31/12/1995. Toutefois, comme pour l'analyse des pentes du modèle de Pareto, elle permet d'illustrer la dynamique globale. Par ailleurs, comparée aux autres postes sur les mêmes périodes 1955 - 1995, elle permet également de s'assurer que les structures statistique et spatiale de l'information climatique sont suffisamment robustes, à savoir si ces dernières ne se modifient pas (ou peu) lorsque des années supplémentaires sont intégrées dans l'analyse (FIGURE 8.7).

Globalement, les décalages et les pentes du modèle étendu d'Estoup-Zipf augmentent avec l'ajout d'années supplémentaires. La structure statistique paraît toutefois solide, car, si les valeurs des paramètres changent selon la période considérée, leur variation suit une dynamique commune (*i.e.* augmentation générale).

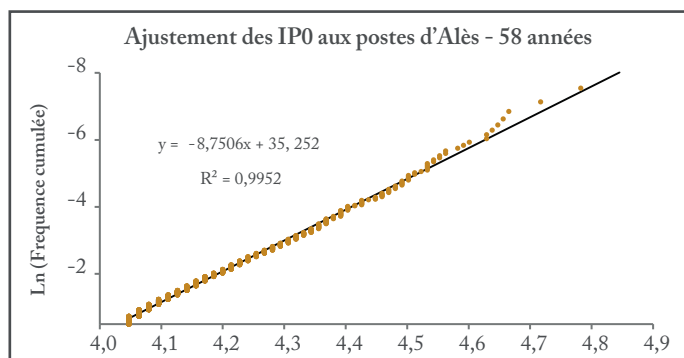
Par conséquent, la structuration spatiale des paramètres de loi demeure identique (ENCADRÉ E31.1). Elle affiche tout d'abord une diminution progressive des décalages entre Nîmes et Valle-

E32.1

AJUSTEMENT DES SÉRIES DE DURÉES «SANS PLUIE UTILE» À CHAQUE POSTE PLUVIOMÉTRIQUE - BASE CHRONIQUE

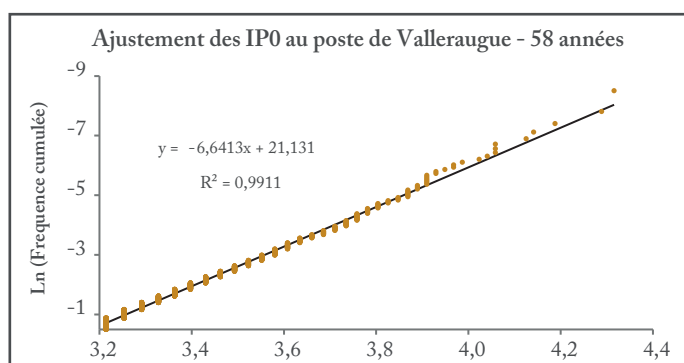
G32.1.1 AJUSTEMENT DES IP0 AUX POSTES D'ALÈS - 30007001 ET 30007004

Rang	Durée	IP0_Chron.	Ln(Freq cum)
1	1	4,048	-0,000438
2	1	4,048	-0,000876
3	1	4,048	-0,001315
⋮	⋮	⋮	⋮
2280	59	4,747	-6,634633
2281	67	4,814	-7,040098
2282	80	4,915	-7,733246



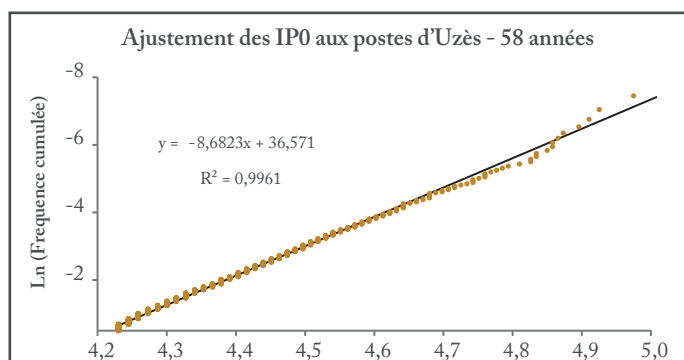
G32.1.2 AJUSTEMENT DES IP0 AU POSTE DE VALLERAUGUE - 30339001

Rang	Durée	IP0_Chron.	Ln(Freq cum)
1	1	3,214	-0,000335
2	1	3,214	-0,000670
3	1	3,214	-0,001006
⋮	⋮	⋮	⋮
2982	42	4,188	-6,902743
2983	49	4,289	-7,308208
2984	51	4,316	-8,001355



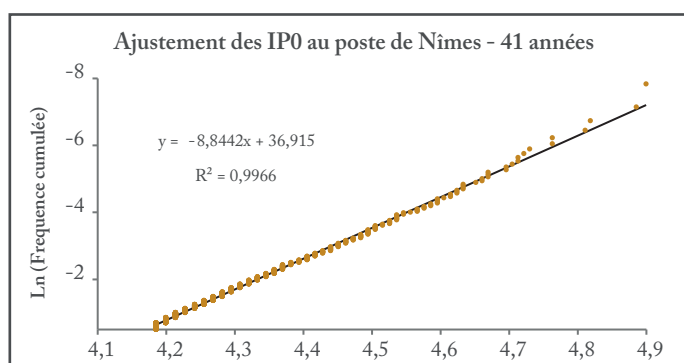
G32.1.3 AJUSTEMENT DES IP0 AUX POSTES D'UZÈS - 30334001 ET 30334003

Rang	Durée	IP0_Chron.	Ln(Freq cum)
1	1	4,230	-0,000483
2	1	4,230	-0,000967
3	1	4,230	-0,001450
⋮	⋮	⋮	⋮
2067	70	4,925	-6,536692
2068	77	4,975	-6,942157
2069	82	5,009	-7,635304



G32.1.4 AJUSTEMENT DES IP0 AU POSTE DE NÎMES - 30189002

Rang	Durée	IP0_Chron.	Ln(Freq cum)
1	1	4,190	-0,000655
2	1	4,190	-0,001310
3	1	4,190	-0,001965
⋮	⋮	⋮	⋮
1525	62	4,844	-6,233103
1526	71	4,913	-6,638568
1527	73	4,927	-7,331715



	Nîmes		Uzès		Alès		Valleraugue	
	1955 - 1995	1955 - 2012	1955 - 1995	1955 - 2012	1955 - 1995	1955 - 2012	1955 - 1995	1955 - 2012
Décalage	104	-	55	34,5	60	51,7	30	27,3
Pente	-18,82	-	-9,99	-7,38	-11,86	-10,62	-10,50	-9,65
R ²	0,994	-	0,994	0,993	0,994	0,994	-0,988	-0,987

FIGURE 8.7 : VALEUR DES PARAMÈTRES D'AJUSTEMENT DE LA DISTRIBUTION DES DURÉES « SANS PLUIE UTILE » DE CHAQUE PLUVIOMÈTRE - COMPARAISON SUR LES PÉRIODES 1955-1995 ET 1955 - 2012 - BASE CHRONIQUE

raugue, où la distribution des durées « sans pluie utile » serait davantage parétienne. Les pentes suivent une dynamique similaire, soit une diminution générale avec l'éloignement à la mer, sauf entre Uzès et Alès elle augmenterait légèrement, quelle que soit la période considérée.

La représentation spatialisée des pentes semble toutefois faire émerger des nuances plus locales, qui n'auraient pas été suspectées si le poste de Nîmes n'avait pas été inclus dans l'analyse (ENCADRÉ E3.1.2). En effet, la spatialisation de l'information issue du paramètre semble beaucoup plus progressive et suivre un axe bien défini lorsque seuls les postes d'Uzès, Alès et Valleraugue sont pris en compte. En revanche, l'intégration du poste de Nîmes modifie l'axe de progression de l'information. L'information traduite à Uzès pourrait dès lors être considérée comme localement spécifique. Il serait donc judicieux d'étendre l'analyse à d'autres postes afin de vérifier ces hypothèses.

8.3.2.2 Structuration des ajustements des séries issues des chroniques de récession

La démarche est reproduite à l'identique sur les séries issues des récessions. L'ensemble des ajustements des durées « sans pluie effective » est légèrement moins bon que sur les chroniques complètes, mais demeure néanmoins très satisfaisant (ENCADRÉ 3.2.2). Ces résultats sont d'ailleurs assez remarquables, puisque moins de 200 périodes sont traitées dans le cas des récessions, contre un peu plus d'un millier de périodes extraites des chroniques complètes.

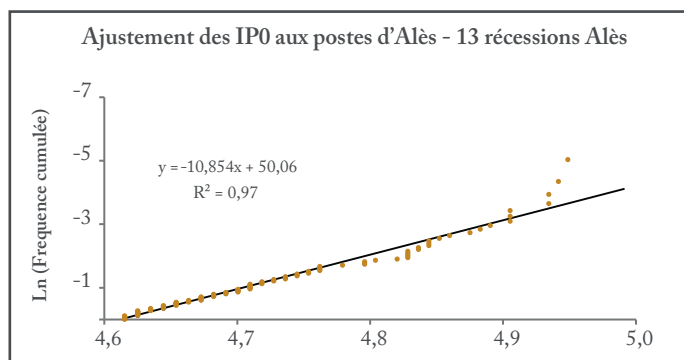
Une comparaison peut par conséquent être effectuée entre les valeurs des pentes obtenues à partir des chroniques (de chaque poste pluviométrique) et des valeurs des pentes obtenues à partir des chroniques de récession (définies par les postes de débits équivalents). Il s'agit ainsi d'observer la structuration spatiale du paramètre, lequel traduit la hiérarchie des classes des durées croissantes et de vérifier si elle est susceptible d'être modifiée lorsque la période analysée est restreinte à une saison, une phase de récession, etc. (ENCADRÉ E3.1.2)

Les pentes obtenues à partir des chroniques de récession sont beaucoup plus importantes aux postes de Valleraugue et d'Alès, tandis qu'elles apparaissent plus faibles à Nîmes et Uzès. Ces derniers semblent par ailleurs offrir la même information, puisqu'ils présentent une pente, une constante et un décalage quasi identiques (*i.e.* même structure statistique). Une structuration différente, propre à la phase de récession, semble donc se profiler. En effet, l'analyse des pentes sur les chroniques complètes laissait supposer, au contraire, une spécificité climatique à Uzès.

Cette modification de dynamique spatiale de l'information climatique, véhiculée par la pente du modèle étendu d'Estoup-Zipf, est par ailleurs soulignée par sa représentation spatialisée (ENCADRÉ

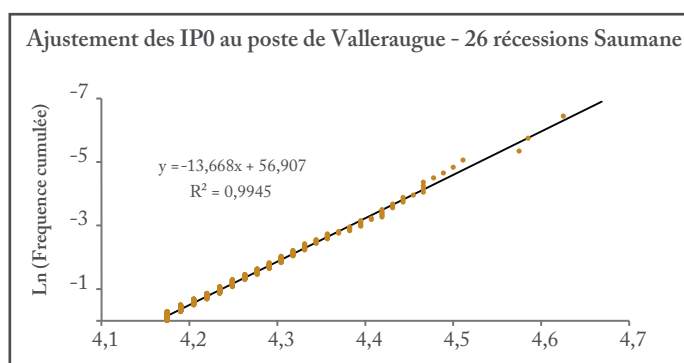
G32.2.1 AJUSTEMENT DES IP0 AUX POSTES D'ALÈS - RÉCESSIONS ALÈS

Rang	Durée	IP0_Récession	Ln(Freq cum.)
1	1	4,615	-0,006515
2	1	4,615	-0,013072
3	1	4,615	-0,019673
⋮	⋮	⋮	⋮
151	39	4,934	-3,938340
152	40	4,942	-4,343805
153	41	4,949	-5,036953



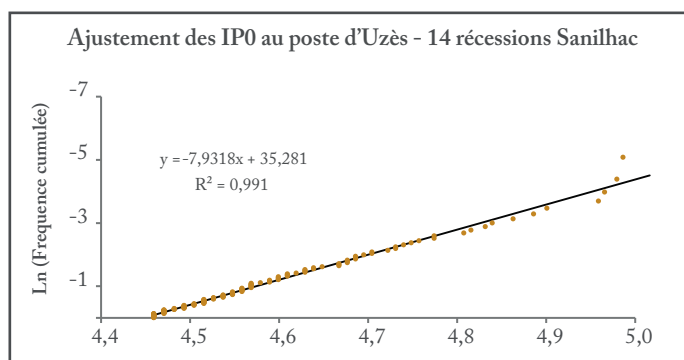
G32.2.2 AJUSTEMENT DES IP0 AU POSTE DE VALLERAUGUE - RÉCESSIONS SAUMANE

Rang	Durée	IP0_Récession	Ln(Freq cum.)
1	1	4,175	-0,001589
2	1	4,175	-0,003180
3	1	4,175	-0,004773
⋮	⋮	⋮	⋮
627	33	4,575	-5,347108
628	34	4,585	-5,725273
629	38	4,625	-6,445720



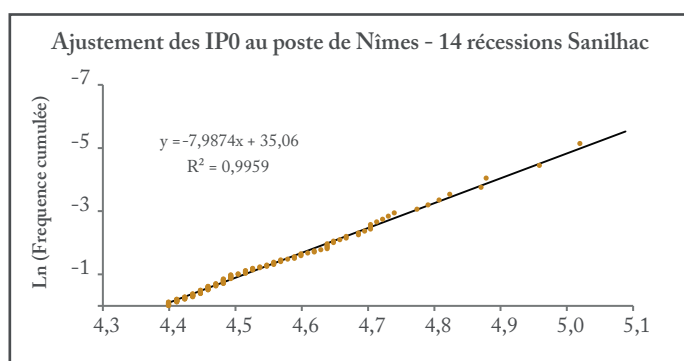
G32.2.3 AJUSTEMENT DES IP0 AU POSTE D'UZÈS - RÉCESSIONS SANILHAC - LA BAUME

Rang	Durée	IP0_Récession	Ln(Freq cum.)
1	1	4,459	-0,006231
2	1	4,459	-0,012500
3	1	4,459	-0,018809
⋮	⋮	⋮	⋮
158	58	4,966	-3,982792
159	60	4,980	-4,388257
160	61	4,987	-5,081404



G32.2.4 AJUSTEMENT DES IP0 AU POSTE DE NÎMES - RÉCESSIONS SANILHAC - LA BAUME

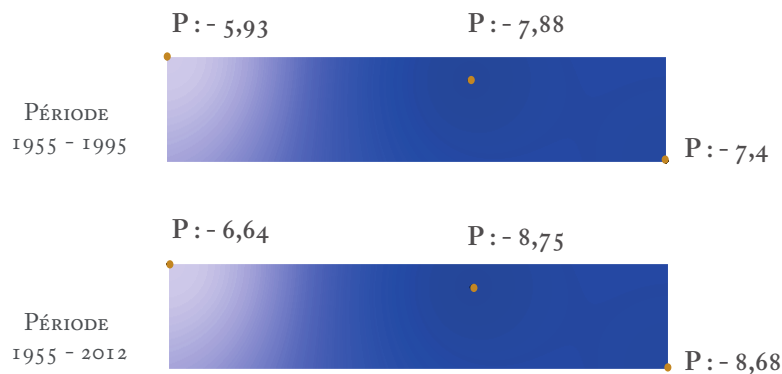
Rang	Durée	IP0_Récession	Ln(Freq cum.)
1	1	4,399	-0,005865
2	1	4,399	-0,011765
3	1	4,399	-0,017700
⋮	⋮	⋮	⋮
158	58	4,878	-4,043051
159	60	4,959	-4,448516
160	61	5,020	-5,141664



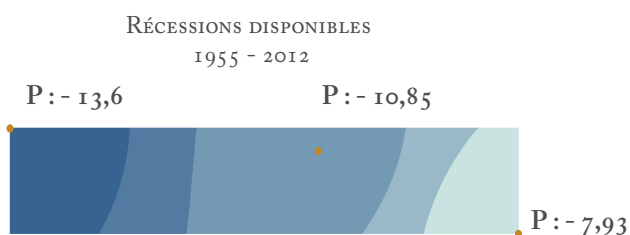
F32.2.1

INTERPOLATION SPATIALE DES PENTES DU MODÈLE D'AJUSTEMENT DES DURÉES «SANS
PLUIE UTILE» - MÉTHODE IDW - TROIS POSTES

ÉTIREMENT



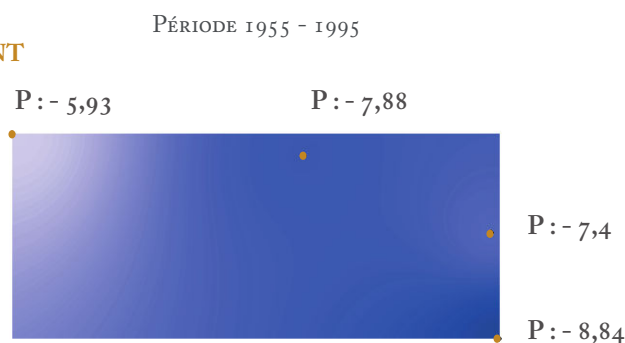
CLASSES DE JENKS



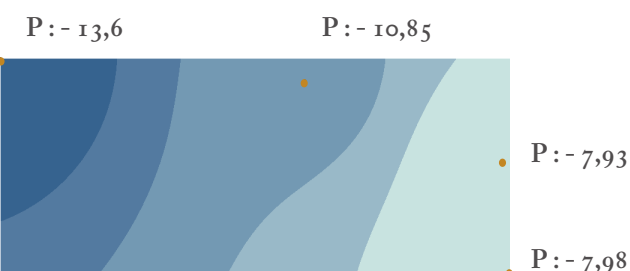
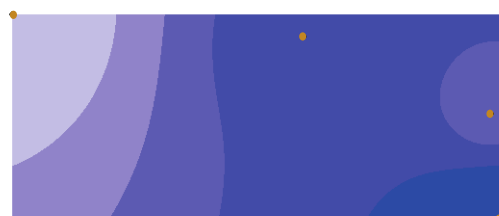
F32.2.2

INTERPOLATION SPATIALE DES PENTES DU MODÈLE D'AJUSTEMENT DES DURÉES «SANS
PLUIE UTILE» - MÉTHODE IDW - QUATRE POSTES

ÉTIREMENT



CLASSES DE JENKS



E_{3I.2}). Quel que soit le nombre de postes considérés, la pente diminue suivant une progression depuis la mer vers la montagne. En outre, trois pôles semblent se dégager : Nîmes-Uzès, Alès et Valleraugue. Entre eux, la progression des valeurs varie selon la méthode d'interpolation employée, le nombre de classes de discrétisation définies et la méthode de discrétisation utilisée.

Mais dans l'ensemble, la dynamique apparaît complètement inversée de celle établie avec les chroniques complètes. En récession, l'information climatique présente une structuration plus nette, sans rupture (progressive) ni spécificité locale, suivant un axe mer - montagne. Cela suppose également qu'il ne serait pas indispensable de mobiliser simultanément les données issues des postes de Nîmes et d'Uzès, pour une analyse basée sur les phases de récession. Un seul des deux postes serait suffisant.

La pente du modèle étendu d'Estoup-Zipf représente une information plus cohérente, notamment en récession. Elle présente une bonne structure, à la fois statistique et spatiale (plus robuste que la pente du modèle « normalisé » de Pareto). De plus, elle affiche clairement le changement de structure de l'information climatique, en lien avec la période considérée (*e.g.* années complètes, périodes de récession).

La nouvelle structure spécifique aux phases de récession se justifierait à Nîmes et Uzès par une augmentation du nombre de durées « sans pluie utile » longues et une diminution des durées courtes. Selon une logique similaire, les fortes pentes mises en évidence à Alès et Valleraugue pourraient être imputées à des durées très longues, mais peu nombreuses, les séries étant probablement davantage segmentées à cause de l'effet du relief et des petites pluies localisées.

Ainsi, il serait intéressant contrôler la pertinence de ce paramètre, en qualité d'indicateur synthétique annuel. Cela reviendrait à le définir annuellement à partir des durées « sans pluie utile » de récession ou annuelles, et d'établir une statistique sur la série qu'il constituerait dès lors.

8.3.3 Discrétisation des états de criticité de l'information climatique

À partir des ajustements obtenus, des seuils peuvent ensuite donc être établis à partir de la fréquence cumulée, définie pour chaque valeur de durée « sans pluie utile ».

Comme pour les indicateurs développés précédemment (I_{vj} et H_{nj}), les seuils sont ici aussi pré-définis statistiquement, sans besoin de recourir au préalable à un choix arbitraire ou à une évaluation d'expert. La question relative au choix des classes d'état à associer à chaque seuil, qui conditionne la répartition des valeurs (notamment les plus extrêmes dans le sec) dans les classes critiques se pose néanmoins ici aussi.

De plus, selon la période étudiée (chronique ou récession), ces seuils seront amenés à varier. En effet, des fréquences plus faibles apparaissent sur les séries issues des chroniques complètes. Cela s'explique par le fait que les années de récessions analysées sont limitées aux séries d'enregistrement des débits (moins longues et discontinues), tandis que les chroniques complètes couvrent jusqu'à 58 années sans lacunes, et incluent par ailleurs les périodes qui s'étendent au-delà de l'étiage. Ces

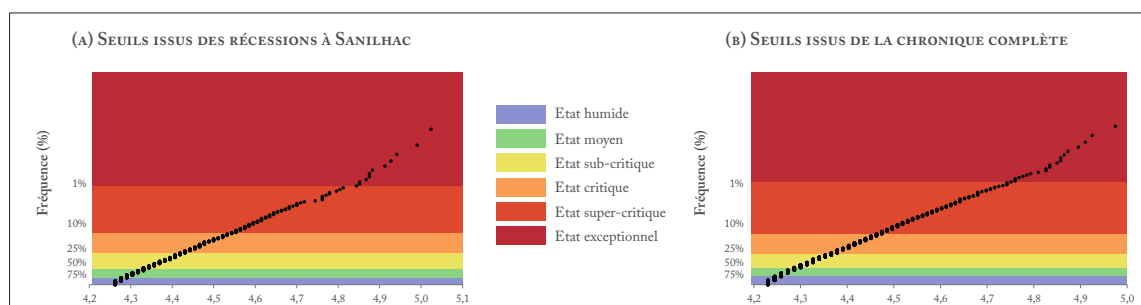


FIGURE 8.8 : RÉPARTITION DES VALEURS DE L'INDICATEUR DANS LES ÉTATS DE CRITICITÉ SELON LES CLASSES DE SEUILS — EXEMPLE AU POSTE D'UZÈS — CHRONIQUE ET RÉCESSION

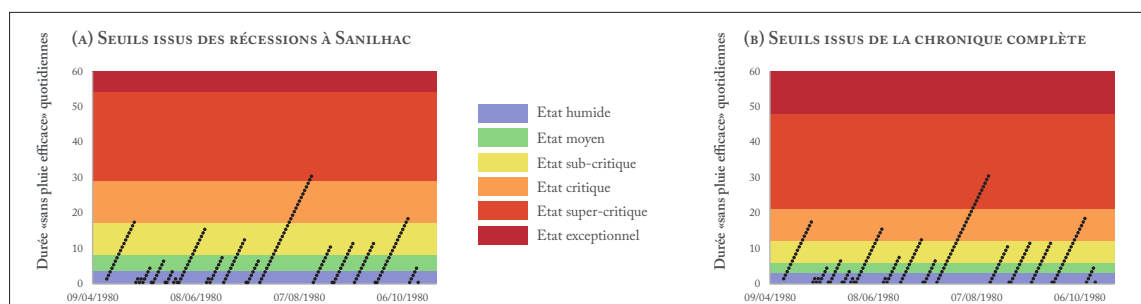


FIGURE 8.9 : LE CHRONO-KINDÉNOGRAMME OU L'ÉVOLUTION TEMPORELLE DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DE L'INDICE DE FORÇAGE CLIMATIQUE AU POSTE D'UZÈS — BASE CHRONIQUE ET RÉCESSION

dernières recensent donc des gammes de durées beaucoup plus étendues et intègrent davantage de valeurs extrêmes (*i.e.* longues durées).

Afin de maintenir une cohérence méthodologique, les seuils sont adaptés de sorte à observer ou atteindre des états exceptionnels, pour chaque découpage temporel (FIGURE 8.8). Ils seront sans doute amenés à évoluer et seront ajustés à l'issue de confrontations de la méthode globale avec des situations connues, dans l'humide comme dans le sec.

8.4 Le Chrono-kindénogramme ou l'évolution temporelle de l'état de criticité de l'indicateur

Une fois les seuils établis, une analyse chronologique des niveaux de criticité de l'indice volumique journalier par poste peut être réalisée graphiquement par le biais du chrono-kindénogramme (FIGURE 8.9).

Sur l'exemple pris au poste d'Uzès, l'état journalier des valeurs prises peut être identifié et les périodes les plus problématiques peuvent être appréciées d'un simple coup d'œil.

En conservant des seuils identiques pour les séries issues de la chronique totale et des phases de récession, il apparaît que les situations soient minimisées dans le premier cas. Au cours de la récession de l'année 1980, définie au poste limnimétrique de Sanilhac, l'état journalier est majoritairement humide à normal, suivant les seuils définis sur la chronique complète, et l'état super-critique est atteint sur deux à trois jours seulement. En revanche, au regard des seuils définis sur la base des phases

de récession, l'état journalier est majoritairement sub-critique, et le nombre de jours atteignant les états critique à super-critique est plus important. Ainsi, la question des choix à opérer sur les seuils est fondamentale et nécessite une réflexion particulière, plus poussée.

Conclusion — Pour assurer le suivi d'une situation de basses eaux, l'information relative à l'absence de pluie a été choisie, à défaut de l'information relative aux apports. Il est en effet supposé que l'absence est un moteur de la montée dans les états critiques, une fois la situation engagée. En revanche, les apports (cumuls de pluies) pourraient constituer une information complémentaire, afin d'anticiper l'amorce du phénomène (période de veille : identification de l'état du système avant l'entrée dans les niveaux critiques).

L'analyse de l'information relative au forçage climatique (ici les durées « sans pluie utile ») a été effectuée suivant un découpage de la série climatique asservi au fonctionnement hydrologique. Les longueurs issues de la chronique complète ont été utilisées de sorte à coïncider avec le cycle hydrologique (voir CHAPITRE 9, et les périodes incluses dans les phases de récession, définies au poste limnimétrique le plus proche, ont été employées pour caractériser l'information d'absence de pluie aux phases de décroissance de fin de cycle.

Les séries constituées à partir des valeurs issues des chroniques et des récessions ne présentant pas la structure statistique gaussienne souhaitée, elles ont été ajustées au modèle d'Estoup-Zipf, étendu par B. Mandelbrot et adapté par Ph. Martin, lequel a permis la définition de seuils statistiques en termes de fréquence. Cette dernière modalité est essentielle car elle devrait autoriser la comparaison puis la combinatoire ultérieure de l'information climatique aux informations hydrologiques (Ivj et IH_{Nj}). Selon le découpage temporel choisi, il apparaît que, pour des états de criticité définis suivant les mêmes fréquences-seuil (1 %, 10 %, etc.), certaines situations soient minimisées dans un cas et surestimées dans l'autre. C'est pourquoi, la question des seuils devra être approfondie à deux niveaux :

- Celui des seuils statistiques pour déterminer les états de criticité : faut-il, par exemple, conserver des seuils identiques pour les deux découpages ?
- Celui des seuils spécifiques à l'information « absence de pluie » : faut-il définir les périodes « sans pluie utile » de manière absolue (cumul des jours pour lesquels la pluie utile est inférieure ou égale à 0 mm), de manière réglementaire (cumul des jours pour lesquels la pluie utile est inférieure ou égale à 1 mm), etc. ? En tenant compte des erreurs de mesure, un seuil fixé à 3 mm (au minimum) semble correct.

Quatrième partie

DE L'ANALYSE À LA SYNTHÈSE : VERS UN OUTIL OPÉRATIONNEL POUR LA DÉFINITION D'UN INDICE DE TENSION EN BASSES EAUX

À l'issue des traitements statistiques opérés sur les variables hydro-climatiques, des indicateurs ont été élaborés. Il s'agit dès lors de réfléchir aux modalités à opérer pour leur croisement, afin d'obtenir un premier indice, synthétique, caractérisant l'offre quantitative (FIGURE 8.10).

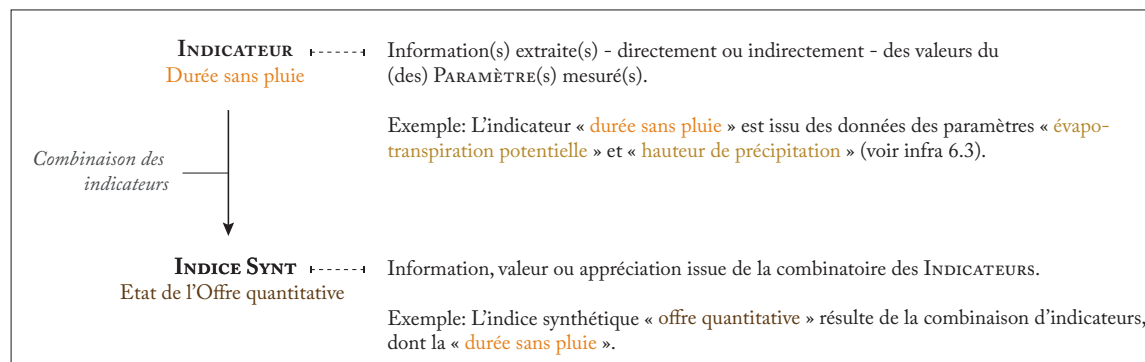


FIGURE 8.10 : DE L'INDICATEUR À L'INDICE SYNTHÉTIQUE : DÉFINITIONS

Toutefois, avant de s'engager dans cette nouvelle phase de modélisation (*i.e.* la combinatoire), il est indispensable de s'assurer de la validité des indicateurs. Pour cela, les modèles statistiques sont confrontés à des situations passées et marquées dans le sec, et mis au regard des décisions administratives. Dans le cas où les décisions sont en accord avec ce que l'indicateur révèle (de par son état) cela suppose qu'elles sont justes et bien fondées. Sinon, cela signifie qu'il faut s'interroger sur, d'une part, la construction de l'indicateur et, d'autre part, sur le processus de décision.

Cela étant, au vu des fluctuations importantes révélées des Ivj et des IH_{Nj}, il faut s'attendre à retrouver une certaine irrégularité de l'information hydrologique, mais sans doute moins marquée, ce qui ne rendra sans doute pas leur emploi en l'état optimal pour une mise en œuvre opérationnelle.

Par ailleurs, dans une perspective de mise en œuvre la démarche, il est nécessaire de réfléchir à un certain nombre de modalités préalables, relatives aux attentes portées par l'ensemble des utilisateurs potentiels (destinataires). Cela revient donc à identifier les postes de mesure auxquels se référer, à ajuster les indicateurs et les seuils, et à restituer l'information finale de manière simple, visuelle et explicite.

Des propositions méthodologiques sont ensuite apportées sur les conditions techniques d'une modélisation heuristique complète de la criticité des basses eaux, de sorte à constituer les bases d'une mise en œuvre opérationnelle de la méthode, pour la détection et le suivi du phénomène par exemple. Certaines étapes sont par ailleurs explicitées au travers d'une mise en application du modèle sur le Gardon d'Anduze, à l'aide d'outils carto-graphiques, spécialement conçus pour l'étude des basses eaux.

À l'issu de ce travail exploratoire, un indice synthétique relatif à l'offre quantitative est obtenu, suite auquel des perspectives méthodologiques et techniques sont avancées. Elles concernent plus précisément les phases finales du processus de modélisation, qui doivent alors déboucher sur la création de l'indice de criticité et de l'indice de tension (FIGURE 8.11).

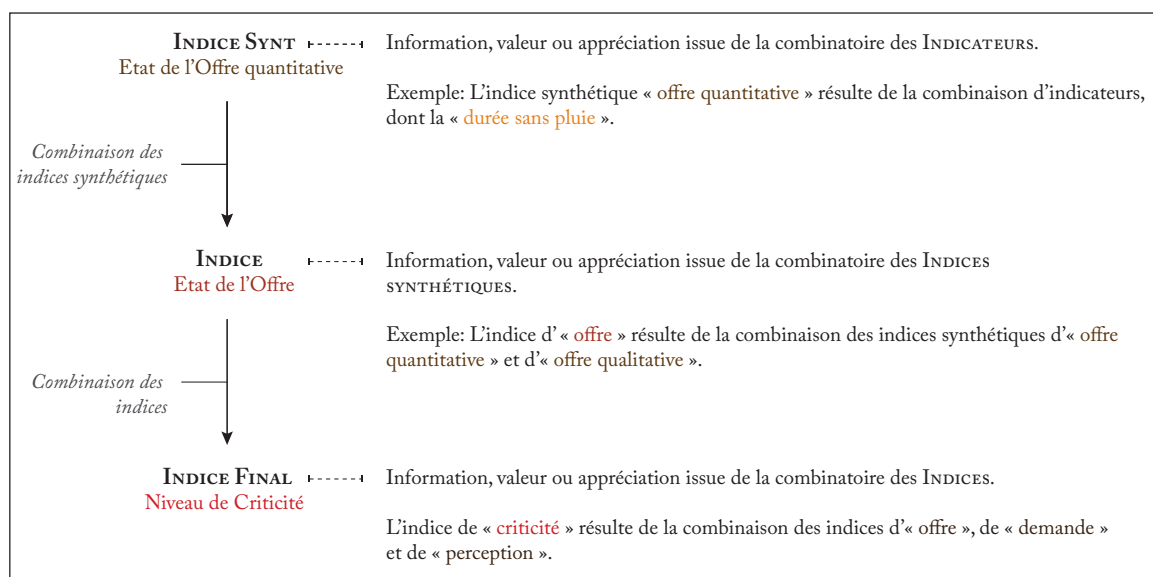


FIGURE 8.11 : DE L'INDICE SYNTHÉTIQUE À L'INDICE DE CRITICITÉ : DÉFINITIONS

**VALIDATION DES INDICATEURS PAR APPROCHES
CARTO-GRAPHIQUES DE LEURS ÉTATS DE CRITICITÉ
SUR LE BASSIN DES GARDONS**

9.1	La dynamique spatiale des états de criticité de l'indice volumique journalier . . .	289
9.1.1	La dynamique spatiale de l'indice volumique journalier issu des récessions	289
9.1.2	La dynamique spatiale de l'indice volumique journalier issu des cycles hydrologiques	295
9.2	État de criticité des indicateurs hydroclimatiques <i>vs.</i> niveau d'alerte	297
9.2.1	État du volume superficiel (Ivj) <i>vs.</i> état d'alerte hydrologique	298
9.2.2	État du volume souterrain (IHnj) <i>vs.</i> état d'alerte hydrologique	306
9.2.3	État du forçage climatique (IP0j) <i>vs.</i> état d'alerte hydrologique	321
9.3	États exceptionnels des indicateurs : Analyse par dates « clé »	329
9.3.1	L'état du volume superficiel <i>vs.</i> état exceptionnel de l'indice climatique	330
9.3.2	L'état exceptionnel du volume superficiel <i>vs.</i> état de l'indice climatique	332
9.3.3	L'état exceptionnel du volume superficiel <i>vs.</i> état du volume souterrain et de l'indice climatique	335
9.3.4	L'état exceptionnel des indices pluviométriques <i>vs.</i> l'état des volumes superficiels et souterrains	337

Trois indicateurs ont ainsi été conçus pour renseigner les variables les mieux connues (volume superficiel, volume souterrain, apport climatique et perte évaporatoire) et des seuils statistiques leur ont été attribués. Il s'agit à présent de s'assurer de leur pertinence, à savoir si (1) ils traduisent le bon état de la situation évaluée ; (2) si leurs états respectifs sont concordants (*i.e.* si les relations supposées entre indicateurs sont bien décrites) ; (3) si les dynamiques spatiales mises en évidence précédemment sont identiques et enfin (4) si les modalités de la montée vers un état exceptionnel peuvent être déjà identifiées.

Ainsi, la démarche de validation des indicateurs est déclinée en trois phases. Dans un premier temps, l'analyse se concentre sur la structuration spatiale et dynamique de l'état du volume superficiel. En d'autres termes, l'observation se concentre sur la montée dans les niveaux critiques de l'indice volumique journalier, sur une période donnée. Il s'agit en outre de définir si cette évolution se fait progressivement, suivant une logique amont-aval, et si, par ailleurs, le retour à une situation normale s'établit suivant une même dynamique, ou bien si, au contraire, aucune logique n'est décelée. Le cas échéant, des hypothèses explicatives seront avancées, et des propositions de modifications de l'indicateur seront formulées.

Dans un second temps, l'analyse porte sur la cohérence entre les indicateurs et la perception de la situation par les acteurs locaux. Cela revient à confronter l'état du volume superficiel, du volume souterrain et du forçage climatique, avec le niveau d'alerte activé par les autorités (arrêtés-cadre sécheresse). Cette comparaison devrait permettre également d'identifier le(s) critère(s) motivant le choix du niveau et de la date d'activation.

Enfin, le processus de validation est complété par une confrontation des niveaux pris par chaque indicateur à des dates « clé ». En fixant comme critère le niveau exceptionnel atteint par l'un des indicateurs, il est possible d'observer l'état des autres indicateurs à cette même date : l'état exceptionnel de l'indice volumique journalier est-il lié à l'état de l'indice climatique ? A celui de l'indice piézomé-

trique ? Dans quels états sont les volumes superficiel et souterrain lorsque le forçage climatique est maximal sur l'ensemble du bassin ? Etc.

Les résultats de l'analyse de la validité des indicateurs sont présentés, pour une meilleure lisibilité, sous format graphique et cartographique.

Par ailleurs, le processus de traitement statistique, opéré sur les variables relatives aux volumes superficiel et souterrain, sur les séries issues du découpage des chroniques en phase de récession, a également été appliqué, suivant des étapes et avec des méthodes strictement identiques, sur les séries issues du découpage des chroniques en cycles hydrologiques (ENCADRÉS E14.2 et E22.2). Les résultats sont présentés dans ce qui suit, puisque la démarche de validation est menée en parallèle sur les résultats obtenus, à chaque poste de mesure, sur la base du découpage en récessions et en cycles.

9.1 La dynamique spatiale des états de criticité de l'indice volumique journalier

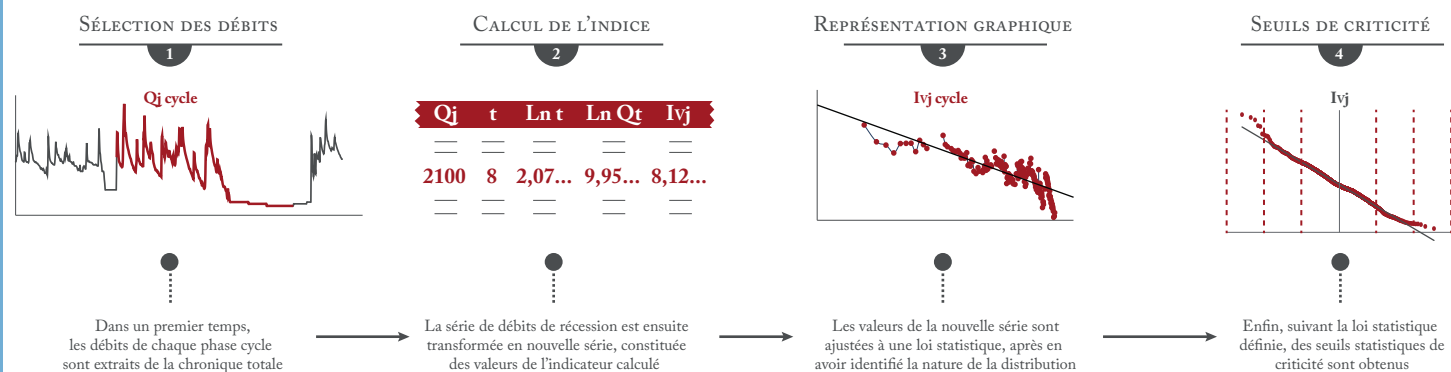
Pour mettre en lumière la dynamique spatiale supposée (*i.e.* une progression de la tension de l'amont vers l'aval) des états de criticité du volume superficiel, la période estivale de l'année 2011 (du 1^{er} juin au 15 septembre) est retenue, et les états pris par l'indicateur sont observés tous les quinze jours. Ainsi, une analyse dynamique de l'évolution de la situation en période potentiellement la plus tendue est menée sur chaque point du réseau hydrologique (ENCADRÉS E33.1 et E33.2). L'année 2011 n'a pas été choisie aléatoirement, puisque, pour appuyer la démarche de validation des indicateurs, il a semblé préférable de mobiliser le maximum d'informations possible. Il s'avère ainsi que 2011 correspond à l'une des années durant lesquelles le nombre de postes limnimétriques en activité est le plus important.

L'objectif présent repose donc sur l'observation des modalités de structuration spatiale et temporelle de la criticité du volume superficiel. L'analyse est par ailleurs conduite parallèlement sur les indicateurs issus des phases de récession et des cycles hydrologiques, afin de vérifier qu'ils traduisent une information similaire ou si, au contraire, un indicateur issu d'un découpage temporel se révèle plus pertinent qu'un autre.

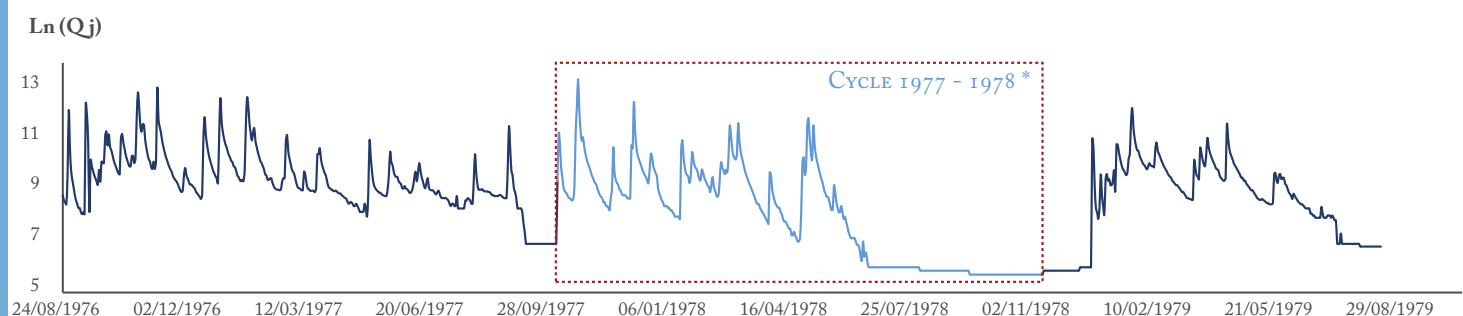
Afin de faciliter la compréhension de la lecture des résultats, la FIGURE 9.1 propose un petit rappel sur la dénomination des linéaires, employée par la suite dans l'analyse.

9.1.1 La dynamique spatiale de l'indice volumique journalier issu des récessions

Pour aborder la dynamique spatiale des états de criticité pris par l'indice volumique journalier en chaque point du réseau et à un intervalle temporel donné (ici tous les quinze jours), la cartographie apparaît être l'outil le plus adapté. Le recours à cette forme de représentation, qui implique une spatialisation de l'information ponctuelle, permet par ailleurs de visualiser les lacunes en termes de données, point noir de ce travail. Aussi, même s'il est possible d'extrapoler certaines valeurs obtenues



G14.2.1 CALCUL DE L'INDICE VOLUMIQUE JOURNALIER À PARTIR DES DÉBITS DU CYCLE HYDROLOGIQUE



* Le cycle (1977 - 1978) correspond à la période comprise entre le jour suivant l'étiage strict de l'année 1977 et s'achève le jour de l'étiage strict de l'année 1978.

Source: Banque Hydro, 2014

$$Ivj^* = \text{Ln}(Q_{t-1} / ((\text{Ln}(Q_t) - \text{Ln}(Q_{t-1})) / (\text{Ln}(t+1) - \text{Ln}(t)))) \times 0.0864$$

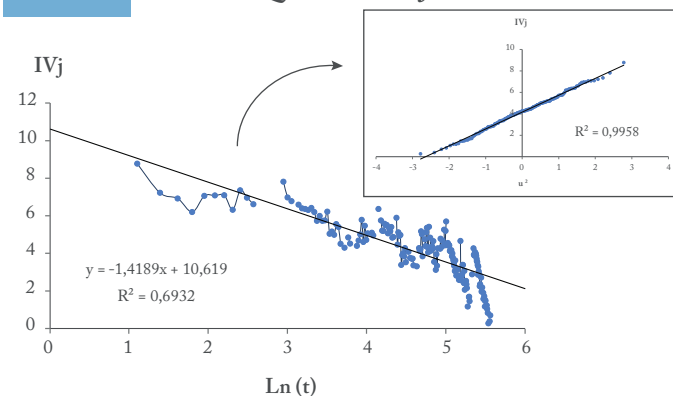
* Indice Volumique journalier = indice issu des débits journaliers, qui renseigne le «volume disponible en surface».

T14.2 INDICES JOURNALIERS - CYCLE 1977 - 1978

Qj	t (jour)	Ln t	Ln Qt	Ivj
11 600	1	0	9.2587604	-*
74 000	2	0.6931472	11.21182	-
49 600	3	1.0986123	10.811746	8.7764374
20 100	4	1.3862944	9.9084751	7.2188118
13 700	5	1.6094379	9.5251511	6.9186422
8 850	6	1.7917595	9.0881727	6.2022717
8 000	7	1.9459101	8.9871968	7.0624537
7 400	8	2.0794415	8.9092353	7.0765502
6 950	9	2.1972246	8.8464969	7.0903392
6 200	10	2.3025851	8.7323046	6.3172328
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

* Lorsque Qj (exprimé en l/s) est supérieur ou égal à Q(j-1), l'Ivj n'est pas renseigné; ces situations correspondant à une montée de crue ou au maintien du débit.

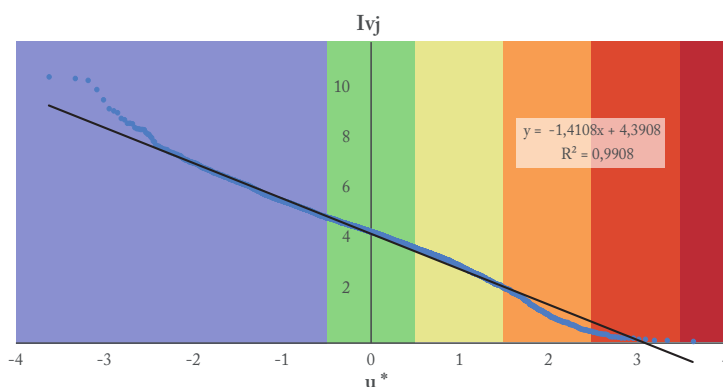
G14.2.2 DYNAMIQUE* DES Ivj - CYCLE 1977-78



* Evolution temporelle de l'Indice Volumique journalier durant le cycle 1977-1978. Les Ivj ont une distribution gaussienne et s'ajustent à la loi normale standard inverse.

G14.2.3 AJUSTEMENT STATISTIQUE DES Ivj ET DÉTERMINATION DES SEUILS DE CRITICITÉ - 18 CYCLES

- Etat humide: situation satisfaisante
- Etat moyen: situation normale
- Etat sub-critique: situation à surveiller
- Etat critique: situation est problématique
- Etat super-critique: situation de crise
- Etat exceptionnel: situation catastrophique



* Les Ivj, issus des 18 cycles (sans lacunes) enregistrés à Anduze, ont une distribution gaussienne et s'ajustent à la loi normale standard inverse. u est la variable centrée réduite, utilisée comme seuil de criticité de l'indicateur de l'état journalier de la variable «volume superficiel disponible» (ici l'Ivj).

E22.2

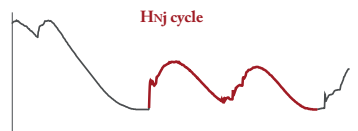
CONSTRUCTION D'UN INDICE PIÉZOMÉTRIQUE JOURNALIER - EXEMPLE DE LA NAPPE ALLUVIALE À MASSILLARGUES - ATTUECH - BASE CYCLE HYDROLOGIQUE

SÉLECTION DES NIVEAUX PIÉZOMÉTRIQUES

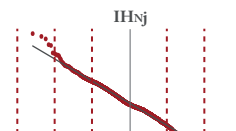
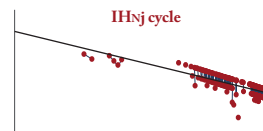
CALCUL DE L'INDICE

REPRÉSENTATION GRAPHIQUE

SEUILS DE CRITICITÉ



Hnj	t	Ln t	Ln Hnt	IHnj
117,33	5	1,60...	4,76...	8,57...



Dans un premier temps, les hauteurs de chaque phase de récession sont extraits de la chronique totale

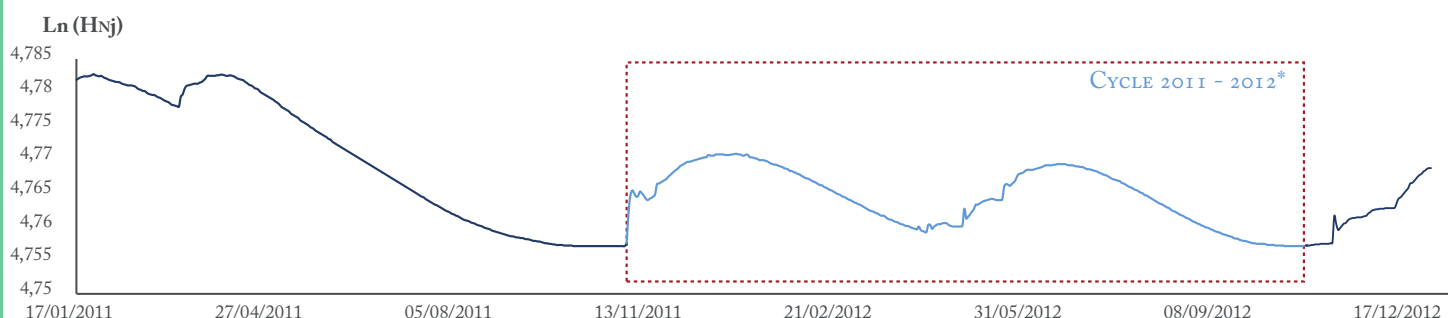
La série de hauteurs de récession est ensuite transformée en nouvelle série, constituée des valeurs de l'indicateur calculé

Les valeurs de la nouvelle série sont ajustées à une loi statistique, après en avoir identifié la nature de la distribution

Enfin, suivant la loi statistique définie, des seuils statistiques de criticité sont obtenus

G22.2.1

CALCUL DE L'INDICE DE HAUTEUR DE NAPPE JOURNALIER À PARTIR DES NIVEAUX PIÉZOMÉTRIQUES DU CYCLE HYDROLOGIQUE



* Le cycle (2011 - 2012) correspond à la période comprise entre le jour suivant le niveau le plus bas atteint au cours de l'année 2011 et s'achève le jour du plus bas niveau atteint au cours de l'année 2012.

Source: Portail ADES, 2016

$$IH_{nj}^* = Ln(H_{nt-1} / ((Ln(H_{nt}) - Ln(H_{nt-1})) / (Ln(t+1) - Ln(t)))) \times 0.0864$$

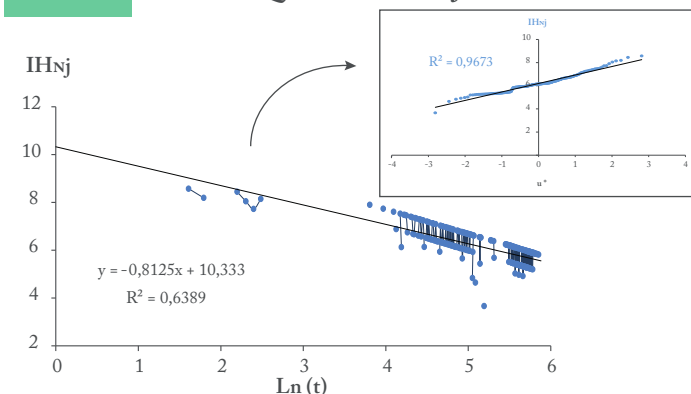
* Indice de Hauteur de nappe journalier = indice issu des niveaux piézométriques journaliers, qui renseigne le «volume souterrain disponible».

T22.2 INDICES JOURNALIERS - CYCLE 2011 - 2012

Hnj	t (jour)	Ln t	Ln Hnt	IHnj
116.46	1	0	4.7575479	-*
116.99	2	0.6931472	4.7620885	-
117.30	3	1.0986123	4.7647348	-
117.38	4	1.3862944	4.7654165	-
117.33	5	1.6094379	4.7649905	8.5776447
117.27	6	1.7917595	4.764479	8.192385
117.28	7	1.9459101	4.7645642	-
117.36	8	2.0794415	4.7552461	-
117.33	9	2.1972246	4.7649905	8.4492437
117.29	10	2.3025851	4.7646495	8.0495514
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

* Lorsque Hnj (exprimé en mètre NGF) est supérieur ou égal à Hn(j-1), l'IHnj n'est pas renseigné; ces situations correspondant à une augmentation ou au maintien du niveau piézométrique.

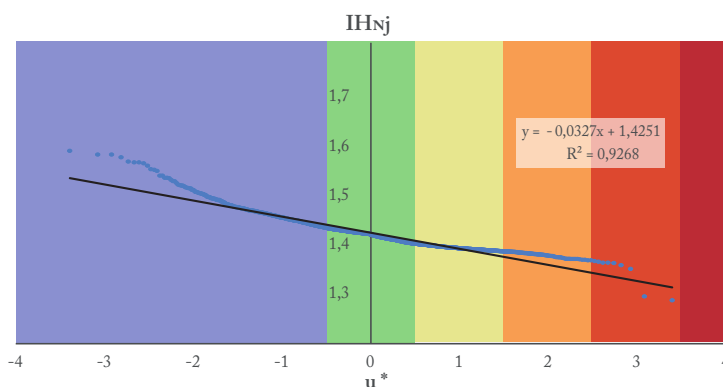
G22.2.2 DYNAMIQUE* DES IHnj - CYCLE 2011-12



* Evolution temporelle de l'Indice de Hauteur de nappe journalier durant le cycle 2011-12. Les IHnj ont une distribution gaussienne et s'ajustent à la loi normale standard inverse.

G22.2.3 AJUSTEMENT STATISTIQUE DES IHnj ET DÉTERMINATION DES SEUILS DE CRITICITÉ - 7 CYCLES

- Etat humide: situation satisfaisante
- Etat moyen: situation normale
- Etat sub-critique: la situation à surveiller
- Etat critique: la situation problématique
- Etat super-critique: la situation de crise
- Etat exceptionnel: situation catastrophique



* Les IHnj (élevés à la puissance 0.2), issus des 7 cycles (sans lacunes) enregistrés à Massillargues-Attuech, ont une distribution gaussienne et s'ajustent à la loi normale standard inverse. u est la variable centrée réduite, utilisée comme seuil de criticité de l'indicateur de l'état journalier du «volume souterrain disponible» (ici l'IHnj).

Ingrid CANOVAS, 2016

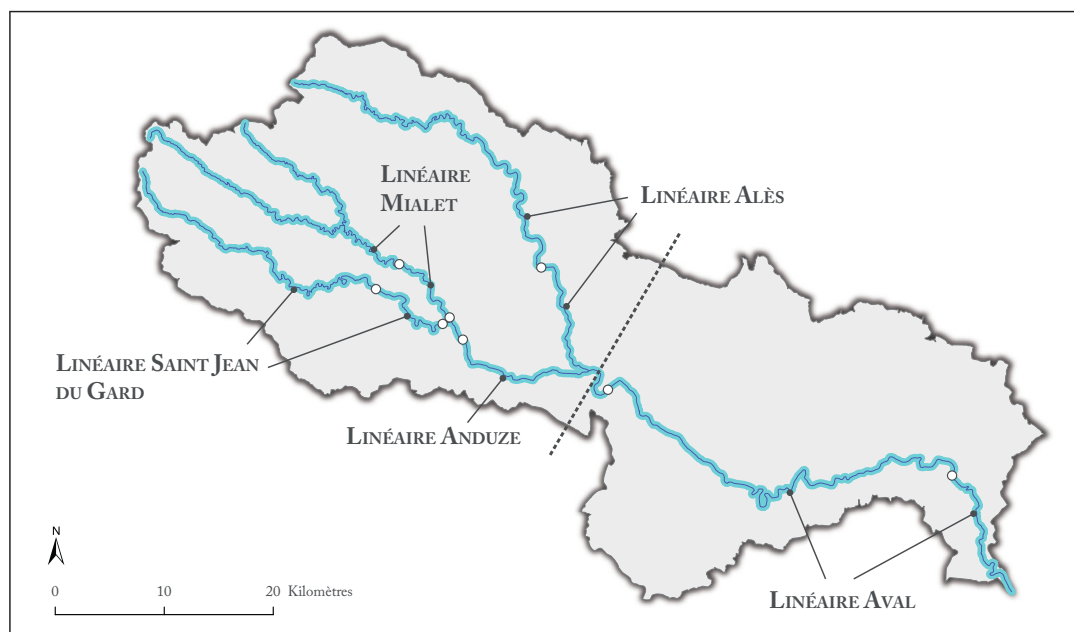


FIGURE 9.1 : LES PRINCIPAUX LINÉAIRES RÉFÉRENCÉS SUR LE BASSE DES GARDONS

ponctuellement, la densité du réseau de mesure n'est parfois pas suffisante pour englober le territoire étudié, sans introduire de trop grandes incertitudes.

C'est pourquoi, il est préférable de recourir à la cartographie lorsque l'aire d'influence de la variable spatialisée est connue. Dans le cas des variables hydrologiques et climatiques, c'est déjà beaucoup moins évident. Pour éviter au maximum d'introduire des incertitudes, et rester au plus près des valeurs calculées ponctuellement, chaque tronçon du réseau hydrologique est ici découpé à chaque point de mesure de débit. La couleur correspondant à l'état pris par l'indice est appliquée au point de mesure, à partir duquel un dégradé est appliqué sur le quart du linéaire amont et du linéaire aval dudit point. En effet, il faut tout de même rendre compte de la continuité existante de l'écoulement. La couleur du dégradé est donc une extrapolation de la valeur calculée au poste de mesure, dont l'incertitude augmente avec la distance à l'autre point de mesure. Plus ce dernier est éloigné, et plus le dégradé devient gris. Suivant cette logique, les espaces grisés représentent les lacunes en termes d'information.

Cette technique est donc mise en œuvre, sauf pour les postes relativement proches : Saumane - Saint Jean du Gard - Corbès ; Mialet - Générargues, Anduze - Ners et Alès - Ners. Par contre, lorsque l'un d'entre eux n'est pas renseigné, alors le dégradé sur le quart du linéaire est appliqué (FIGURE 9.2).

Sur cette base, l'ensemble des états pris aux postes disponibles est projeté sur la série de cartes correspondant aux jours analysés (ENCADRÉ E33.1). Du 1^{er} juin au 31 juillet, le linéaire aval demeure

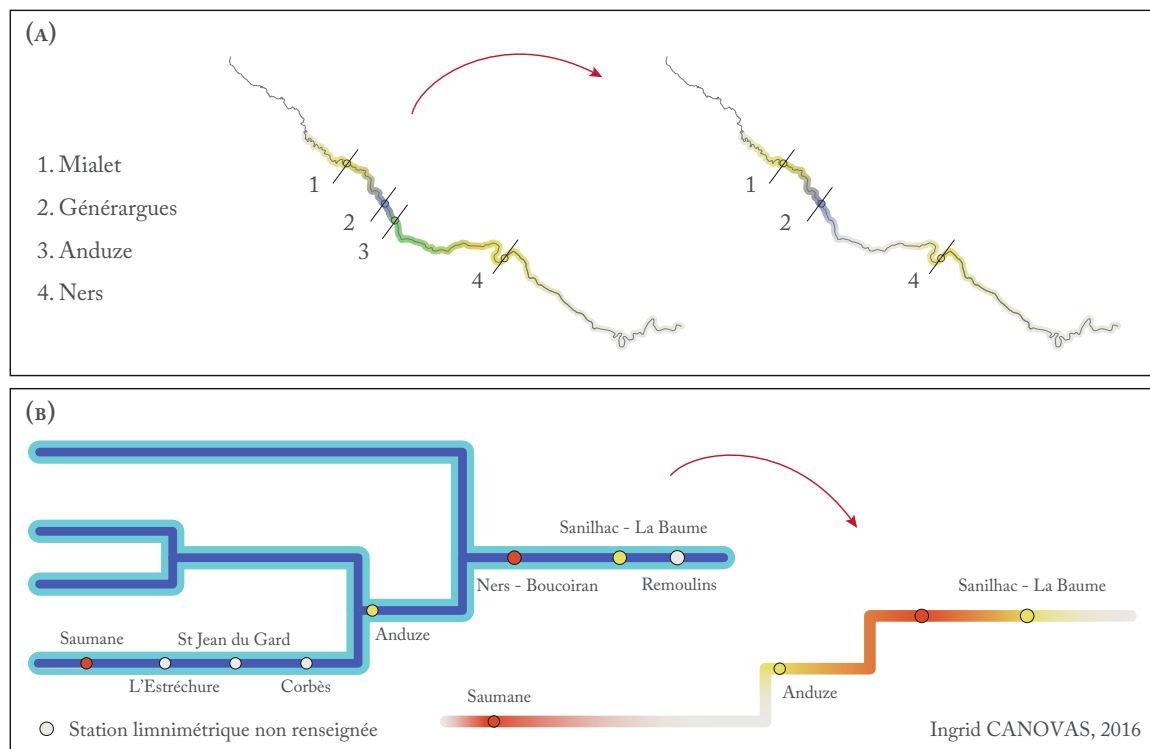


FIGURE 9.2 : MODALITÉS COLORIMÉTRIQUES POUR LA REPRÉSENTATION SPATIALISÉE DE L'ÉTAT DES Ivj

dans un état normal, voire humide. A l'amont, en revanche, la situation est déjà sub-critique au 1^{er} juin, à l'exception d'Anduze et de Saint Jean du Gard.

L'évolution vers un état plus critique général s'initie par les linéaires les plus en amont. En premier lieu, le linéaire de Saint Jean du Gard passe en état critique (15 juin), suivi, quinze jours plus tard, du linéaire de Mialet. Ces configurations simultanées semblent impacter le linéaire d'Anduze, qui devient, à cette même date, sub-critique. Le linéaire d'Alès, quant à lui, n'évolue pas. Le Gardon, en ce point, présente une fin de récession, *a priori* peu tendue (effet du barrage situé à l'amont), puisque le poste a disparu au 15 juillet, en état sub-critique.

À la mi-juillet, la situation sur du linéaire de Saint Jean du Gard a, de son côté, progressé davantage vers un état critique à super-critique. La situation à l'amont semble toutefois se maintenir, voire s'améliorer entre le 31 juillet et le 15 août, et le Gardon à Mialet a atteint l'étiage strict, puisque le point de mesure disparaît de la carte. À cette même période, le bassin aval commence à son tour à monter en état de tension, suivant une dynamique progressant de l'amont vers l'aval, se traduisant par un état critique à Ners et sub-critique à l'extrême aval, à Remoulins.

Au 31 août, les linéaires amont tendent vers un état plus normal. La situation à Ners ne progresse pas (probablement du fait de l'amélioration de la situation à l'amont), tandis que le Gardon à Remoulins atteint l'état critique.

Finalement, au 15 septembre, Remoulins a rapidement retrouvé un état normal. L'extrémité amont est en situation à nouveau critique (linéaire de Saint Jean du Gard), tandis que la situation tend vers un retour à la normale sur la partie basse des linéaires amont.

01 JUIN 2011

15 JUIN 2011

0 10 20 Kilomètres

15 JUILLET 2011

30 JUIN 2011

31 JUILLET 2011

15 AOÛT 2011

15 SEPTEMBRE 2011

31 AOÛT 2011

■ Etat humide
 ■ Etat moyen
 ■ Etat sub-critique
 ■ Etat critique
 ■ Etat super-critique
 ■ Etat exceptionnel

Ainsi, la montée vers un état critique général sur le bassin des Gardons s'effectuerait, comme supposé, de l'amont vers aval, soit de manière progressive depuis les linéaires les plus proches de la source jusqu'à l'exutoire du bassin. L'amorce de la diminution de l'état semble également progresser suivant cette même dynamique, bien que la situation ne semble pas se stabiliser tout de suite à l'amont, puisqu'une nouvelle montée semble s'amorcer aussitôt. Ces premières observations sont encourageantes, puisqu'elles mettent en évidence une structuration spatiale qui suit une certaine logique hydrologique, et identique à celle identifiée précédemment lors de l'analyse des paramètres du modèle puissance de l'indicateur (voir *supra* 6.2.3).

Le poste d'Alès n'étant plus visible à partir du 15 juillet, il est par ailleurs difficile de justifier si la situation critique persistante à Ners, observée à partir du 31 août, est imputable à l'état du Gardon d'Alès. En effet, à Anduze, la situation est redevenue normale, ce qui ne peut expliquer l'état de Ners, à moins que d'autres facteurs plus locaux n'interviennent.

C'est une des raisons pour lesquelles, travailler sur les indicateurs calculés sur les séries issues des cycles hydrologiques semble tout aussi pertinent. L'analyse peut être étendue au-delà de la récession de fin de cycle, autorisant la mise en évidence de situations problématiques après l'atteinte de l'étiage strict. Cela est très probablement fréquent en domaine méditerranéen, surtout lorsque les épisodes cévenols se manifestent tardivement.

Il est à noter enfin que l'aspect karstique du cours d'eau, qui se traduit par un état d'assec au niveau des Gorges du Gardons, n'apparaît pas sur la représentation cartographique. Il pourrait être matérialisé par un tracé vert en pointillé, puisqu'il s'agit d'une situation sèche « normale » sur cette partie du linéaire. Lors des années sèches, il pourrait ensuite être étendu vers l'amont, et explicité alors par une couleur correspondant à un niveau critique.

9.1.2 La dynamique spatiale de l'indice volumique journalier issu des cycles hydrologiques

L'analyse des états pris par l'indice volumique journalier, calculés sur les cycles hydrologiques, révèle une montée plus rapide du linéaire aval à un état sub-critique (soit au 15 juillet) que lorsque l'indicateur est calculé sur la base des récessions (soit au 15 août) (ENCADRÉ E33.2).

Toutefois, comme précédemment, au 1^{er} juin, les linéaires amont sont déjà en situation sub-critique, à l'exception d'Anduze et de Saint Jean du Gard. Ils évoluent cependant très rapidement, et sans exception, vers des états de tension plus importants, jusqu'à super-critique à Saint Jean du Gard (15 juin).

Au 30 juin, l'ensemble des Gardons a atteint l'état critique. La situation s'améliore ensuite à l'aval (Remoulins), tandis qu'à Alès un nouveau cycle (plutôt humide) s'amorce. À l'amont, en revanche, la fin de récession devient plus tendue. Cela se traduit par une augmentation de l'état de criticité sur le linéaire de Mialet et un maintien à l'état critique sur le reste du bassin.

Au 31 juillet, la situation s'améliore à l'amont, à l'exception du linéaire de Saint Jean du Gard qui continue de progresser en tension. À l'aval, l'état demeure stabilisé à un niveau sub-critique.

01 JUIN 2011

15 JUIN 2011

0 10 20 Kilomètres

15 JUILLET 2011

30 JUIN 2011

31 JUILLET 2011

15 AOÛT 2011

15 SEPTEMBRE 2011

31 AOÛT 2011

Etat humide Etat moyen Etat sub-critique Etat critique Etat super-critique Etat exceptionnel

Au 15 août, le Gardon proche de l'exutoire a retrouvé un état normal. À Ners, la situation reste critique, probablement parce qu'à l'amont, à Alès comme à Mialet, le Gardon, pourtant en début de cycle, a atteint un niveau de criticité supérieur.

Au 31 août, le Gardon aux postes les plus en amont deviennent moins tendus, tandis qu'il atteint à nouveau l'état sub-critique près de l'exutoire, pour finalement y devenir critique au 15 septembre. À cette date, le linéaire de Saint Jean atteint l'état exceptionnel, tandis qu'ailleurs sur la partie amont, la situation se stabilise entre un état moyen et sub-critique. Enfin, et curieusement, le poste de Ners affiche un état super-critique (pertes souterraines ?), malgré des situations *a priori* normales à Anduze et Alès. À l'inverse, le Gardon à Anduze, toujours en récession de fin de cycle, affiche un état normal, tandis qu'à l'amont les situations sont dans des états de criticité plus élevés. Y aurait-il des facteurs locaux qui justifieraient ces disparités ? Ou serait-ce le Gardon à Anduze et non pas Ners qui présenterait une dynamique spécifique (*e.g.* données, effet local, départ de la masse touristique donc retour à un écoulement normal pour la période ?). Ces questions se justifient ici en raison d'un situation encore dans des états sub-critique à super-critique partout ailleurs.

Conclusion — Suivant le découpage à partir duquel l'indice volumique journalier est calculé, des dynamiques spatiales légèrement différentes sont observées.

À partir des indices issus des cycles hydrologiques, le linéaire de Mialet ne demeure pas aussi longtemps en état super-critique. À l'inverse, l'extrême aval atteint plusieurs fois des états sub-critiques et critiques. Une situation critique homogène sur l'ensemble du bassin est même observée. La situation de tension persistante à Ners serait en partie imputable aux situations sévères à l'amont, excepté au 15 septembre. Cette date particulière introduit des curiosités dans les relations amont-aval entre les postes, suggérant une mise en évidence de particularités locales. Anduze est en effet toujours moins critique que les postes amont (Soutien de la nappe alluviale ? Pertes karstiques ?), même lorsque ces derniers sont très critiques.

Mais globalement, les résultats semblent confirmer l'hypothèse précédemment avancée que ce sont les linéaires les plus en amont qui sont les plus critiques, le plus tôt, le plus souvent et le plus tard. Cela s'explique notamment par la présence d'arènes granitiques, qui fournissent des stocks d'eau peu importants sur le bassin de Mialet. À Saint Jean du Gard, les sols sont très peu épais et les aquifères superficiels peu nombreux et très localisés, les réserves mobilisées sont ainsi très faibles, et rapidement insuffisantes, pour alimenter le Gardon en période sèche.

Au vu de ces premiers résultats, et en appui des connaissances de terrain, l'indicateur et les seuils semblent assez satisfaisants pour décrire l'aspect hydrologique du phénomène de basses eaux.

9.2 État de criticité des indicateurs hydroclimatiques *vs.* niveau d'alerte

Pour confirmer la validité de l'indicateur d'état du volume superficiel et établir la validité des indicateurs d'état du volume souterrain et du forçage climatique, une analyse comparative est conduite

entre l'état pris par chacun des trois indicateurs et le niveau d'alerte activé. Pour des raisons identiques à celles évoquées précédemment, et parce que cinq arrêtés préfectoraux ont été mis en vigueur durant la période estivale, l'année 2011 est à nouveau retenue.

Afin d'identifier s'il existe une cohérence entre les états des indicateurs, et entre chaque indicateur et le niveau activé, le recours à une approche graphique, complétée par une approche cartographique est choisi. Comme précédemment, les états pris par les indicateurs issus des découpages sur les phases de récession et les cycles hydrologiques sont analysés en parallèle.

9.2.1 État du volume superficiel (Ivj) *vs.* état d'alerte hydrologique

L'approche graphique, via le chrono-kindénogramme, permet d'observer la répartition des valeurs de l'indice volumique journalier (Ivj) durant les périodes d'alerte des eaux superficielles qui, généralement, sont révisées lorsque la situation est perçue comme extrêmement modifiée. Les durées d'activation d'un niveau peuvent s'étendre sur quinze jours, un mois, voire davantage selon les circonstances. Les valeurs de l'Ivj, en revanche, évoluent quotidiennement, et leurs états respectifs sont donc susceptibles de varier très fréquemment. Un même état n'est donc potentiellement atteint que dans un intervalle de quelques jours.

Aussi, la confrontation de l'évolution des valeurs de l'indicateur et des périodes d'activation doit permettre de révéler si l'étendue de l'alerte activée est justifiée et en accord avec l'état évalué. Par ailleurs, les niveaux d'alerte sont généralisés sur l'amont et sur l'aval, ce qui ne permet pas de discrétiser les états pris sur chaque linéaire, dont il vient d'être supposé qu'ils n'évoluaient pas simultanément.

Cette première phase d'observation est ensuite complétée par une représentation cartographique, sur laquelle sont projetés les états pris par l'Ivj et le niveau activé pour les eaux superficielles, au jour de l'activation dudit niveau. L'objectif étant de déterminer si le changement de niveau est intimement lié à l'état du volume superficiel, ou s'il apparaît motivé par d'autres facteurs, telles les précipitations par exemple (voir *infra* 9.2.3).

9.2.1.1 L'indicateur issu des phases de récession

En 2011, cinq arrêtés ont été publiés :

- Le 14 juin : vigilance (niveau 0) sur les Gardons amont ;
- Le 28 juin : crise (niveau 2) sur l'ensemble du bassin des Gardons ;
- Le 29 juillet : vigilance (niveau 0) sur le Gardon aval et alerte (niveau 1) sur les Gardons amont ;
- Le 05 septembre : vigilance (niveau 0) sur le Gardon aval et alerte (niveau 1) sur les Gardons amont ;
- Le 15 octobre : fin des mesures.

Analyse graphique : le chrono-kindénogramme — Le graphique est découpé selon les quatre dates auxquelles un changement de niveau d'activation est opéré (la date du 05 septembre n'est donc pas représentée). Il s'agit ici d'observer si, globalement, le choix du niveau d'alerte et sa durée d'activation concordent avec l'état évalué à cette même période. La représentation chronologique des valeurs de l'Ivj montre assez clairement les concordances et les différences entre les niveaux activés et les états de criticité calculés.

Le premier niveau d'alerte (vigilance) apparaît concordant avec la situation telle que définie par l'indicateur sur les linéaires amont, à l'exception des postes de St Jean du Gard, Corbès et Mialet, pour lesquels l'état critique domine (ENCADRÉ E34.1). Ce niveau de vigilance aurait pu être par ailleurs étendu sur Alès jusqu'à la fin des mesures.

La seconde alerte (de niveau 2) est surévaluée sur tous les linéaires, sauf à Mialet et Corbès. Sur ce dernier linéaire, elle aurait par ailleurs dû être prolongée jusqu'à la fin des mesures.

Enfin, la dernière alerte activée sur l'amont (de niveau 1) n'est concordante qu'avec l'état évalué à Ners, Anduze et Générargues, et sous-estimé pour les postes plus en amont.

Dans l'ensemble, et au regard de l'indicateur, les niveaux d'alerte auraient mérité d'être plus spécifiques au découpage du réseau hydrologique en linéaires. Sur l'extrême amont, des niveaux davantage restrictifs, activés plus précocement et sur une durée plus étendue auraient dû être préférés. Sur la partie aval, les dates d'activation auraient pu être plus tardives. Alès semble représenter un cas bien à part, et mériterait par conséquent un système d'alerte qui lui soit propre. Sur la partie intermédiaire du réseau, soit à Anduze et à Ners, le niveau de vigilance aurait pu être étendu jusqu'au 29 juillet.

Pour l'année 2011, les niveaux d'alerte ont donc été globalement surévalués à l'aval et sous-estimés à l'amont, et la durée s'avère majoritairement inadaptée (*i.e.* trop fractionnée).

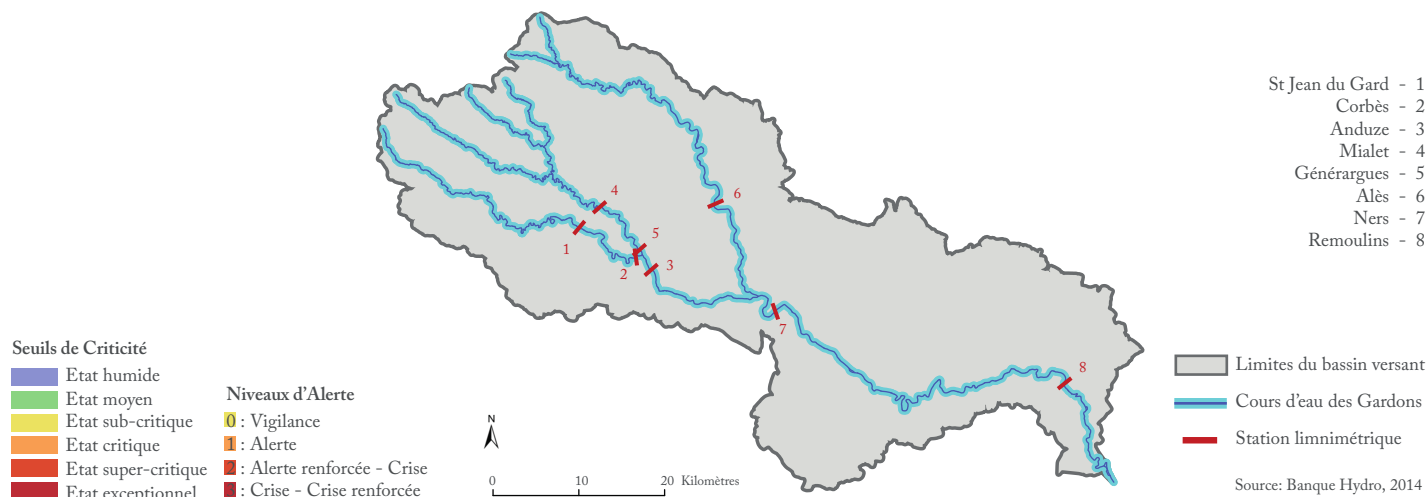
Toutefois, les indices volumiques journaliers présentent une forte variabilité, ce qui s'avère contraignant et peu adapté pour une mise en œuvre opérationnelle de la méthode (FIGURE 9.3). Par conséquent, il faudra réfléchir aux modalités pour ajuster l'information journalière (*e.g.* lissage) afin de la stabiliser (voir CHAPITRE 10).

Analyse cartographique : les dates de changement de niveau d'alerte — Au 14 juin, date de la première activation, l'état des cours d'eau est déjà sévère, et le niveau d'alerte en vigueur sous-évalue la situation (ENCADRÉ E35.1.1).

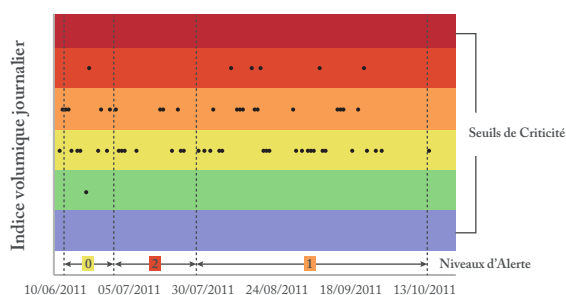
Au 28 juin, à l'inverse, la situation est surestimée, notamment à l'aval.

Au 29 juillet, il est à nouveau sous-évalué à l'amont et sur-estimé à l'aval, à l'exception de Ners.

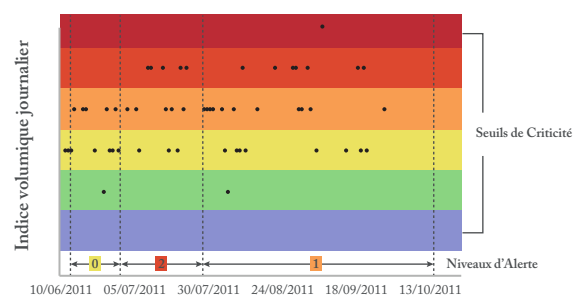
Enfin, au 15 octobre, l'arrêt des mesures ne semble pas justifié sur la majorité des linéaires, excepté à Anduze. En effet, à cette date, et surtout à l'aval (Ners et Remoulins), les situations sont encore très sérieuses.



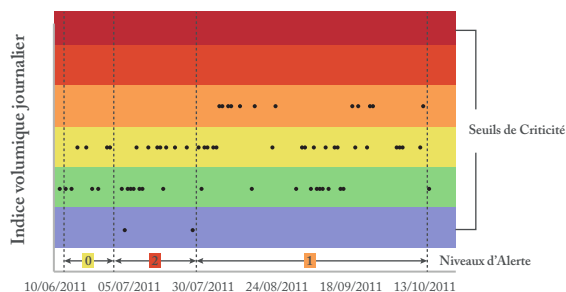
G34.1.1 LES IVJ À SAINT JEAN DU GARD (1)



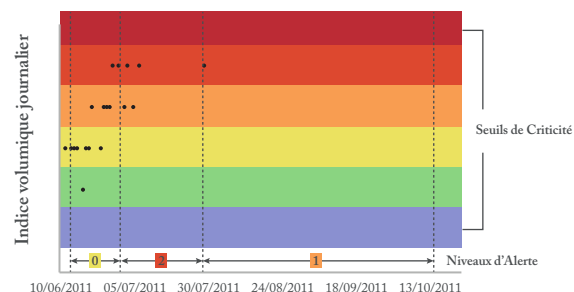
G34.1.2 LES IVJ À CORBÈS (2)



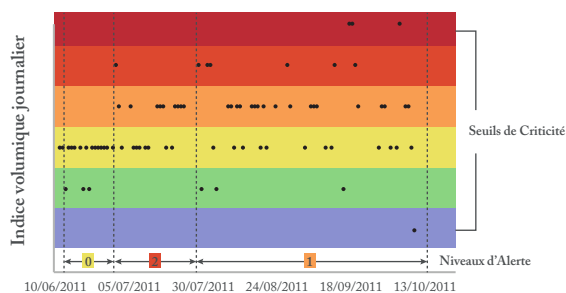
G34.1.3 LES IVJ À ANDUZE (3)



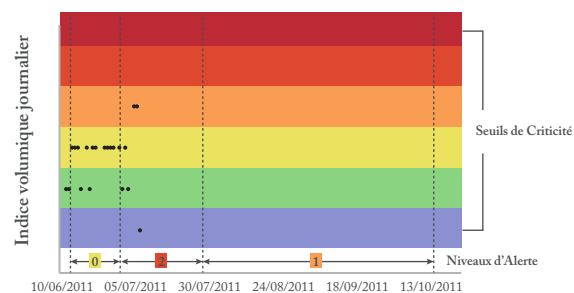
G34.1.4 LES IVJ À MIALET (4)



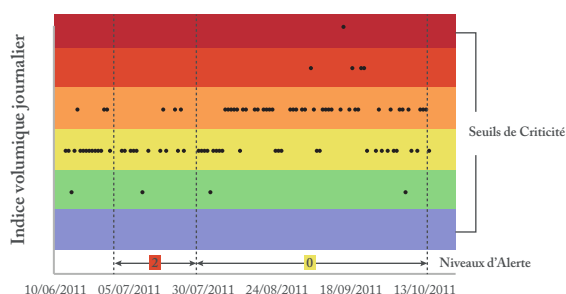
G34.1.5 LES IVJ À GÉNERARGUES (5)



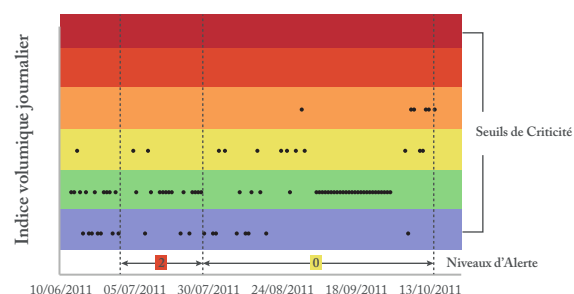
G34.1.6 LES IVJ À ALÈS (6)



G34.1.7 LES IVJ À NERS (7)



G34.1.8 LES IVJ À REMOULINS (8)



C35.1.1

EVOLUTION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DU
VOLUME SUPERFICIEL

C35.1.2

EVOLUTION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DE
LA PERCEPTION DES AUTORITÉS

14 JUIN 2011



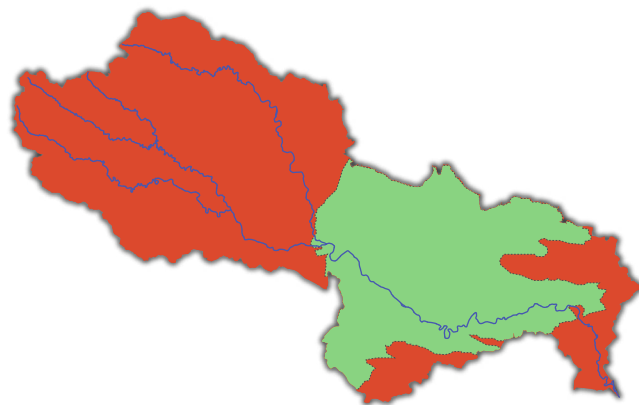
28 JUIN 2011



29 JUILLET 2011



15 OCTOBRE 2011



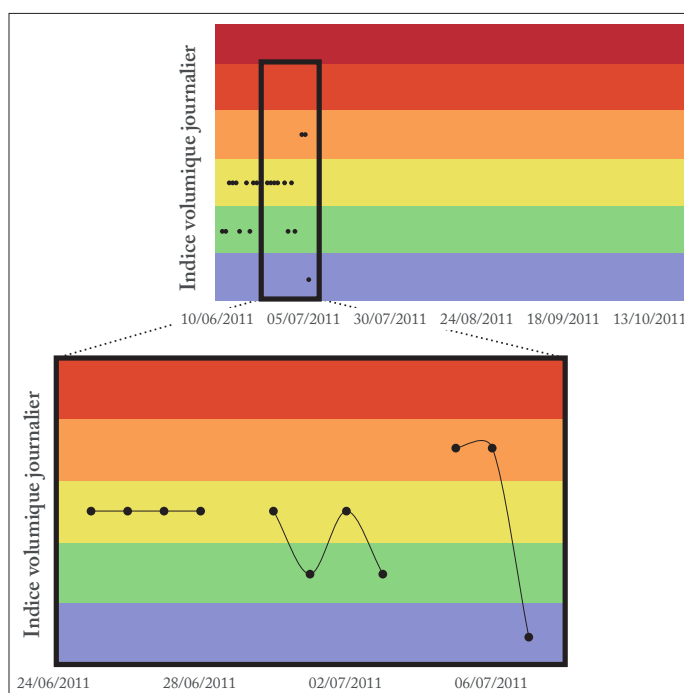


FIGURE 9.3 : VARIABILITÉ JOURNALIÈRE AU COURS DE LA RÉCESSION 2011 DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DE L'Ivj AU POSTE D'ALÈS, DÉFINI SUR LE DÉCOUPAGE DES PHASES DE RÉCESSION

La carte montre très clairement le manque de cohérence et confirme aussi les nuances existantes, particulièrement entre les linéaires amont. Cela pourrait justifier un nouveau découpage des zones d'alerte, même si la véracité de l'indicateur n'est pas encore prouvée.

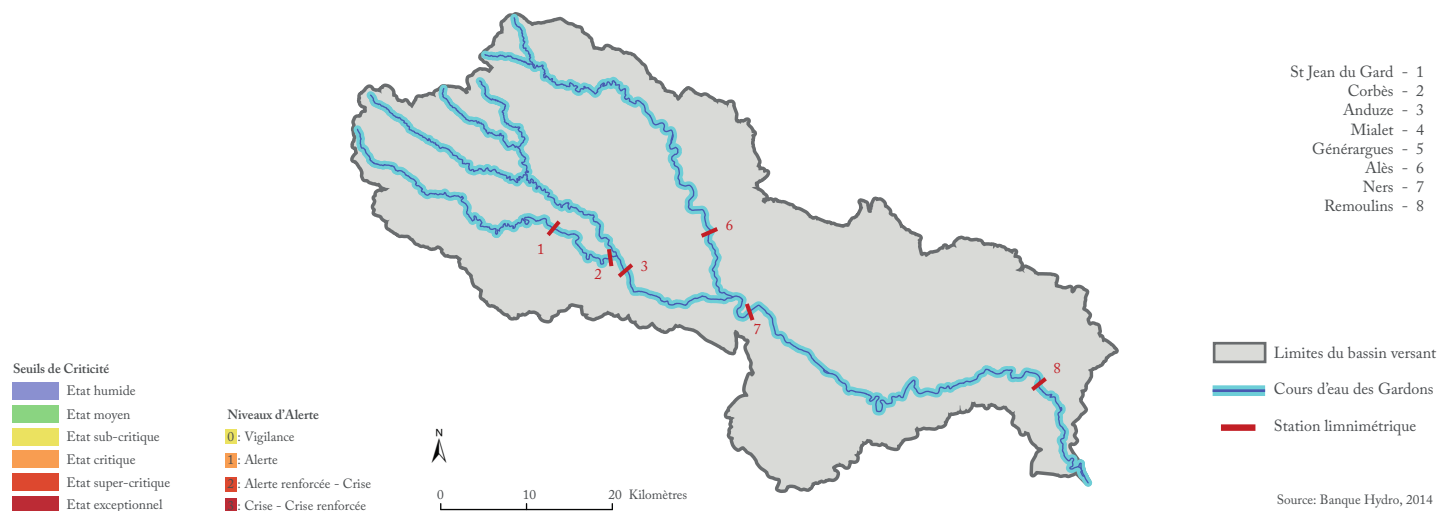
9.2.1.2 L'indicateur issu des cycles hydrologiques

L'analyse est par conséquent dupliquée sur l'indicateur calculé sur les cycles hydrologiques. En effet, cette base discrétise différemment les états de criticité, puisqu'elle inclut aussi les extrêmes humides de début de cycle.

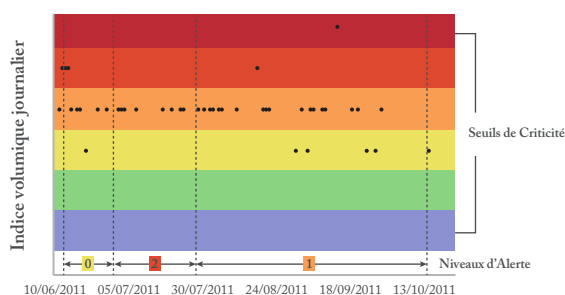
Analyse graphique : le chrono-kindénogramme — À première vue, à la différence des observations faites à partir de l'indicateur calculé sur la base des récessions, davantage de valeurs se retrouvent dans l'état super-critique (sauf à Alès et Anduze), et le Gardon à Remoulins atteint plus souvent l'état super-critique et exceptionnel (ENCADRÉ E_{34.2}). Par ailleurs, la visibilité des états de début de cycle des postes, pour lesquels la récession est plus précoce, est possible.

Le premier niveau, uniquement activé à l'amont (vigilance), sous-estime l'état hydrologique de l'ensemble des linéaires, tandis qu'il mériterait d'être mis en vigueur à l'aval.

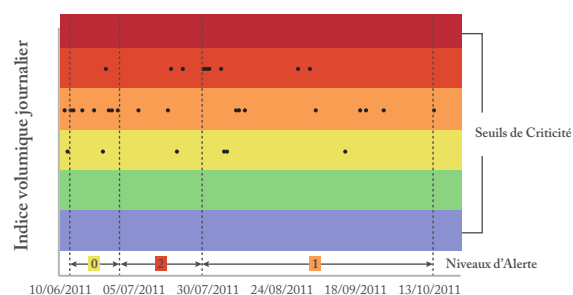
Comme pour l'indicateur issu des récessions, le deuxième niveau (alerte de niveau 2) surestime la situation calculée. Une alerte de niveau 1 aurait suffi à l'ensemble du bassin.



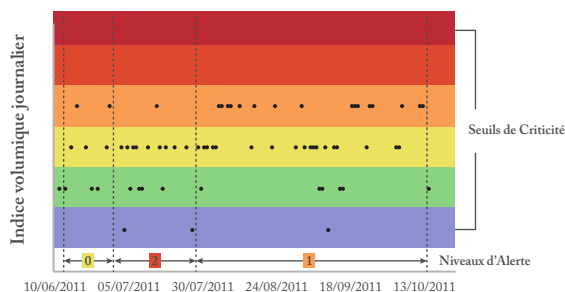
G34.2.1 LES IVJ À SAINT JEAN DU GARD (1)



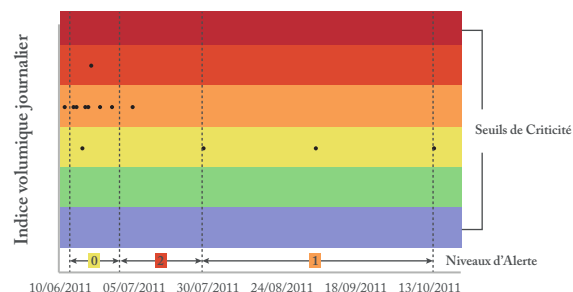
G34.2.2 LES IVJ À CORBÈS (2)



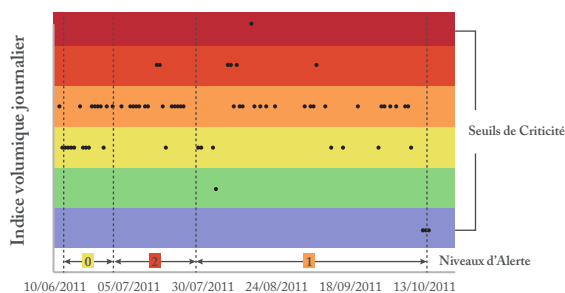
G34.2.3 LES IVJ À ANDUZE (3)



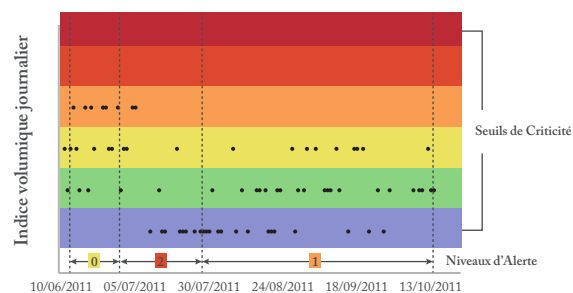
G34.2.4 LES IVJ À MIALET (4)



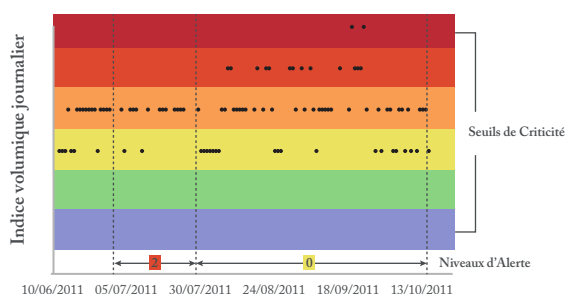
G34.2.5 LES IVJ À GÉNÉRARGUES (5)



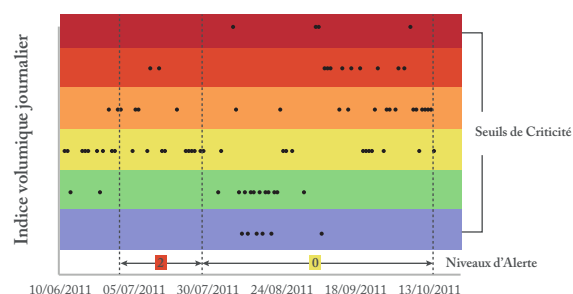
G34.2.6 LES IVJ À ALÈS (6)



G34.2.7 LES IVJ À NERS (7)



G34.2.8 LES IVJ À REMOULINS (8)



Sur Alès, Mialet, et Anduze, un état d'alerte de niveau 1 aurait été suffisant sur l'ensemble de la période 14 juin – 15 octobre, notamment parce que le Gardon, aux deux premiers postes, atteint l'étiage rapidement et présente un début de cycle peu problématique.

Sur les autres linéaires, une alerte de niveau 2, déclenchée plus tardivement et sur une durée plus étendue, aurait été plus adaptée. Il aurait été, de surcroît, plus judicieux de décaler les dates d'activation entre l'amont et l'aval, soit début août à l'amont puis mi-août à l'aval. Enfin, une prolongation des mesures au-delà du 15 octobre, même de niveau 0, aurait pu être envisagée.

Il semble également difficile d'établir avec précision un niveau d'alerte sur la durée à partir des valeurs issues des cycles, puisque le changement d'état de l'indicateur s'effectue presque quotidiennement, même s'il oscille généralement entre deux états proches (*e.g.* normal et sub-critique, sub-critique et critique) sur une période un peu plus étendue (FIGURE 9.4).

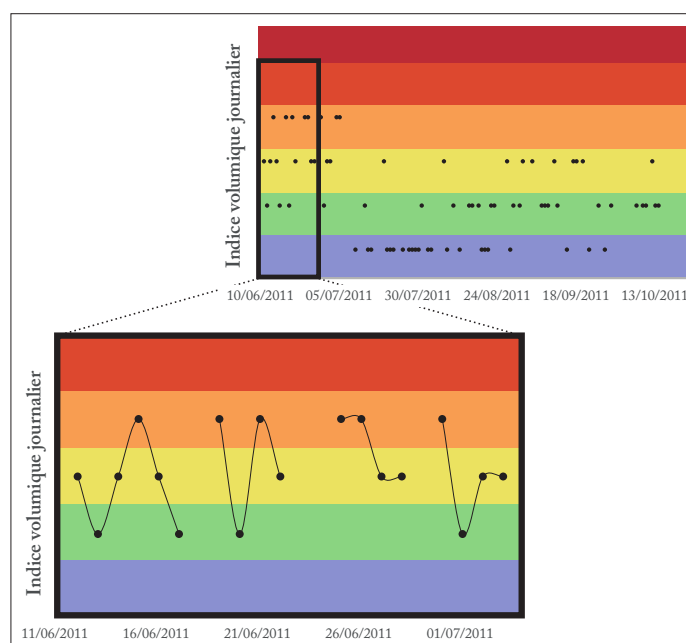


FIGURE 9.4 : VARIABILITÉ JOURNALIÈRE AU COURS DE LA RÉCESSION 2011 DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DE L'IVJ AU POSTE D'ALÈS, DÉFINI SUR LE DÉCOUPAGE DES CYCLES HYDROLOGIQUES

Analyse cartographique : les dates de changement de niveau d'alerte — Après une analyse globale sur les périodes d'activation des niveaux d'alerte, l'attention est portée sur les dates auxquelles les états d'alerte sont modifiés.

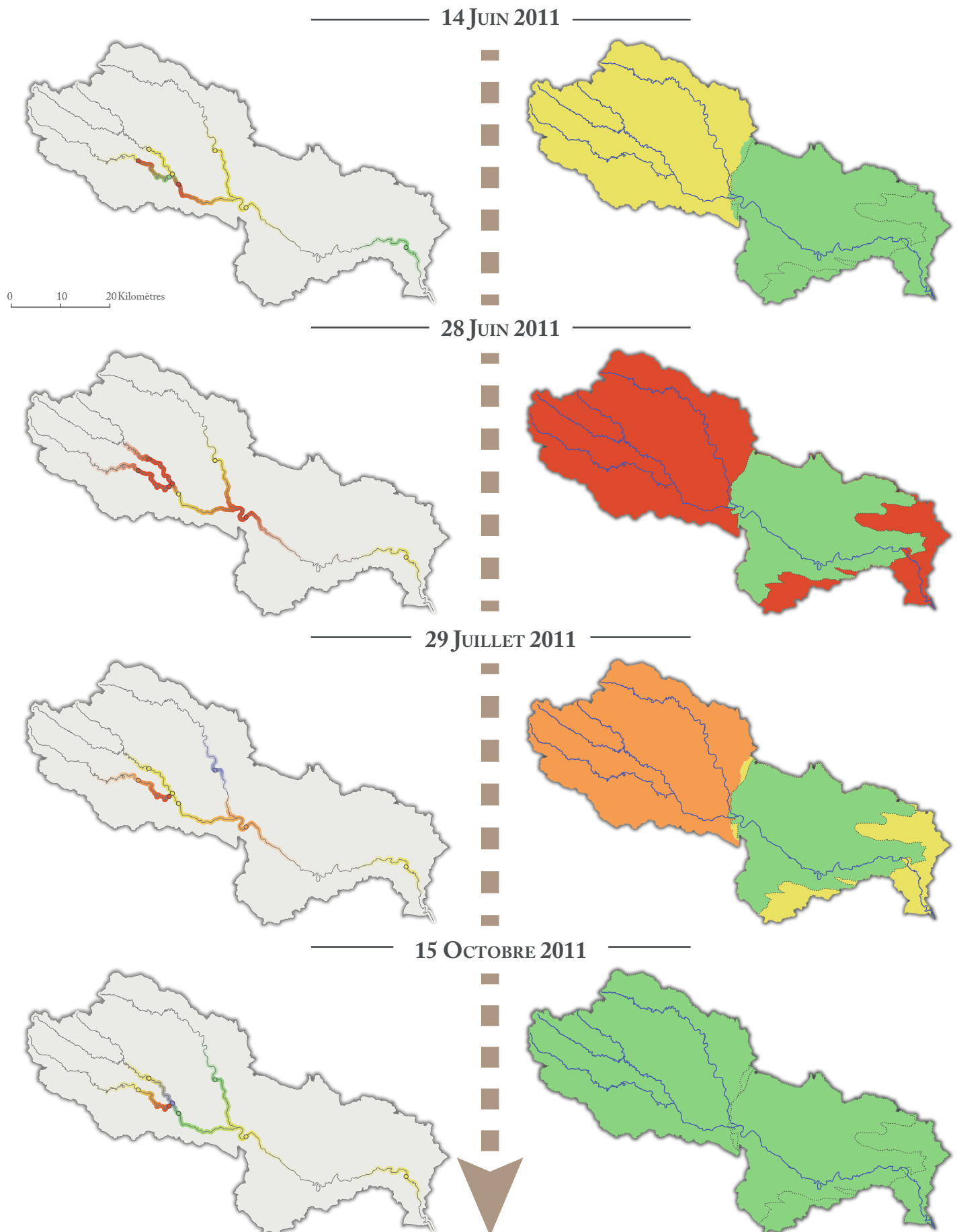
Au 14 juin, la situation hydrologique apparaît sous-évaluée. À l'aval, le Gardon à Ners est déjà en état sub-critique, ce qui justifierait l'activation d'un niveau de vigilance, tandis que certains linéaires amont (Saint Jean du Gard et Anduze) ont atteint un état super-critique, justifiant au minimum une alerte de niveau 1 (ENCADRÉ E35.2.1).

Au 28 juin, le niveau activé est concordant avec l'état calculé, excepté aux postes d'Alès et Remoulins, pour lesquels une vigilance aurait été suffisante.

C35.2.1

EVOLUTION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DU
VOLUME SUPERFICIEL

C35.2.2

EVOLUTION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DE
LA PERCEPTION DES AUTORITÉS

Etat humide Etat moyen Etat sub-critique Etat critique Etat super-critique Etat exceptionnel

Au 29 juillet, l'état hydrologique est sous-estimé pour Anduze. Une configuration similaire est également observée au 15 octobre, les extrêmes amont et le linéaire aval affichant encore un état sub-critique, ce qui ne justifie donc pas l'arrêt des mesures.

Comme précédemment, la représentation cartographique montre clairement le manque de cohérence entre les états calculés et les situations perçues par les autorités, et souligne les nuances existantes entre les linéaires amont. Cela semble confirmer la nécessité de définir un nouveau découpage des zones d'alerte.

Dès lors, la question qui se pose concerne la validité de l'indicateur. En effet, si sur les conclusions établies à l'issue des observations faites sur la base des cycles concordent globalement avec celles avancées suite à l'analyse réalisée sur la base des récessions, il demeure à ce stade difficile d'affirmer la pertinence de l'indicateur. Par ailleurs, rien ne dit que la perception de la situation par les autorités soit plus « fiable » ou objective, notamment lorsque les enjeux politico-économiques sont importants.

9.2.2 État du volume souterrain (IH_{Nj}) *vs.* état d'alerte hydrologique

L'analyse comparative est ensuite reproduite sur l'indicateur piézométrique, pour voir si l'état des aquifères concorde davantage avec l'évaluation de la situation par les autorités. Les deux approches (graphique et cartographique) sont ainsi conservées. La première, graphique, via le chrono-kindénogramme permet d'observer, durant les périodes d'alerte des eaux souterraines, la répartition des valeurs de l'indicateur (IH_{Nj}). Ces dernières, bien qu'évoluant suivant une dynamique plus lente que celle relative au volume superficiel, ne demeurent pas pour autant stables sur plusieurs semaines. Aussi, le chrono-kindénogramme devrait permettre de vérifier si l'étendue de l'alerte activée est justifiée et cohérente avec la durée de l'état pris par l'indicateur calculé.

La seconde approche, cartographique, confronte quant à elle les états pris par les indicateurs avec le niveau activé pour les eaux souterraines, au jour de l'activation dudit niveau. Comme pour l'I_{vj}, cette forme de représentation devrait permettre de s'assurer que les motifs de changement de niveau sont intimement liés au niveau piézométrique. À défaut, ils seront supposés motivés, comme pour le volume superficiel, par des facteurs supplémentaires.

Cette approche double est également menée sur les valeurs de l'indicateur, calculé à partir des séries issues de phases de récession et des cycles hydrologiques.

9.2.2.1 L'indicateur issu des phases de récession

La confrontation des états calculés et perçus est opérée sur la même période (14 juin – 15 octobre 2011), et suivant le découpage réglementaire des zones d'alerte des eaux souterraines : la partie amont, la partie aval et la zone spécifique au karst (FIGURE 9.5). En effet, le bassin versant des Gardons n'étant pas considéré comme un territoire présentant d'importantes ressources souterraines (hormis la zone karstique), les zones amont et aval définies pour les eaux superficielles sont appliquées

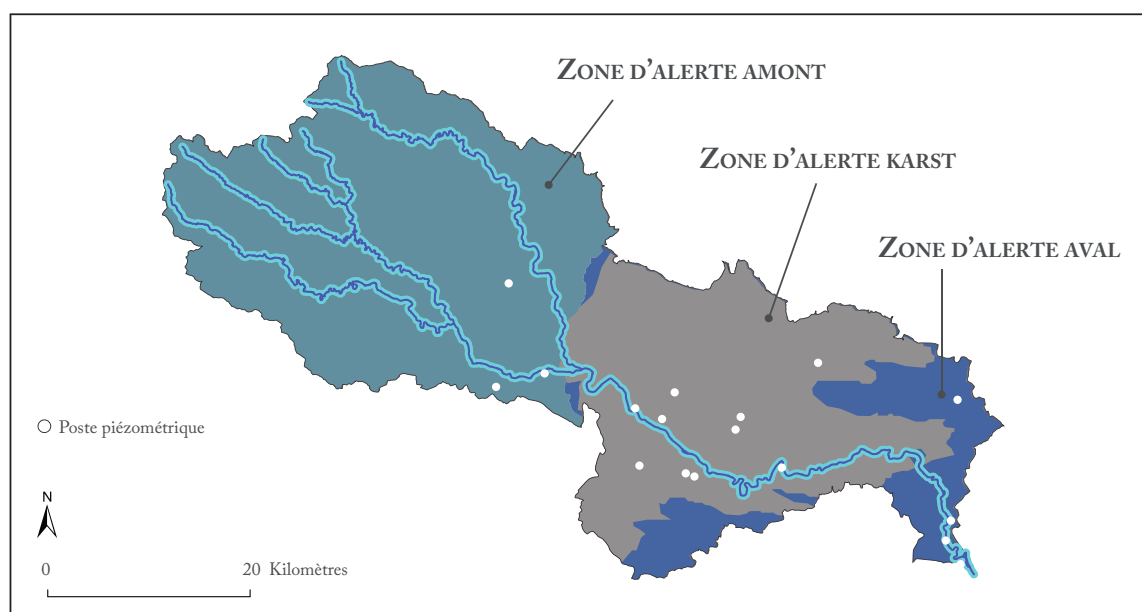


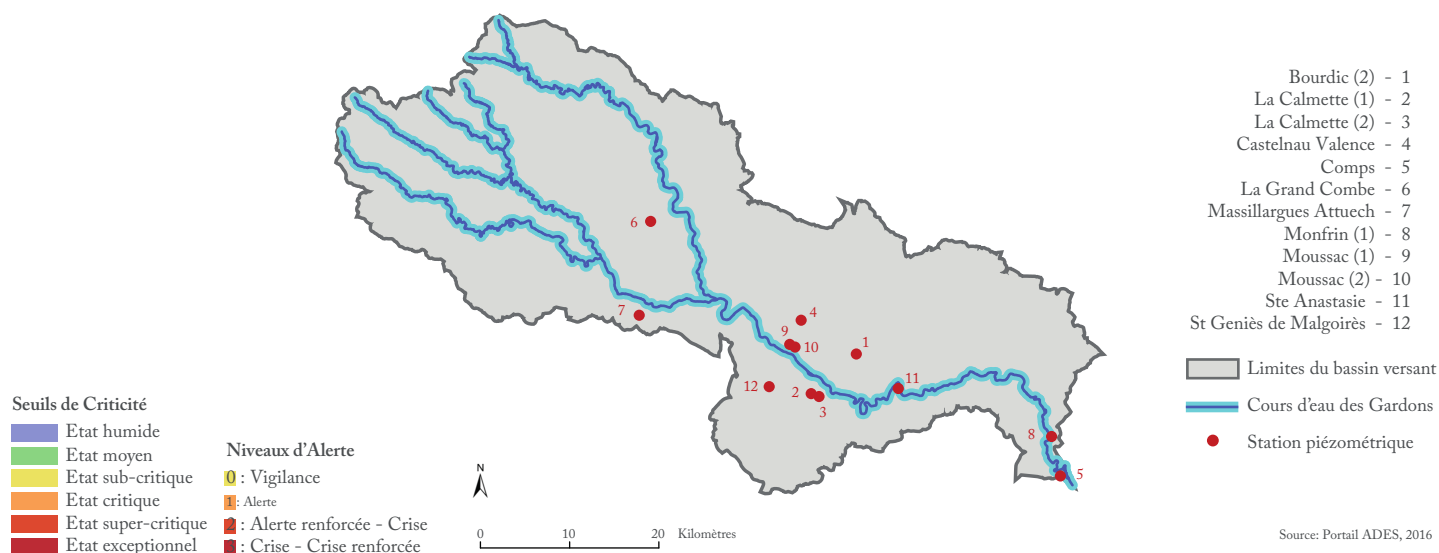
FIGURE 9.5 : RÉPARTITION DES POSTES PIÉZOMÉTRIQUES AU SEIN DU DÉCOUPAGE DES ZONES D'ALERTE RÉGLEMENTAIRES

aux eaux souterraines localement présentes dans ces découpages. Les niveaux d'alerte activés sur ces zones pour les linéaires des cours d'eau seront donc naturellement étendus aux postes de mesure des hauteurs piézométriques disponibles.

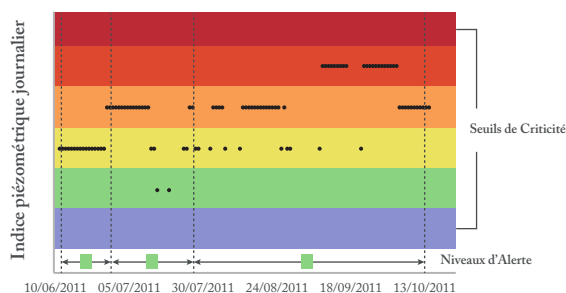
Approche graphique : le chrono-kindénogramme — Sur le karst, aucun niveau n'est activé durant la période du 14 juin au 15 octobre (ENCADRÉS E_{34.3} et E_{34.4}). Cette absence de décision n'apparaît pour autant pas justifiée, puisque chacun des postes situés sur la zone karstique évolue, durant cette période, entre deux états au minimum. C'est le cas notamment à Saint Geniès de Malgoirès, où l'état fluctue majoritairement entre normal et sub-critique, et à Castelnau-Valence, où la situation évolue principalement entre état sub-critique et critique. Ailleurs, l'état du karst oscille entre trois niveaux de criticité : de l'état normal à l'état critique à Moussac, et de l'état sub-critique à super-critique à Bourdic et La Calmette. Il atteint même ponctuellement l'état exceptionnel à La Calmette et à Sainte Anastasie.

Par ailleurs, sur cette zone, les changements d'état semblent s'effectuer de manière relativement inertielle. En d'autres termes, lorsqu'un niveau de criticité est atteint, il est maintenu sur un temps plus long que celui observé pour le volume superficiel, qui, au mieux, ne demeure stable que le temps de quelques jours. Cela devrait donc rendre plus simples l'anticipation et la mise en place d'un niveau d'alerte sur la durée.

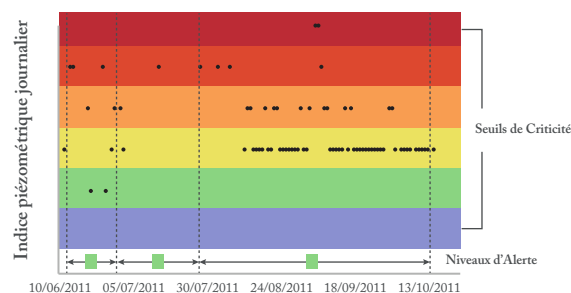
Sur la partie amont, le constat est plus mitigé. À Massillargues-Attuech, l'état de vigilance est, au regard de l'indicateur, totalement justifié. Par contre, les niveaux supérieurs déclenchés par la suite surestiment l'état de la nappe alluviale, qui remonte en état sub-critique, après un retour à la normale d'une quinzaine de jours. À la Grand Combe, en revanche, l'état du karst est critique dès le début de la période. Il oscille ensuite, à partir de fin juin, entre normalité et état critique, jusqu'à atteindre



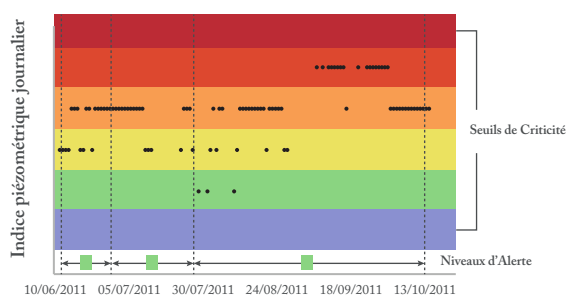
G34.1.9 LES IHNJ À BOURDIC (1)



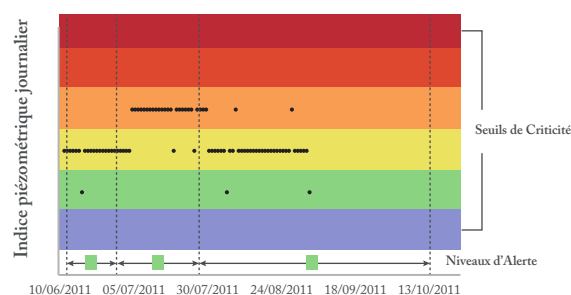
G34.1.10 LES IHNJ À LA CALMETTE (2)



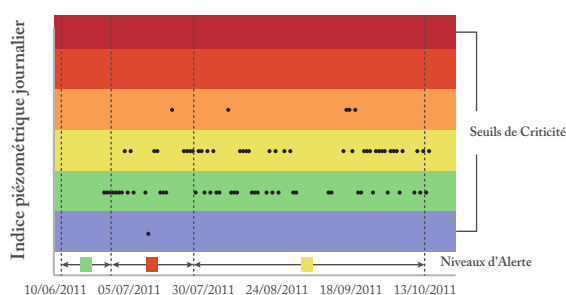
G34.1.11 LES IHNJ À LA CALMETTE (3)



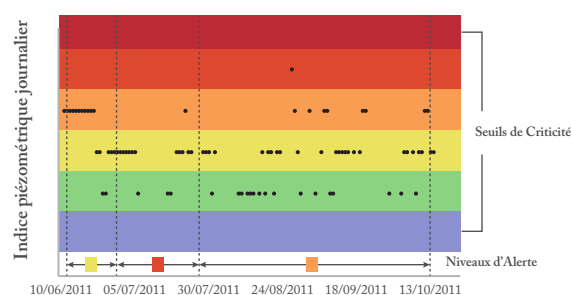
G34.1.12 LES IHNJ À CASTELNAU-VALENCE (4)

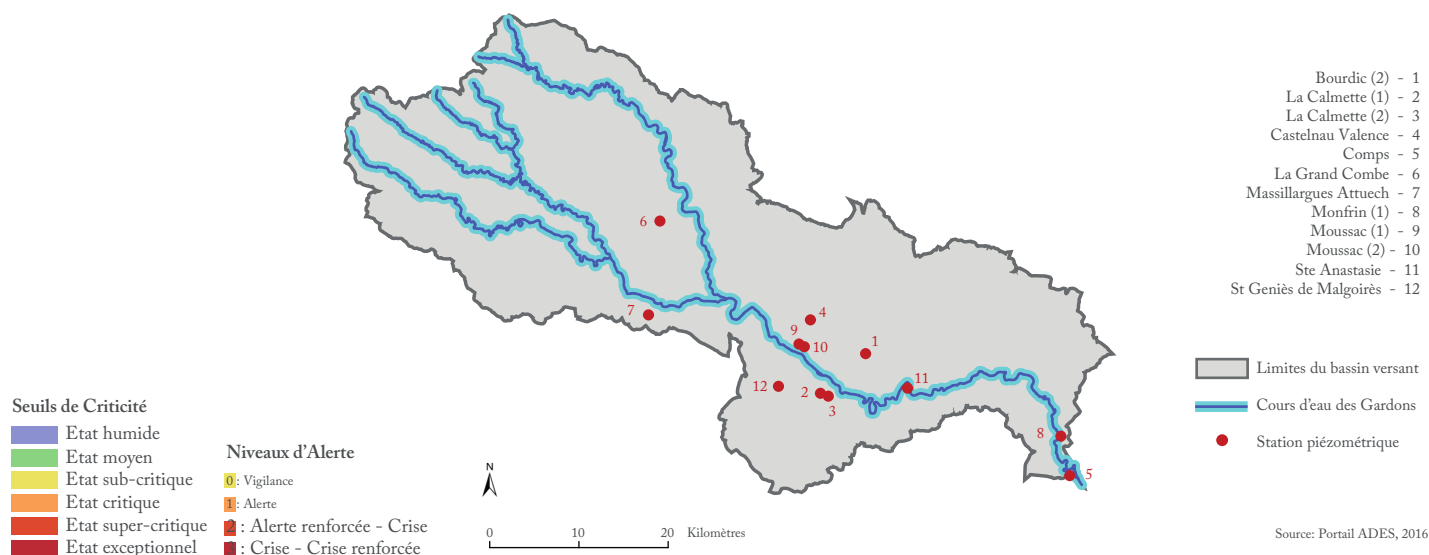


G34.1.12 LES IHNJ À COMPS (5)

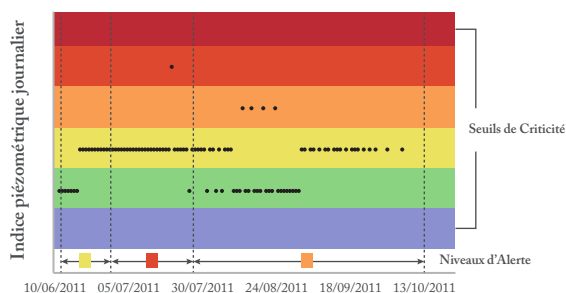


G34.1.14 LES IHNJ À LA GRAND COMBE (6)

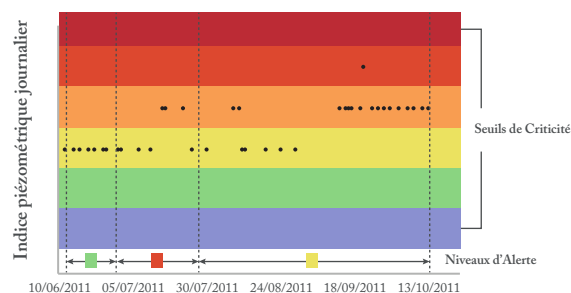




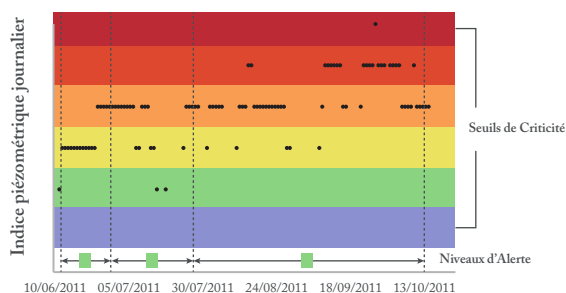
G34.1.15 LES IHNJ À MASSILLARGUES-ATTUECH (7)



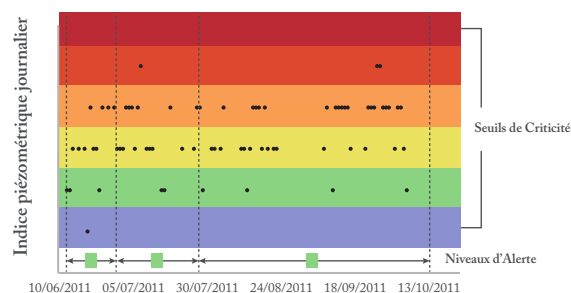
G34.1.16 LES IHNJ À MONTFRIN (8)



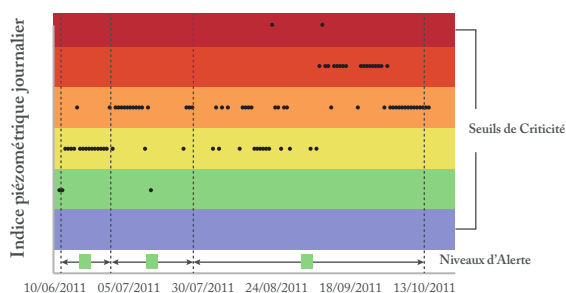
G34.1.17 LES IHNJ À MOUSSAC (9)



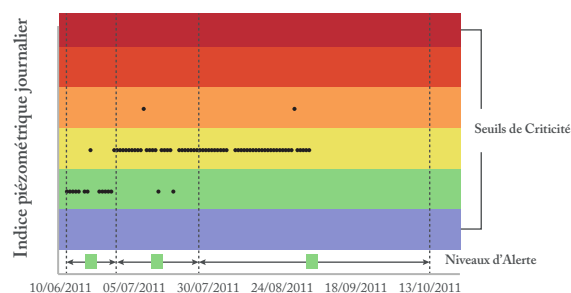
G34.1.18 LES IHNJ À MOUSSAC (10)



G34.1.19 LES IHNJ À SAINTE ANASTASIE (11)



G34.1.20 LES IHNJ À ST GENIÈS DE M. (12)



une fois le niveau super-critique. La situation est donc initialement sous-évaluée, tandis que par la suite, elle est à l'inverse légèrement surévaluée.

À l'aval, sur les nappes d'accompagnement, l'état de la ressource souterraine est relativement bien estimé à Comps.

En revanche, à Montfrin, l'absence d'alerte sous-évalue la situation sub-critique associée à l'indicateur, tandis que l'alerte de niveau 2 déclenchée par la suite surévalue à son tour la situation devenue « seulement » critique. Enfin, si la dernière activation apparaît concordante sur une première moitié de période, elle en sous-évalue la seconde, qui redevient critique.

De manière générale, il apparaît que les niveaux d'alerte et les états pris par l'indicateur diffèrent d'un niveau, ce qui laisse supposer que les seuils statistiques de l'IHNj sont, selon les cas, trop ou pas assez restrictifs, ou que l'évaluation de la situation par les autorités ne s'appuie pas uniquement sur des mesures strictement hydrologiques.

Approche cartographique : les dates de changement de niveau d'alerte — Afin d'établir le lien entre les niveaux activés et leur durée d'application respective, ces derniers sont ensuite confrontés aux états définis par l'indicateur à la date d'établissement de chaque niveau d'alerte.

La représentation cartographique des états de l'IHNj suit la même nomenclature que celle proposée pour les Ivj. La couleur correspondant à l'état du volume souterrain est alors d'autant vive que l'incertitude de la valeur qui lui est associée est faible (ENCADRÉ E35.1.2).

Ainsi, chaque couleur, appliquée au point de mesure, est ensuite dégradée jusqu'au gris, en supposant en toute précaution que la valeur attribuée ponctuellement demeure relativement valide sur un périmètre proche (matérialisé ici par une forme circulaire). Dès lors, l'incertitude augmente à mesure que l'éloignement au point augmente. Par conséquent, plus la zone grisée sur le bassin est importante, plus grand est le manque d'information nécessaire à évaluer l'état de la ressource souterraine. En effet, un seul point de mesure ne peut très vraisemblablement pas traduire l'état de toute une unité hydrogéologique, notamment si elle est étendue et si des spécificités locales modifient le régime de l'aquifère d'un point à un autre.

La forme circulaire choisie ne traduit certainement pas de manière exhaustive la représentativité du fonctionnement hydrologique établi au point de mesure. Elle est toutefois optée dans le seul dessein de proposer un aperçu simple de l'étendue spatiale du déficit en termes de données. Pour un impact visuel plus marqué, les zones renseignées sont également entourées suivant les tracés des unités hydrologiques correspondantes et une limite approximative subjective (FIGURE 9.6).

Suivant ces termes, au 14 juin, le niveau de vigilance, appliqué sur l'ensemble de la partie amont du bassin, semble surévaluer l'état *a priori* normal de la nappe alluviale à Massillargues-Attuech, tandis qu'il minimise grandement l'état critique du karst à la Grand Combe. De la même manière, l'absence d'alerte sur la partie aval du bassin sous-estime l'état sub-critique du volume souterrain à

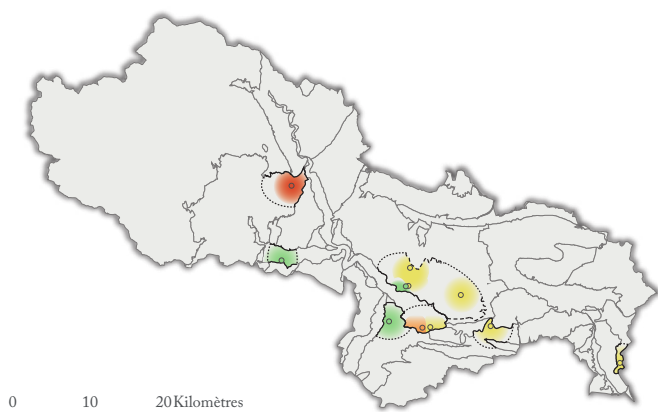
C35.1.3

EVOLUTION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DU
VOLUME SOUTERRAIN

C35.1.2

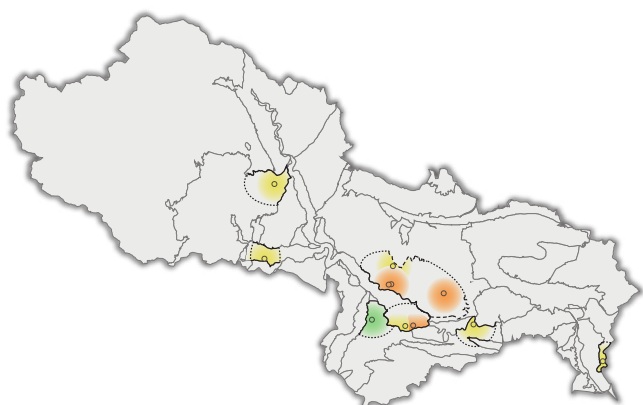
EVOLUTION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DE
LA PERCEPTION DES AUTORITÉS

14 JUIN 2011

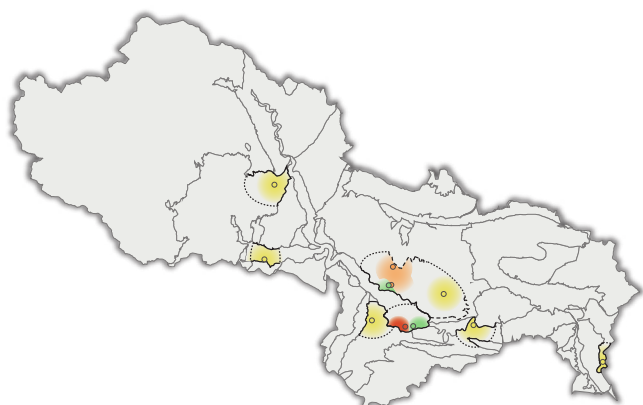


0 10 20 Kilomètres

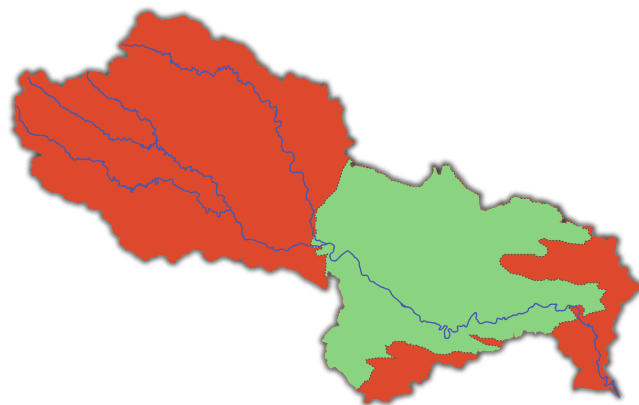
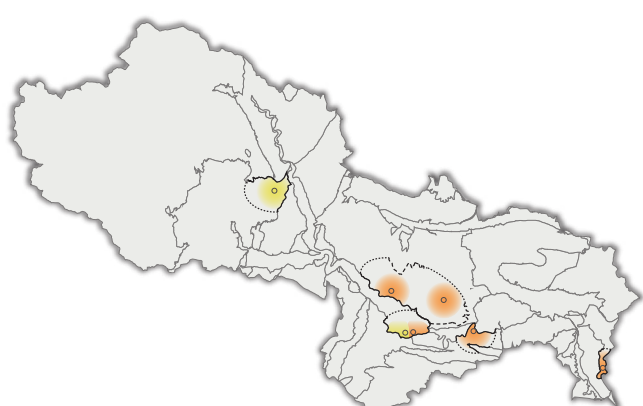
28 JUIN 2011



29 JUILLET 2011



15 OCTOBRE 2011



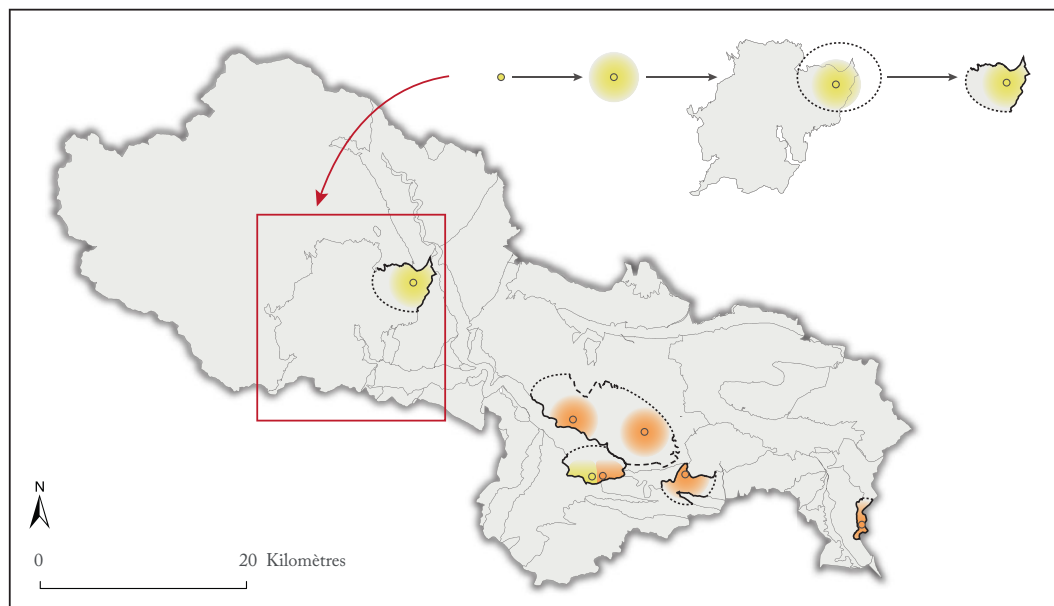


FIGURE 9.6 : MODALITÉS COLORIMÉTRIQUES POUR LA REPRÉSENTATION SPATIALISÉE DE L'ÉTAT DES IHNJ

Montfrin. L'état du karst est, lui aussi, largement minimisé puisque, outre à Saint Geniès de Malgoirès et à Moussac où l'état semble normal, les volumes souterrains sont ailleurs en état sub-critique à critique.

Au 28 juin, le niveau d'alerte 2, équivalant à une situation de crise, surestime grandement l'état sub-critique des aquifères, tant à l'amont qu'à l'aval du bassin. Par contre, ce niveau aurait été justifié sur le karst qui, à l'exception de Saint Geniès de Malgoirès, a atteint l'état critique, et ne bénéficie pourtant d'aucune mesure de limitations.

Au 29 juillet, le niveau de vigilance en vigueur à l'aval concorde avec l'état sub-critique observé, tandis qu'à l'amont le premier niveau d'alerte surestime l'état également sub-critique des aquifères. Par contre, comme au 28 juin, le karst n'est, quant à lui, soumis à aucun état d'alerte. Cela n'apparaît pas non plus justifié pour cette date, puisque son état diffère (depuis la normalité à un état super-critique), selon les localités.

Cet exemple illustre bien une configuration assez récurrente, observée également sur le réseau hydrographique, au cours de laquelle deux postes relativement proches affichent un niveau de criticité différent. Lorsque cela se présente, il devient moins aisé, d'une part, de spatialiser l'information (ici l'état du volume souterrain) et, d'autre part, d'identifier un poste de référence, même à l'échelle de l'unité hydrogéologique. Dès lors, il est naturel de remettre en question la pertinence d'un découpage plus zonal, tel le découpage réglementaire.

Enfin, au 15 octobre, l'arrêt des mesures ne semble pas du tout s'accorder avec l'état traduit par l'indicateur. En effet, les aquifères n'ayant pas atteint l'étiage strict à cette date, affichent une fin de récession sensiblement tendue, c'est-à-dire critique à l'aval et sur le karst, et sub-critique à l'amont sur le karst à la Grand Combe.

Analyse comparative des états des indicateurs relatifs aux volumes superficiel et souterrain — S'il s'avère délicat d'établir un lien évident entre les états perçu et calculé, pour valider la pertinence de l'indicateur, cette dernière pourrait être dévoilée par l'observation d'états similaires, aux mêmes dates et sur les mêmes entités territoriales, pris par les indices volumique et piézométrique (ENCADRÉ E35.1.3).

Entre l'entité karstique à la Grand Combe et le Gardon à Alès, l'état des volumes superficiel et souterrain paraît relativement cohérent, bien que le niveau du karst soit légèrement plus sévère que celui du cours d'eau.

C'est également le cas pour la nappe alluviale (à Massillargues-Attuech et à Cardet) et le Gardon à Anduze, excepté au 14 juin 2011, date à laquelle l'aquifère semble être dans un état normal tandis que le volume superficiel se révèle super-critique. Si cette configuration devait s'observer sur une durée relativement courte (quelques jours), ces écarts pourraient être imputables aux prises d'eau importantes en rivière, ou encore à des problèmes de mesure.

À l'aval, la concordance entre les niveaux superficiels et souterrains ne peut pas être avancée, puisque les informations relatives au linéaire du cours d'eau qui traverse la partie karstique ne sont pas disponibles sur la période considérée. Il est par ailleurs très probable qu'une situation d'assez (très fréquente) ait été observée dans une partie des gorges du Gardon.

9.2.2.2 L'indicateur issu des cycles hydrologiques

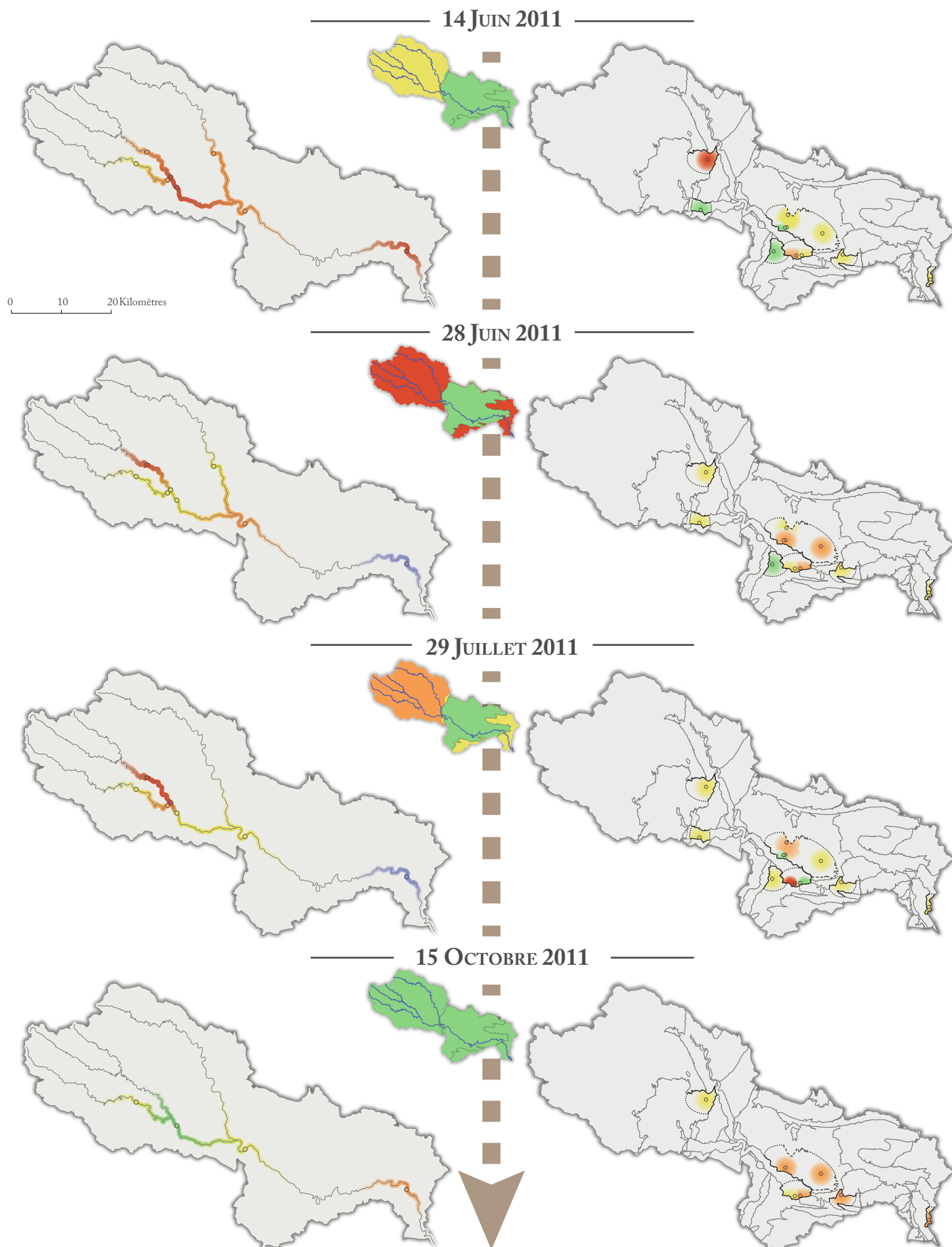
Pour compléter le processus de validation et s'assurer que l'indicateur est pertinent, l'analyse comparative est dupliquée sur l'indicateur calculé sur les séries des cycles hydrologiques. D'une part, parce que la continuité du régime hydrologique est ainsi respectée, puisque la vidange de l'aquifère ne s'arrête pas à l'étiage strict et peut, ainsi, subir des perturbations pouvant la conduire à un état de tension, au-delà de la fin de récession. D'autre part, les seuils établis sur ces séries de valeurs sont légèrement différents des seuils définis sur les séries issues des récessions, et pourraient donc potentiellement mieux cadrer avec les niveaux d'alerte.

Approche graphique : le chrono-kindénogramme — Pour rappel, sur la zone d'alerte du karst, aucun niveau n'est activé durant la période s'étalant du 14 juin au 15 octobre 2011 (ENCADRÉS E34.5 et E34.6). Toutefois, cette absence de mesures réglementaires ne semble pas non plus s'expliquer, puisqu'au minimum trois niveaux sont atteints aux postes de mesures disponibles sur cette zone. Cette configuration s'observe à Castelnau-Valence et à Saint Geniès de Malgoirès, dont l'état fluctue entre normalité et état critique. À Moussac, Sainte Anastasie et Bourdic, le karst oscille entre

C35.1.1

EVOLUTION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DU
VOLUME SOUTERRAIN

C35.1.3

EVOLUTION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DE
LA PERCEPTION DES AUTORITÉS

Etat humide Etat moyen Etat sub-critique Etat critique Etat super-critique Etat exceptionnel

trois niveaux plus élevés (sub-critique à super-critique). Enfin, à La Calmette, l'état exceptionnel est même atteint, une ou deux fois suivant le poste.

Sur le secteur amont, à Massillargues-Attuech, l'état de vigilance apparaît totalement fondé. Par contre, les deux niveaux suivants surestiment l'état de la nappe donné par l'indicateur, qui oscille entre état sub-critique et normalité, avant de s'y maintenir ensuite, et atteindre l'état humide au 15 octobre. À la Grand Combe, en revanche, dès le début de la période, l'état est critique, voire super-critique. Il fluctue ensuite, dès la fin du mois de juin, entre les trois niveaux allant de l'état normal à critique. La situation est donc globalement, excepté durant la deuxième phase d'activation, où, à l'inverse, elle est légèrement surévaluée.

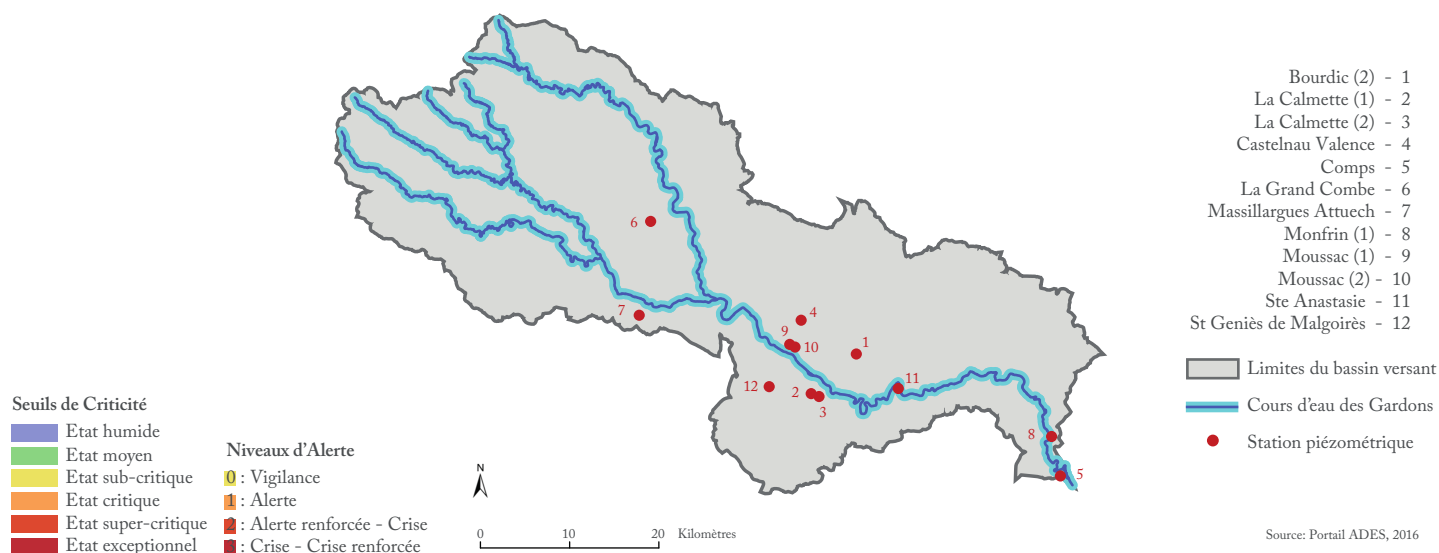
Sur les nappes d'accompagnement de la partie aval, l'adéquation entre le niveau perçu et l'état calculé n'est pas non plus très nette. À Comps, si la dernière phase d'activation est concordante avec l'état calculé, l'indicateur révèle un état majoritairement sub-critique durant la première période sans alerte, ainsi que la seconde phase en alerte de niveau 2. À Montfrin (poste voisin de celui de Comps), l'état est globalement minimisé, à l'exception de la seconde alerte qui surévalue la situation.

Approche cartographique : les dates de changement de niveau d'alerte — Suivant une logique similaire à celle suivie durant cette étape de validation, il s'agit à présent d'établir le lien entre les niveaux activés et leur durée d'application respective, en les confrontant aux états définis par l'indicateur à la date d'établissement de chaque niveau d'alerte.

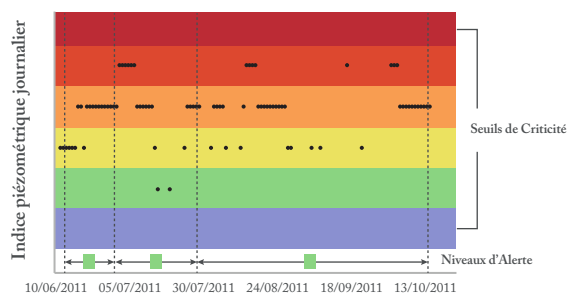
Au 14 juin, le niveau de vigilance appliqué à l'amont est cohérent avec l'état de la nappe déterminé à Massillargues-Attuech. Il minimise fortement, en revanche, celui du karst à la Grand Combe (ENCADRÉ E35.2.2). L'absence de mesures réglementaires à l'aval sous-estime par ailleurs l'état sub-critique de l'aquifère à Montfrin. La zone d'alerte karstique est elle aussi largement sous-estimée, puisque, outre à Saint Geniès de Malgoirès où l'état paraît normal, les volumes souterrains affichent ailleurs des états sub-critiques, voire super-critique, sur l'un des postes de La Calmette.

Au 28 juin, le niveau d'alerte 2, équivalant à un état de crise, surestime notablement l'état sub-critique des aquifères, tant à l'amont qu'à l'aval. Par contre, ce niveau aurait été plus approprié pour la zone karstique qui, à l'exception de Saint Geniès de Malgoirès et de Sainte Anastasie (en état sub-critique), se révèle critique, voire super-critique à Moussac. Sur cette zone, aucune mesure de restriction n'est pourtant mise en œuvre.

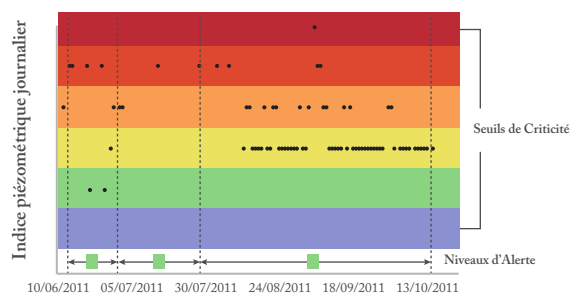
Au 29 juillet, le niveau de vigilance déclaré à l'aval du bassin minimise l'état critique observé à Montfrin, alors que sur la partie amont, le niveau d'alerte 1 surestime légèrement l'état sub-critique des aquifères. Comme observé au 28 juin, la zone d'alerte du karst est partagée entre états sub-critique à Saint Geniès de Malgoirès, critique à Bourdic et Castelnau-Valence, et à la fois normal et super-critique à La Calmette. Cette dernière configuration, déjà rencontrée précédemment, appuie le constat émis sur la question du bien-fondé du découpage réglementaire des zones d'alerte et du choix du poste à retenir comme référent d'une unité territoriale suffisamment homogène.



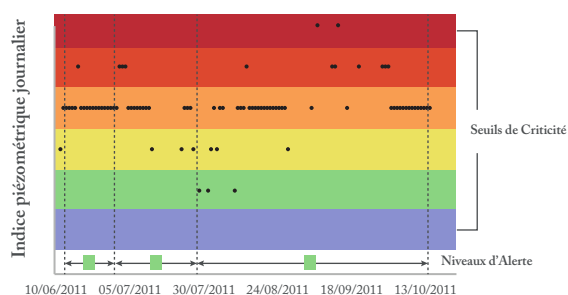
G34.2.9 LES IHNJ À BOURDIC (1)



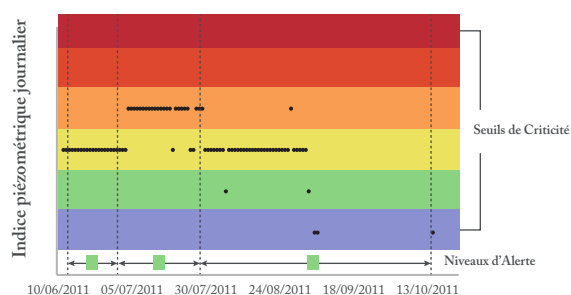
G34.2.10 LES IHNJ À LA CALMETTE (2)



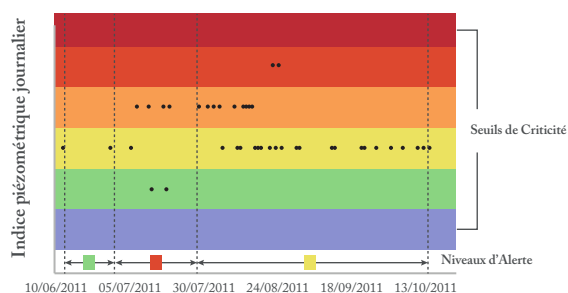
G34.2.11 LES IHNJ À LA CALMETTE (3)



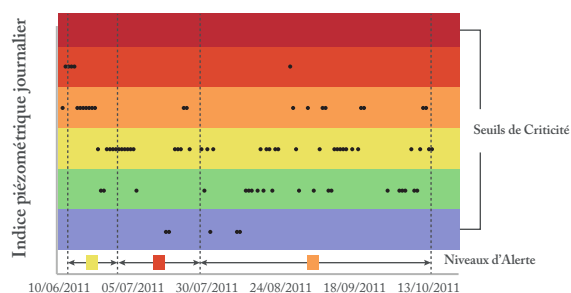
G34.2.12 LES IHNJ À CASTELNAU-VALENCE (4)

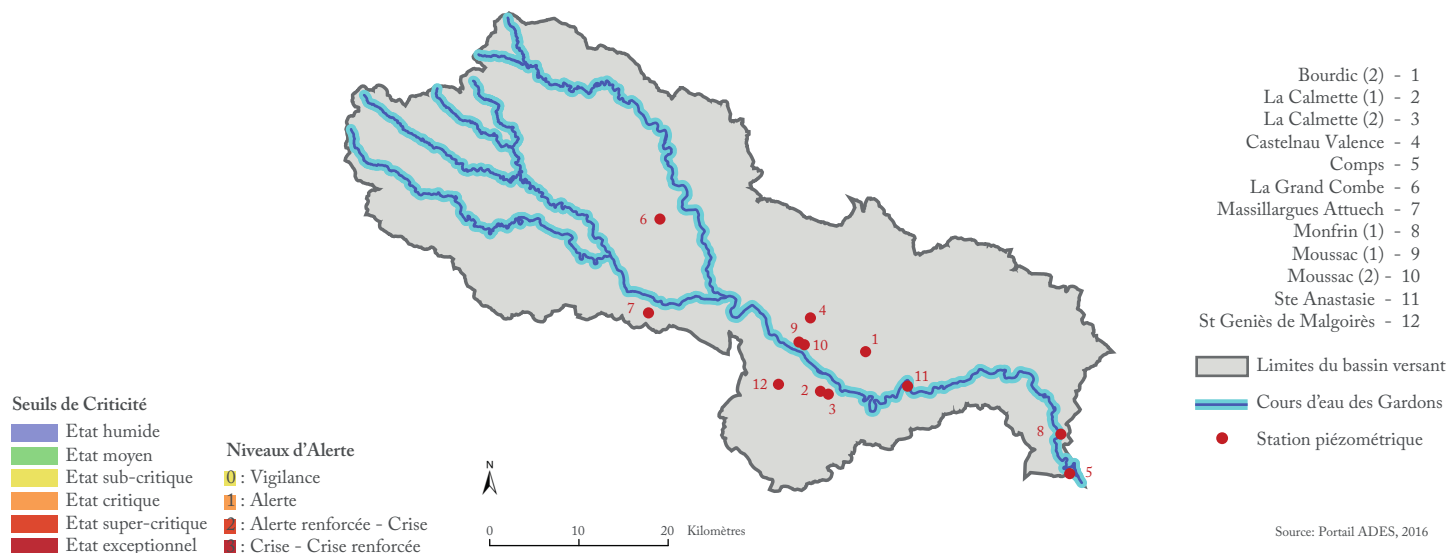


G34.2.13 LES IHNJ À COMPS (5)

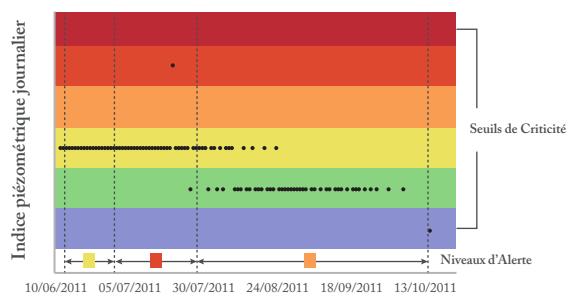


G34.2.14 LES IHNJ À LA GRAND COMBE (6)

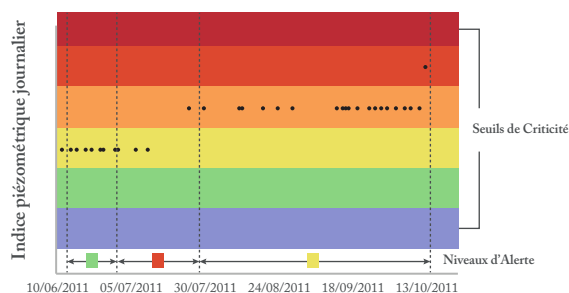




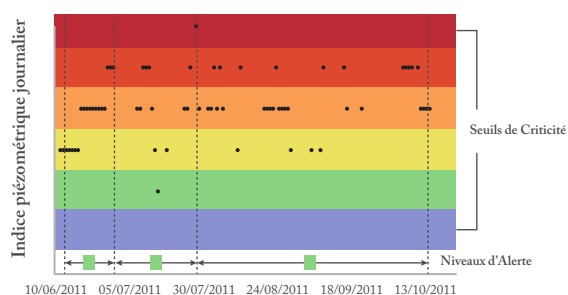
G34.2.15 LES IHNJ À MASSILLARGUES-ATTUECH (7)



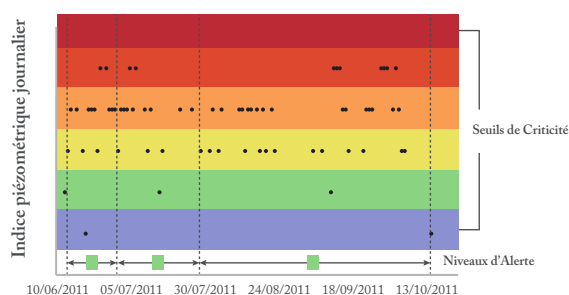
G34.2.16 LES IHNJ À MONTFRIN (8)



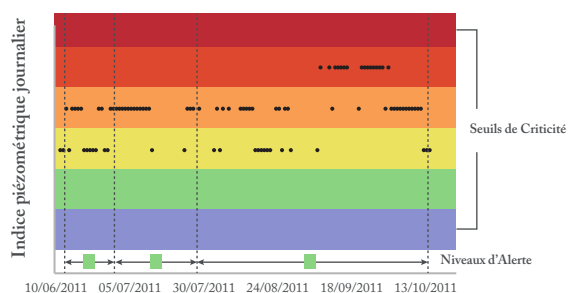
G34.2.17 LES IHNJ À MOUSSAC (9)



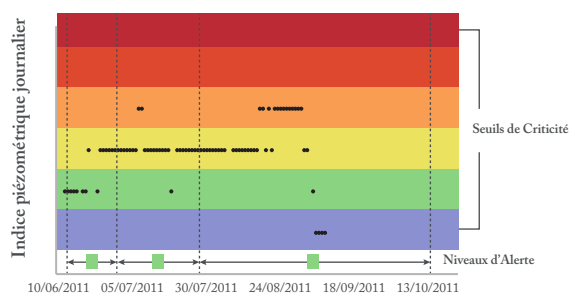
G34.2.18 LES IHNJ À MOUSSAC (10)



G34.2.19 LES IHNJ À SAINTE ANASTASIE (11)



G34.2.20 LES IHNJ À ST GENIÈS DE M. (12)



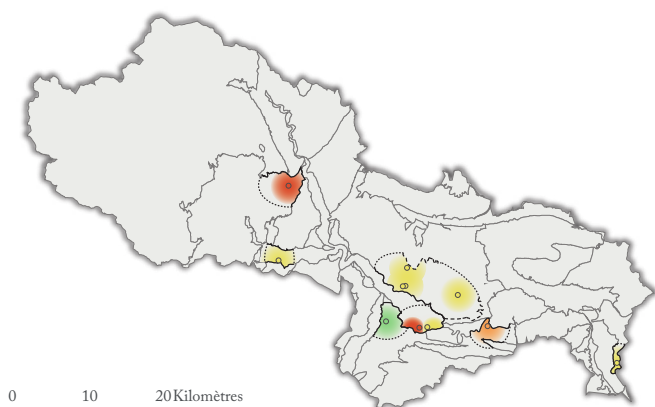
C35.2.3

EVOLUTION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DU
VOLUME SUPERFICIEL

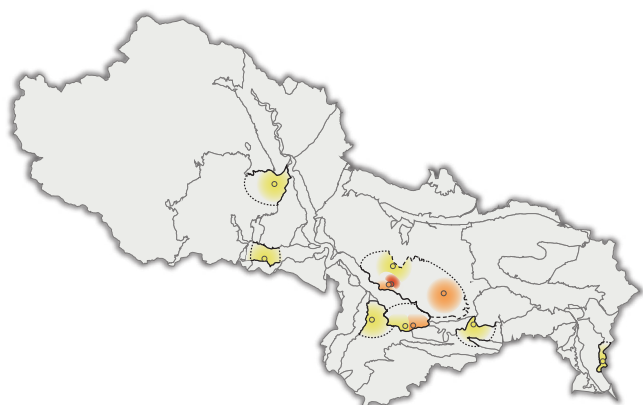
C35.2.2

EVOLUTION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DE
LA PERCEPTION DES AUTORITÉS

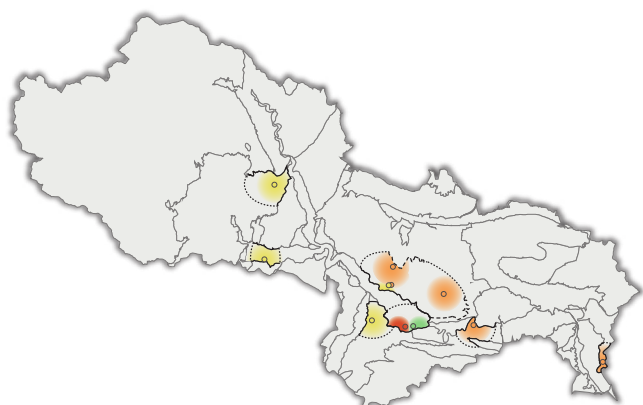
14 JUIN 2011



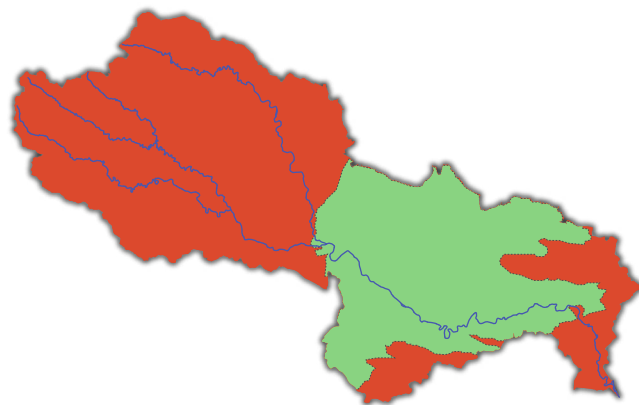
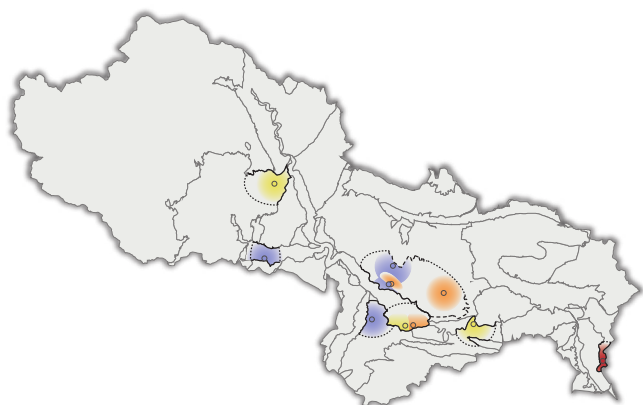
28 JUIN 2011



29 JUILLET 2011



15 OCTOBRE 2011



Enfin, au 15 octobre, l'arrêt des mesures réglementaires ne semble pas du tout en adéquation avec l'état traduit par l'indicateur. En effet, les aquifères n'ayant pas atteint l'étiage strict témoignent d'une fin de récession plutôt tendue, c'est-à-dire critique tant à l'aval que sur la zone d'alerte karstique, et sub-critique sur le karst amont à la Grand Combe. En revanche, grâce à l'indicateur calculé sur les cycles hydrologiques, il est possible de visualiser l'état relatif à la situation des aquifères pour lesquels l'étiage est survenu de manière précoce. Pour ces derniers seulement, l'absence d'alerte coïncide parfaitement avec l'état globalement humide de début de cycle.

Analyse comparative des états des indicateurs relatifs aux volumes superficiel et souterrain — Si la concordance entre les niveaux d'alerte réglementaires et les états définis par l'indicateur n'est pas plus avérée que lors de la confrontation de l'indicateur calculé sur la base des phases de récession, elle pourrait être établie par l'observation d'états similaires, aux mêmes dates et sur les mêmes entités territoriales, pris par les indices volumique et piézométrique calculés sur les cycles hydrologiques (ENCADRÉ E35.2.3).

Entre l'entité karstique à la Grand Combe et le Gardon à Alès, la cohérence entre l'état des volumes superficiel et souterrain est moins nette (sans être totalement discutable), le niveau du karst étant systématiquement plus sévère que celui du cours d'eau.

En revanche, l'état de la nappe alluviale de Massillargues-Attuech et Cardet est beaucoup plus concordant avec celui du Gardon à Anduze, que lors de l'évaluation précédente sur les indicateurs issus des phases de récession.

À l'aval la difficulté demeure la même. La concordance entre les niveaux superficiels et souterrains ne peut pas être établie avec précision, en raison du déficit d'informations relatives au linéaire du cours d'eau traversant la partie karstique, sur cette période.

Toutefois, les petites différences soulignées entre les états souterrains et superficiels semblent davantage confirmer l'existence de facteurs extérieurs potentiellement responsables de ces légers écarts (*e.g.* prélèvements anthropiques, pratiques de l'eau, pratiques agricoles, occupation des sols), plutôt qu'une information erronée véhiculée par les indicateurs.

En effet, si la validation par niveau d'activation ne peut être clairement établie, puisqu'il semble exister des disparités au sein mêmes des unités hydrogéologiques identiques, l'analyse ne peut toutefois pas conclure à une impertinence de l'indicateur. Au contraire, elle ajoute de la complexité au processus de validation, puisque l'état d'alerte est globalisé à l'échelle d'une zone très large et ne tient pas compte des situations localement tendues, ce qu'autorise l'indicateur. De surcroît, il n'est pas non plus à exclure que, suivant l'hypothèse formulée à la suite de l'analyse de l'Ivj, le choix de la date et du niveau d'alerte déclenché ne reposent pas uniquement sur les niveaux hydrologiques.

Même s'il n'est à ce stade pas encore juste de conclure à la véracité de l'information traduite par l'indicateur et à la pertinence des seuils associés, quel que soit le découpage temporel duquel ils sont issus, seul un petit nombre de cas s'est présenté pour lesquels les situations perçues et calculées se révèlent antagonistes. Donc c'est déjà en soi une première satisfaction. Il ne demeure pas moins

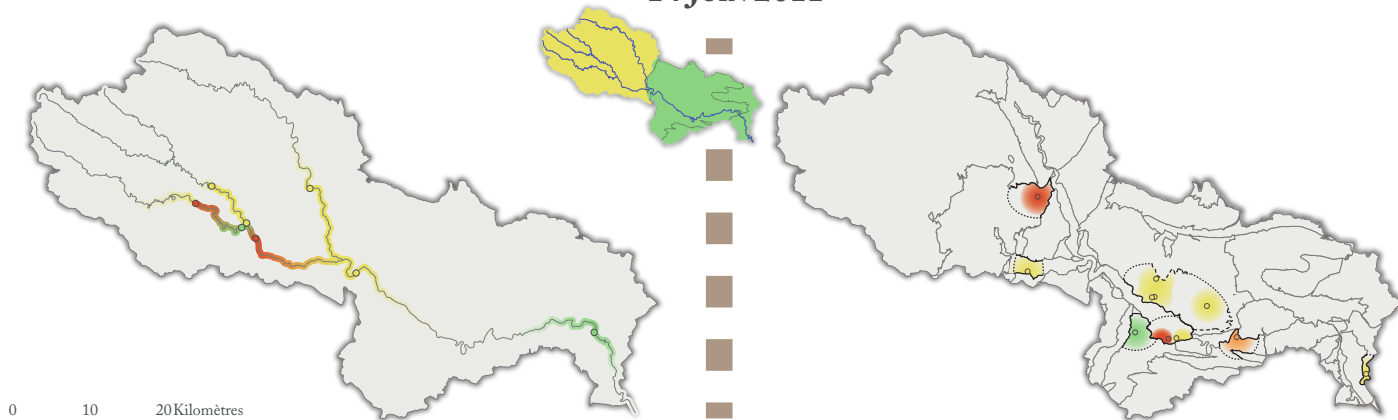
C35.2.1

EVOLUTION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DU
VOLUME SUPERFICIEL

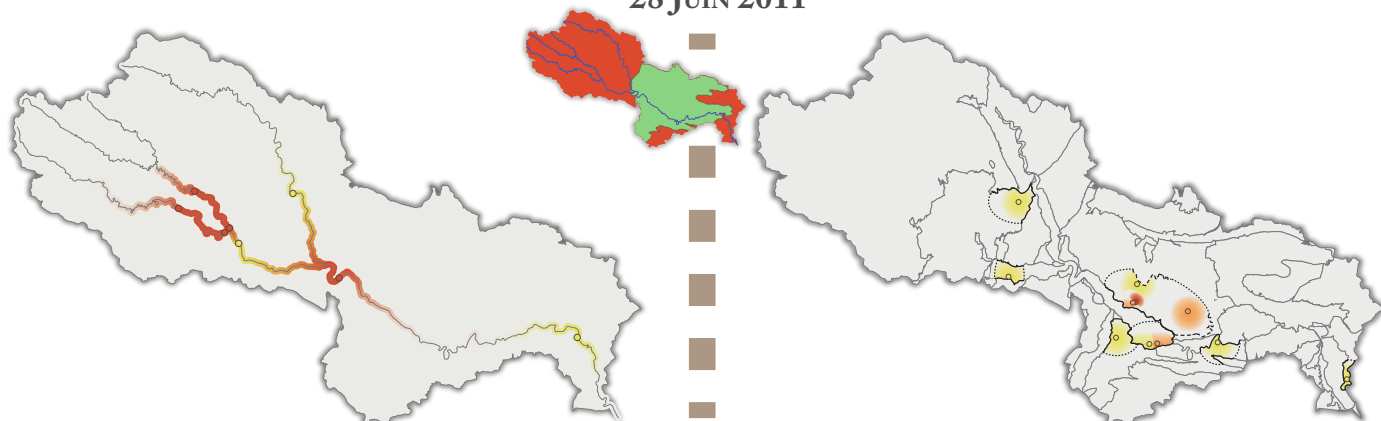
C35.2.3

EVOLUTION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DU
VOLUME SOUTERRAIN

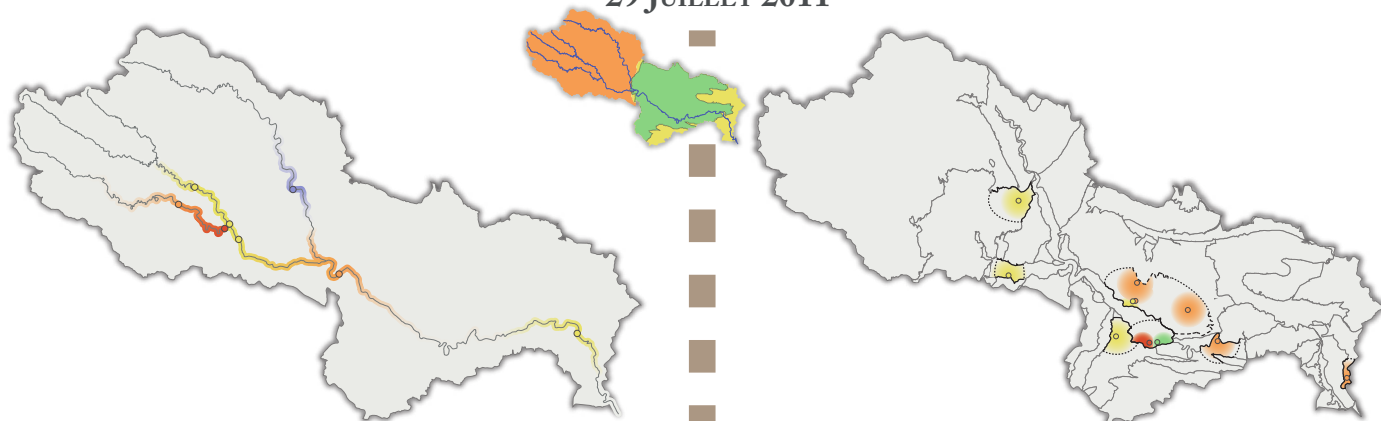
14 JUIN 2011



28 JUIN 2011



29 JUILLET 2011



15 OCTOBRE 2011



Etat humide Etat moyen Etat sub-critique Etat critique Etat super-critique Etat exceptionnel

nécessaire d'aller plus loin dans le processus de validation, comme cela a été suggéré à l'issue de l'analyse de l'Ivj.

9.2.3 État du forçage climatique (IP0j) *vs.* état d'alerte hydrologique

Avant de changer de mode opératoire pour finaliser le processus de validation des indicateurs, une analyse de l'indicateur de forçage climatique (IP0) est effectuée, dans le but de confirmer ou de réfuter l'hypothèse selon laquelle la connaissance des conditions météorologiques influencerait aussi le choix du niveau activé.

La démarche est menée toujours suivant les approches carto-graphiques. Le chrono-kindéno-gramme offre, dans un premier temps, un support visuel de la répartition des valeurs de l'indice durant les périodes d'alerte des eaux superficielles et souterraines. L'objectif repose alors sur l'établissement d'un lien entre l'information pluviométrique et le niveau activé et sa durée d'application.

L'approche cartographique, quant à elle, consiste à la représentation de l'état pris par l'indicateur et du niveau activé pour les eaux superficielles et souterraines, au jour de l'activation dudit niveau. Elle permet ainsi d'observer si les motifs de changement de niveau s'accordent avec le contexte climatique, puisqu'aucune relation solide avec l'état des volumes superficiels et souterrains n'a été mise en évidence.

Comme pour les indicateurs hydrologiques, l'analyse est menée successivement sur l'indicateur issu de la chronique complète disponible à chaque pluviomètre et sur l'indicateur issu des phases de récession.

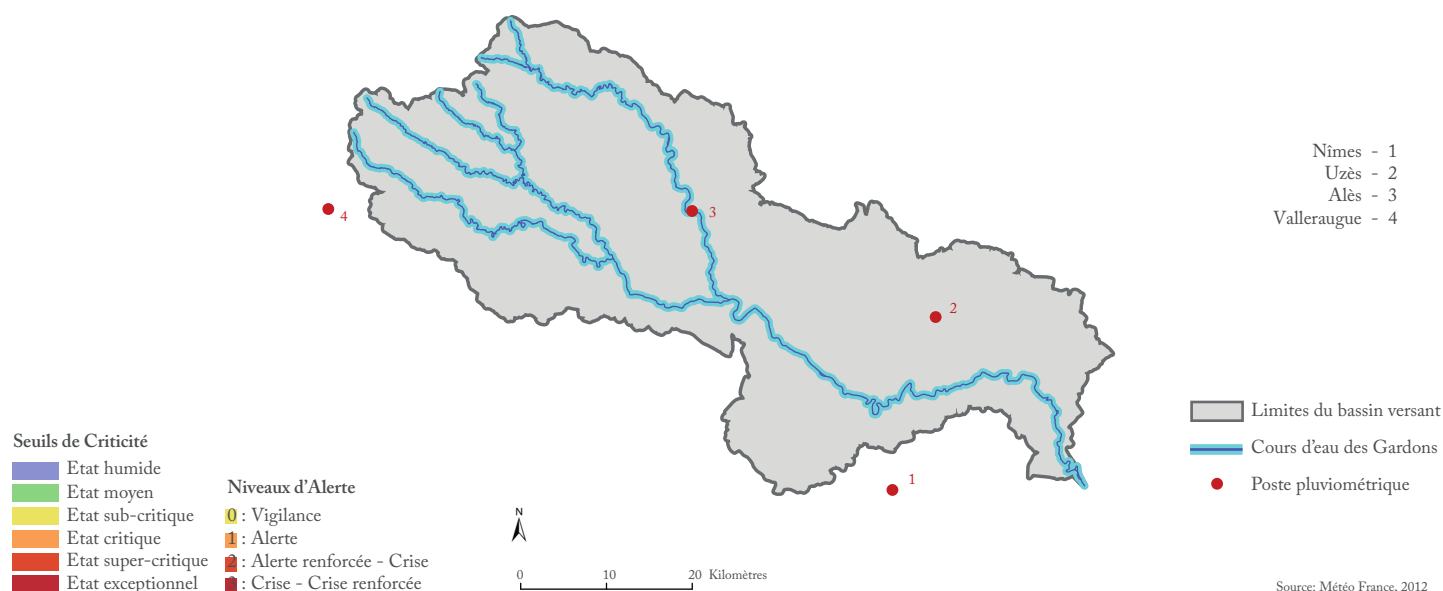
9.2.3.1 L'indicateur issu des phases de récession

En conservant le découpage des zones d'alerte réglementaires, l'indicateur associé à chaque pluviomètre est comparé au niveau d'alerte déclenché sur la zone correspondante. Ainsi, les IP0 calculés à Alès et Valleraugue sont comparés au niveau d'alerte en vigueur sur la zone d'alerte amont, et les IP0 calculés à Uzès et Nîmes sont confrontés au niveau activé sur les zones d'alerte aval et karstique.

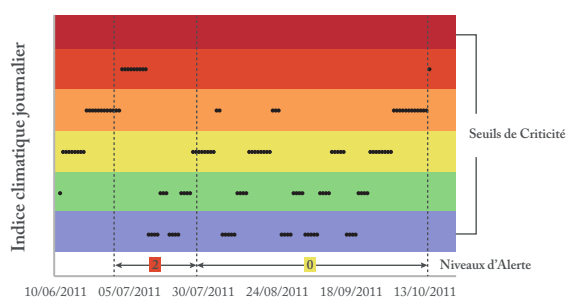
Les enregistrements à Nîmes n'ayant pas été collectés pour l'année 2011, les valeurs de pluie enregistrées à Uzès lui sont attribuées et les états répartis selon les seuils définis au poste de Nîmes.

Approche graphique : le chrono-kindéno-gramme — À première vue, si les niveaux activés étaient basés sur les précipitations, davantage de niveaux auraient été activés durant la période allant du 14 juin au 15 octobre 2011 (ENCADRÉ E34.7). En effet, le changement d'état de l'indicateur est d'autant plus rapide que les durées « sans pluie utile » sont courtes.

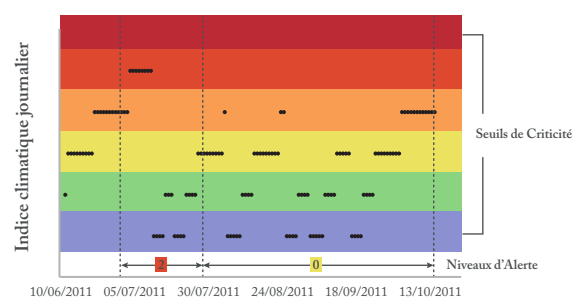
Dans le détail, sur la zone d'alerte aval, les états calculés aux postes de Nîmes et d'Uzès sont concordants avec le début des deux premières phases d'activation. Par contre, les états calculés ne



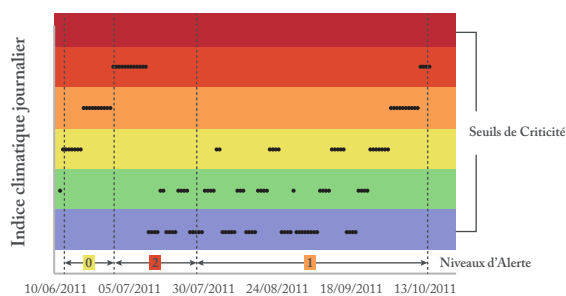
G34.1.21 LES IP0j À NÎMES (1)



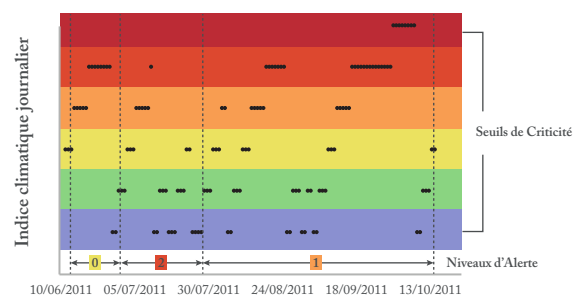
G34.1.22 LES IP0j À UZÈS (2)



G34.1.23 LES IP0j À ALÈS (3)



G34.1.24 LES IP0j À VALLERAUGUE (4)



justifient pas une absence d'alerte sur la zone karstique sur la totalité de la période, à moins que le karst soit perçu comme plus inertiel et donc moins rapidement impacté par le manque de pluie.

En effet, entre le 14 juin et le 15 octobre, six événements « pluvieux » semblent être survenus, ramenant systématiquement l'indicateur à une valeur humide. Aussi, la connaissance d'un petit événement pluvieux à venir peut expliquer que des mesures n'aient pas été prises sur des hydrosystèmes considérés comme relativement inertiels. Toutefois, il a été démontré précédemment que cette caractéristique n'est pas avérée sur l'ensemble de la zone karstique, puisque des niveaux critiques ont été localement atteints cette année-là.

Enfin, l'arrêt des mesures ne semble pas non plus être justifié par le facteur pluviométrique, qui est toujours en état critique au 15 octobre, et sachant que l'épisode pluvieux suivant ne se manifeste à Uzès qu'une dizaine de jours après.

Sur l'amont, les indicateurs calculés à Alès et à Valleraugue sont concordants avec le niveau activé, sur la première partie de la première phase, ainsi que sur la première partie de la seconde à Alès. À Valleraugue, la situation est beaucoup moins tendue en début des deux phases d'activation suivantes, mais elle augmente jusqu'à atteindre des états super-critique et exceptionnel sur plusieurs jours, ce qui aurait justifié un niveau d'alerte plus fort. À Alès, entre fin juillet et début octobre, la situation paraît relativement normale, retrouvant un état humide après avoir atteint quelques jours l'état sub-critique. À partir de début octobre, la situation, revenue à un état sub-critique, continue de progresser jusqu'à atteindre l'état super-critique au 15 octobre.

Ainsi, le constat selon lequel les précipitations pourraient influencer sur les durées et niveaux d'alerte activés n'est confirmé par aucun des postes, ni sur aucune des zones d'alerte, l'indicateur ayant atteint au 15 octobre le niveau sub-critique à Valleraugue, et sachant que l'épisode pluvieux suivant ne se manifeste à Alès qu'une semaine après.

Approche cartographique : les dates de changement de niveau d'alerte — L'approche cartographique offre une meilleure lisibilité de la confrontation entre l'état d'alerte et celui du forçage climatique aux dates auxquelles le niveau d'alerte est modifié.

Pour cela, l'état affecté à chaque pluviomètre est spatialisé suivant la méthode des polygones de Thiessen. Cette dernière, couramment utilisée, donne en général de bons résultats et convient notamment quand le réseau pluviométrique n'est pas homogène spatialement (*i.e.* pluviomètres distribués irrégulièrement sur le bassin étudié). La méthode de Thiessen affecte à chaque station pluviométrique une zone d'influence, dont l'aire (exprimée en pourcentage), représente le facteur de pondération de la valeur locale. Ce dernier est par conséquent proportionnel à l'aire du bassin défini par l'étendue du réseau des pluviomètres considérés. Les différentes zones d'influence sont ainsi déterminées par découpage géométrique du bassin (FIGURE 9.7).

De manière générale, les résultats obtenus par cette méthode de découpage spatial s'approchent très nettement des tendances observées lors de la spatialisation des paramètres du modèle étendu d'Estoup Zipf, à partir de l'extrapolation par IDW (voir *supra* 8.3.2.2). Encore une fois, il ne s'agit

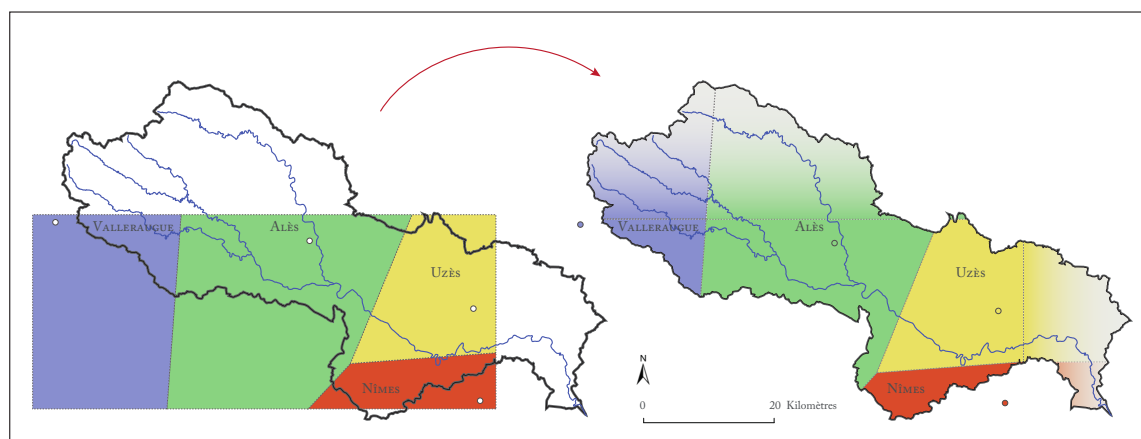


FIGURE 9.7 : MODALITÉS COLORIMÉTRIQUES POUR LA REPRÉSENTATION SPATIALISÉE DE L'ÉTAT DE L'IP0

ici nullement de rechercher la précision, sinon de s'assurer que ces seuls postes sont nécessaires pour déterminer un état de tension global et synthétique sur l'ensemble du bassin des Gardons.

Sur les cartes résultantes, et sans s'attarder sur le cas du karst qui, comme souligné précédemment, n'a fait l'objet d'aucune préoccupation, il apparaît clairement que l'état de l'indicateur n'est pas concordant avec celui du niveau activé (ENCADRÉ E35.1.4).

En effet, les seules relations concordantes entre les états calculés et perçus sont observées le 14 juin à l'amont et le 29 juillet à l'aval. Au 28 juillet, la situation de l'ensemble du bassin a été à juste titre évaluée comme étant problématique, mais dans une mesure toutefois un peu excessive. Aux autres dates d'activation, rien ne semble lier les deux informations.

Enfin, comme cela a été souligné dans l'analyse graphique, le plus surprenant demeure la décision d'arrêter les mesures alors que le bassin présente un état critique à super-critique.

9.2.3.2 L'indicateur issu de la chronique complète

Étant donné que les seuils de criticité de l'IP0 varient, comme pour les autres indicateurs, suivant le découpage temporel à partir duquel est calculé l'indicateur, l'analyse est dupliquée sur les états pris (durant la période du 14 juin au 15 octobre 2011) par l'indicateur, calculé à partir de la chronique complète enregistrée à chaque pluviomètre. Il est alors supposé que de meilleures correspondances pourront être établies entre les informations réglementaires et climatiques.

Approche graphique : le chrono-kindénogramme — Dans l'ensemble, les niveaux activés semblent mieux concorder avec l'état du forçage climatique (ENCADRÉ E34.8). Toutefois, comme cela a déjà été souligné, la mise en œuvre de niveaux d'alerte supplémentaires aurait été plus appropriée, notamment mi-septembre pour Vallerargues et début octobre pour les autres postes, la situation devenant respectivement exceptionnelle et super-critique.

Dans le détail, sur la zone d'alerte aval, les états observés aux postes de Nîmes et d'Uzès s'accordent avec le début des deux premières phases. Par contre, les états calculés ne justifient pas non

C35.1.4

EVOLUTION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DU
FORÇAGE CLIMATIQUE

C35.1.2

EVOLUTION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DE
LA PERCEPTION DES AUTORITÉS

14 JUIN 2011



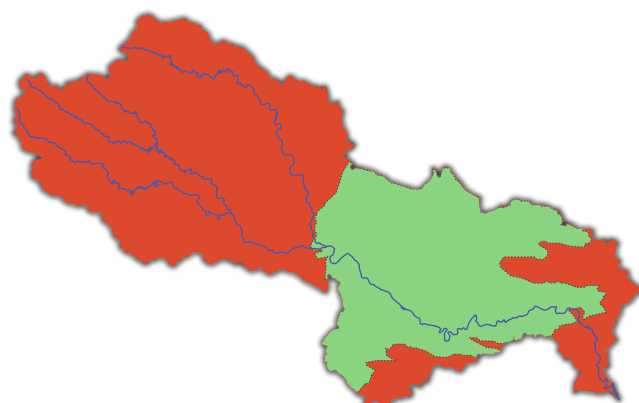
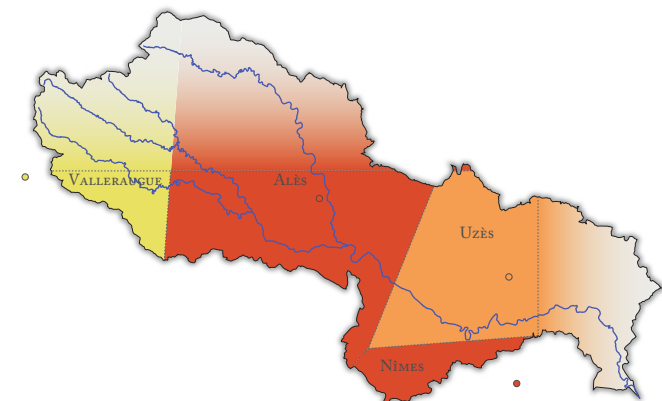
28 JUIN 2011

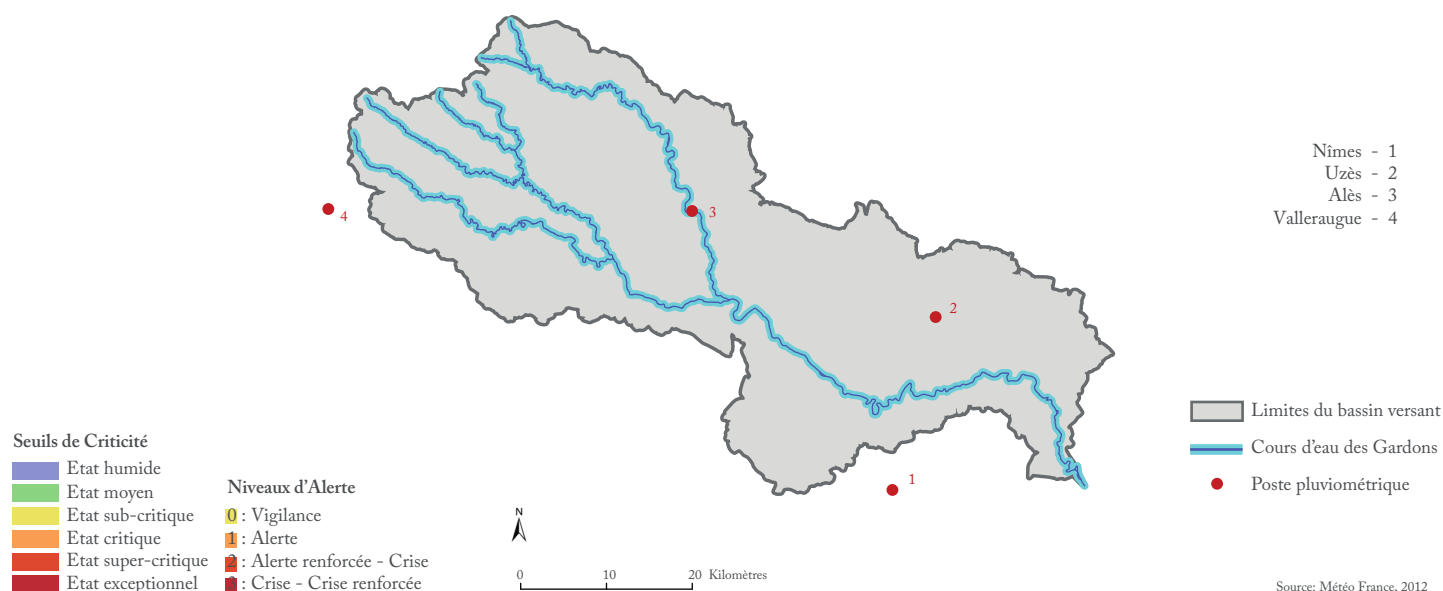


29 JUILLET 2011

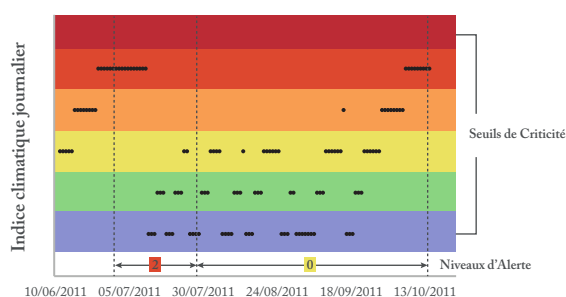


15 OCTOBRE 2011

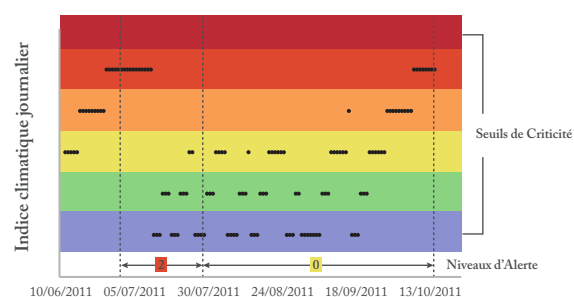




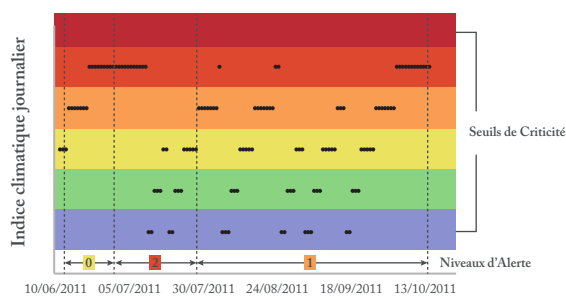
G34.2.21 LES IP0j À NÎMES (1)



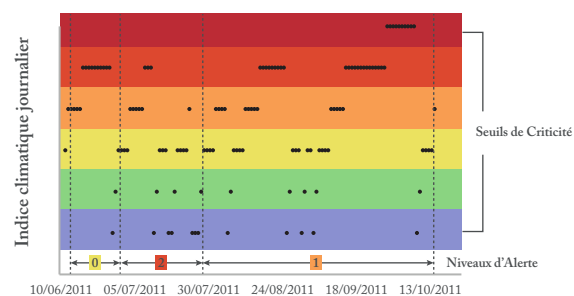
G34.2.22 LES IP0j À UZÈS (2)



G34.2.23 LES IP0j À ALÈS (3)



G34.2.24 LES IP0j À VALLERAUGUE (4)



plus l'absence d'alerte sur la zone d'alerte du karst, malgré les quelques retours de l'indicateur à une valeur humide dès l'apparition d'une petite pluie. Enfin, la fin des mesures ne semble pas reposer sur le forçage climatique, maintenu en état super-critique au 15 octobre.

Sur la partie amont, les états observés à Alès et à Valleraugue sont davantage en adéquation avec le niveau d'alerte, notamment sur la première partie de la première phase, ainsi sur le début des deux suivantes à Alès. À Valleraugue, en revanche, la situation, un peu moins tendue en début des deux dernières phases d'activation, augmente ensuite jusqu'à atteindre des états super-critique et exceptionnel sur plusieurs jours, ce qui aurait justifié un niveau d'alerte plus élevé. À Alès, entre fin juillet et début octobre, la situation est majoritairement sub-critique, retrouvant un état humide après avoir atteint quelques jours l'état critique. À partir de début octobre, l'IP0 monte vers un état super-critique et s'y maintient jusqu'au 15 octobre. Aussi, comme sur la zone aval, l'IP0 calculé à Alès et Valleraugue ne justifie pas non plus l'arrêt des mesures réglementaires, le forçage climatique à Valleraugue ayant alors atteint le niveau critique.

Approche cartographique : les dates de changement de niveau d'alerte — La relation entre le niveau d'alerte activé et l'état du forçage climatique est ensuite appréhendée au travers de l'approche cartographique aux dates d'activation de chaque niveau (ENCADRÉ E35.2.4).

Globalement, les niveaux activés semblent beaucoup mieux concorder avec l'état du forçage climatique, que lorsque la confrontation est effectuée avec l'IP0 calculé sur les séries issues des récessions.

Sans insister à nouveau sur la situation particulière de la zone d'alerte du karst, au 14 juin, la situation est légèrement sous-évaluée sur la partie aval.

Au 28 juin, en revanche, elle apparaît conforme à l'état pris par l'indicateur, exceptée sur l'aire d'influence supposée du poste de Valleraugue.

Au 29 juillet, elle est légèrement surestimée à l'aval et à l'extrême amont. Il est possible que l'épisode pluvieux récent, à l'origine de l'état humide de l'indicateur, n'ait pas été jugé suffisamment important pour pallier aux déficits cumulés depuis le début de la période estivale, et justifier un arrêt des mesures réglementaires.

Par contre au 15 octobre, la situation est à nouveau, et très largement, sous-évaluée. Cela suggérerait alors que l'arrêt des mesures est décidé, non pas sur la base de la situation du jour, mais plutôt selon la connaissance des prévisions météorologiques/climatiques, donc à partir d'une anticipation. En effet, une semaine à 10 jours après, un épisode pluvieux apparaît, respectivement à Alès et Uzès.

Cela étant, dans l'ensemble, il y a une meilleure cohérence entre la perception et l'absence de pluie. Ce critère influence probablement (et largement) le choix des niveaux et/ou de la durée des mesures, mais ce n'est certainement pas le seul.

C35.2.4

EVOLUTION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DU
FORÇAGE CLIMATIQUE

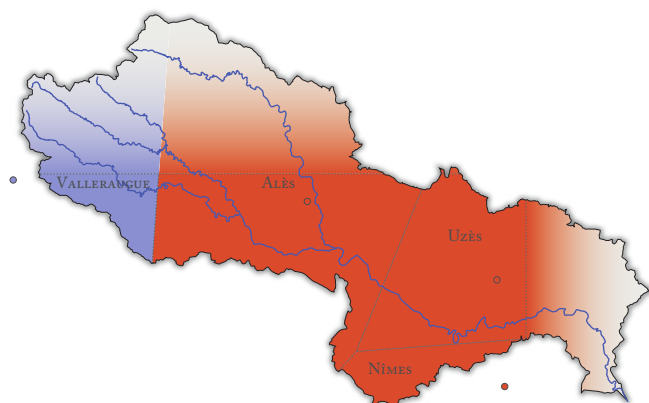
C35.2.2

EVOLUTION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DE
LA PERCEPTION DES AUTORITÉS

14 JUIN 2011



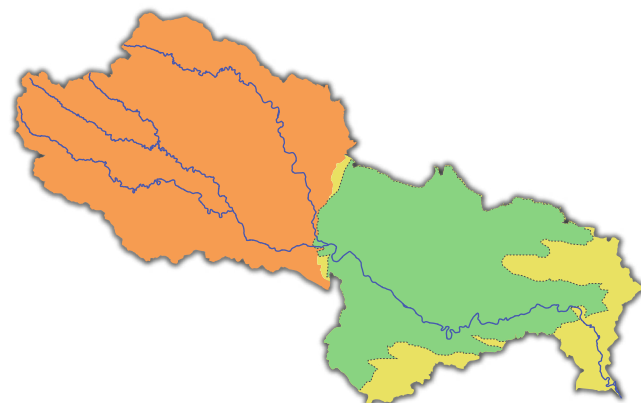
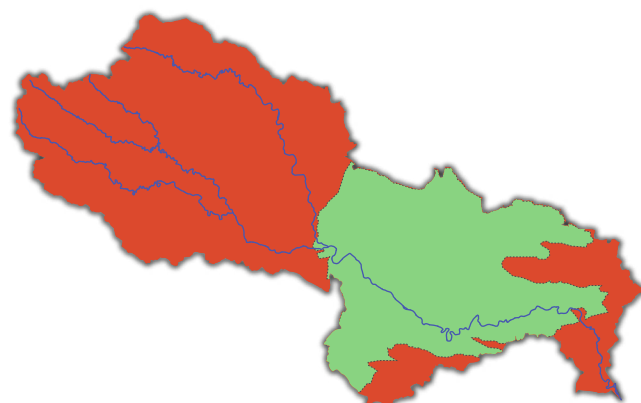
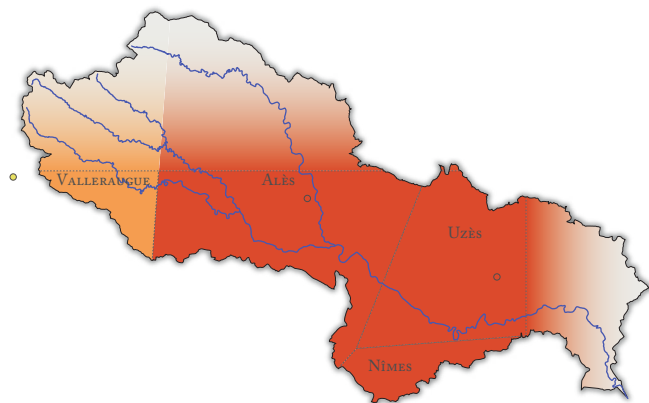
28 JUIN 2011



29 JUILLET 2011



15 OCTOBRE 2011



Etat humide Etat moyen Etat sub-critique Etat critique Etat super-critique Etat exceptionnel

Conclusion — Bien que la relation semble meilleure entre les indicateurs calculés sur les cycles hydrologiques, elle est moins évidente entre l'état pris par les indicateurs et le niveau activé, à l'exception de l'IP0 (première validation ?). Cela étant, la perception des autorités publiques ne peut être employée à des fins de validation de la méthode, puisqu'elle représente une évaluation subjective, biaisée par ailleurs par des enjeux socio-économiques et politiques.

Ajouté à cela, il faut se poser la question des seuils : est-il normal que pour une période peu sèche des niveaux super-critiques et/ou exceptionnels soient atteints ? Les états hydrologiques ne sont-ils pas surestimés ?

Ces résultats sont néanmoins intéressants pour deux raisons : (1) parce que globalement, les états affichés ne sont pas antagonistes, ce qui laisse suggérer que les indicateurs sont assez réalistes, et (2) parce que les différences peuvent être exploitées pour évaluer un degré de tension, qui serait d'autant plus fort que la situation perçue sous-estime la situation de criticité calculée (dans la mesure où les indicateurs sont validés) (voir CHAPITRE 10).

Toutefois, les indicateurs hydrologiques semblent traduire une information relativement concordante, du moins aux dates de changement de niveau d'alerte (première validation ?).

Pour compléter la démarche de validation, il est possible d'essayer d'établir la pertinence des indicateurs en comparant leurs états à des dates particulières. Cela revient, en d'autres termes, à évaluer leur concordance lorsqu'un certain état est atteint par l'un d'entre eux. Cela constituera ici l'ultime étape de validation proposée.

9.3 États exceptionnels des indicateurs : Analyse par dates « clé »

Afin de finaliser le processus de validation des indicateurs élaborés pour synthétiser l'état hydro-climatique du bassin des Gardons, une analyse est conduite sur l'ensemble des stations de mesure (tous indicateurs confondus), à une date dite « clé », correspondant au jour au cours duquel l'un des indicateurs affiche une situation exceptionnelle.

L'objectif est de constater la concordance entre les niveaux pris par chaque indicateur et de valider les relations établies *a priori* dans les modèles théoriques (voir CHAPITRE 3). Les états exceptionnels de débits (Iv_j) sont-ils exclusivement liés aux précipitations (IP0_j) ? L'état des débits évolue-t-il avec celui des niveaux piézométriques (IH_{Nj}) ? L'état des volumes (Iv_j et IH_{Nj}) est-il critique lorsque le forçage climatique est le plus fort (état exceptionnel) sur tout le bassin ? Etc.

Pour une meilleure lisibilité des résultats, les approches graphique et cartographique sont conservées. Cependant, l'analyse n'est menée ici que sur les indicateurs calculés sur la base des cycles hydrologiques, d'une part, parce qu'ils se sont avérés plus pertinents, mais surtout parce qu'ils présentent l'avantage d'offrir des valeurs lorsque la période étudiée s'étend au-delà de la phase de récession de fin de cycle.

Cela étant, cette analyse pourrait tout aussi bien (1) être menée sur les indicateurs issus des récessions, et (2) porter sur des dates « clé » correspondant à des situations humides, normales, critiques, etc.

9.3.1 L'état du volume superficiel *vs.* état exceptionnel de l'indice climatique

Dans un premier temps, l'évolution de l'état pris par l'indice volumique journalier lorsque l'indice climatique augmente vers un état exceptionnel est observée. Le contexte exceptionnel est défini par le poste d'Alès, lequel a enregistré la durée maximale « sans pluie utile » entre 1955 et 2012, soit 80 jours « secs ». Cette situation est observée au cours de l'année 1978, et s'étend de fin août à début novembre. Cela justifie par ailleurs le choix d'effectuer l'analyse sur des indicateurs issus des cycles hydrologiques, car comme cela sera mis en évidence, certains linéaires auront atteint l'étiage avant même que le forçage climatique ait atteint l'état exceptionnel.

De surcroît, en 1978, seules les données des postes limnimétriques sont disponibles, et sur seulement certains postes. L'analyse est donc centrée sur deux indicateurs (Ivj et IP0), et conduite tous les dix jours, depuis le 10^e jour « sans pluie utile » enregistré à Alès jusqu'au 80^e jour (ENCADRÉ E36.1).

L'objectif consiste à observer comment se comporte l'indicateur de l'état du volume superficiel et de constater s'il évolue suivant une dynamique similaire à celle du forçage climatique, ce qui serait relativement logique.

Au 2 septembre, soit au dixième jour « sans pluie utile » (P-ETP) à Alès, l'ensemble des linéaires enregistrés apparaissent dans des états sub-critiques (à Saumane – dont le cycle a commencé au 16 juillet – et Gènerargues) à super-critiques (à Anduze et à Alès).

Au 12 septembre, soit au vingtième jour, les états sub-critiques deviennent critiques, tandis que les linéaires super-critiques se maintiennent dans ce même état. À Sanilhac, en revanche, l'indice volumique diminue vers un état sub-critique. Un épisode pluvieux semble être intervenu, puisque le forçage climatique à Uzès est passé d'un état exceptionnel à sub-critique.

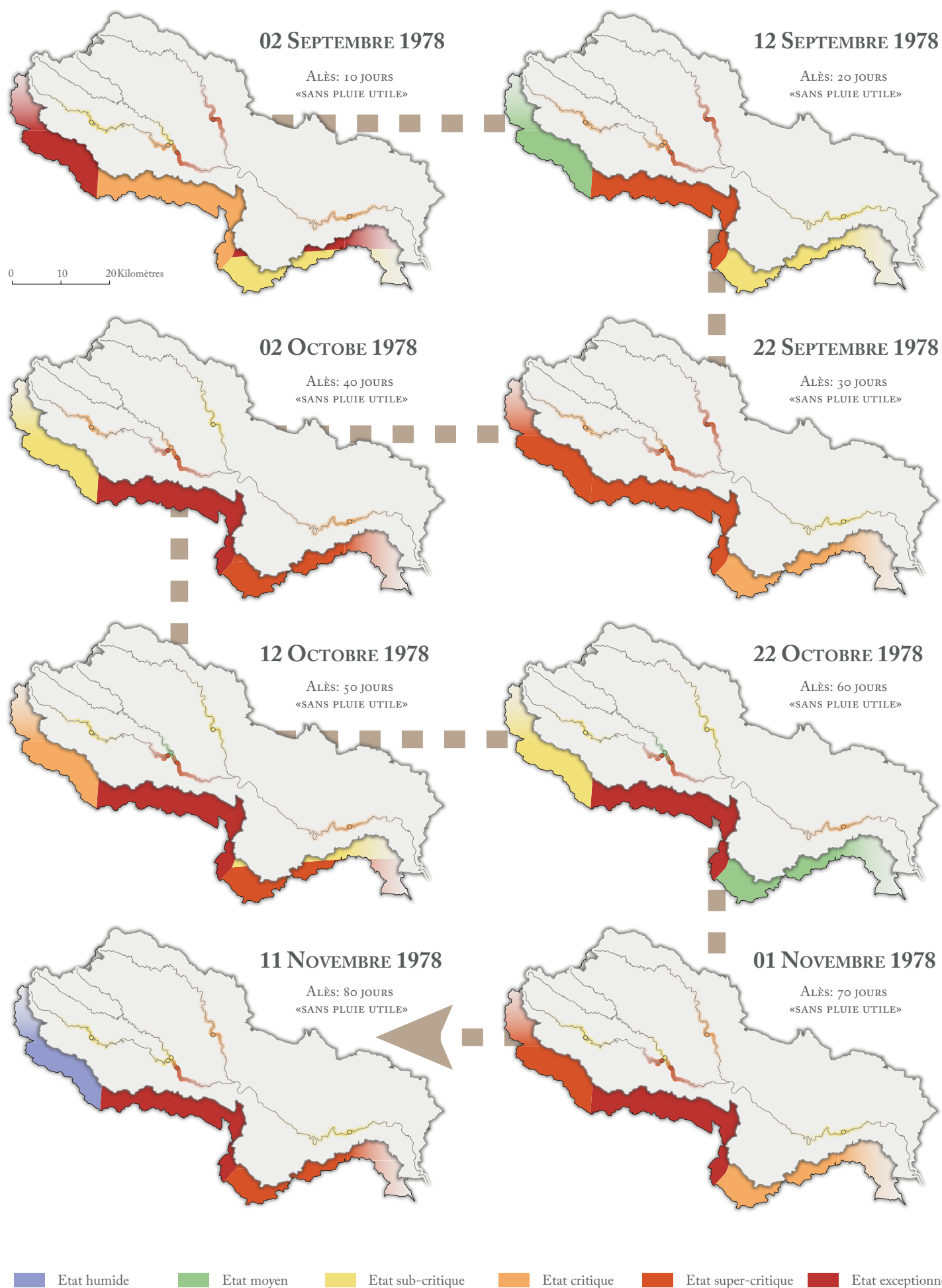
Au trentième jour, la situation globale du forçage climatique s'intensifie, et celle des indices volumiques se maintient, à l'exception du Gardon à Corbès qui atteint à son tour l'état super-critique.

Au quarantième jour, les IP0j continuent de progresser vers l'état supérieur, excepté à Vallesraugue où un épisode pluvieux a dû être enregistré, sans toutefois être significatif. Cela justifierait ainsi que le Gardon à Saumane se maintienne malgré tout en état critique. Toujours à l'amont, le Gardon à Corbès et Anduze n'évolue pas non plus. À l'aval, en revanche, le Gardon à Sanilhac atteint l'état critique tandis que le forçage climatique à Uzès et Nîmes devient super-critique. À Alès et Gènerargues, l'étiage a été atteint, mais le début de cycle s'affiche déjà en état critique.

Au cinquantième jour, malgré un épisode pluvieux enregistré à Uzès, la situation hydrologique à Sanilhac demeure critique. Étrangement, la situation à Gènerargues et Saumane s'est quant à elle

C36.1.1

EVOLUTION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DU VOLUME SUPERFICIEL : IP0 MAXIMAL À ALÈS



améliorée, bien que l'indicateur de forçage climatique continue de progresser vers un état supérieur. Ailleurs, la situation se maintient.

Au soixantième jour, la configuration est assez proche de la précédente. Des pluies sont apparues entre-temps à Valleraugue, pouvant expliquer le maintien de l'état sub-critique du Gardon à Saumane. Le forçage climatique à Uzès et Nîmes est revenu à la normale, mais le Gardon à Sanilhac reste en état critique, accusant peut-être le déficit amont, et/ou parce que les apports pluviométriques n'ont pas été suffisants. Le Gardon à Corbès a, entre-temps et à son tour, atteint l'étiage et présente un début de cycle déjà très sévère (super-critique).

Au soixante-dixième jour, Sanilhac a également atteint l'étiage strict et affiche un début de cycle sub-critique, le forçage climatique étant remonté en état critique à Uzès et Nîmes. Le Gardon à Générargues, toujours en début de cycle, progresse en état sub-critique et se maintient à Corbès (également en début de cycle) en état super-critique. Le Gardon à Saumane ne semble pas impacté puisqu'il affiche depuis trente jours un état sub-critique, et ce, malgré que le forçage climatique à Valleraugue soit remonté en état super-critique.

Enfin, au quatre-vingtième jour, date à laquelle le Gardon à Anduze atteindra l'étiage strict à son tour, la situation semble ailleurs se maintenir, voire s'améliorer à Corbès.

Globalement, l'évolution dynamique des états pris par les indices volumiques journaliers concorde relativement bien avec celle des indices climatiques, même si (1) les premiers n'ont jamais atteint l'état exceptionnel, et (2) localement, certains états sont un peu moins cohérents (*e.g.* au 22 octobre, le Gardon à Générargues affiche un début de cycle normal, tandis que le forçage climatique est en situation exceptionnelle).

Ces petits « points noirs », très anecdotiques, peuvent être liés à la spatialisation approximative de l'indice climatique, et/ou à la méthode de calcul de l'ETP, qui toutes deux combinées ne permettent pas de présenter une synthèse précise du forçage climatique très localisée.

Néanmoins, ces deux indicateurs apparaissent, à cette étape de validation, très satisfaisants.

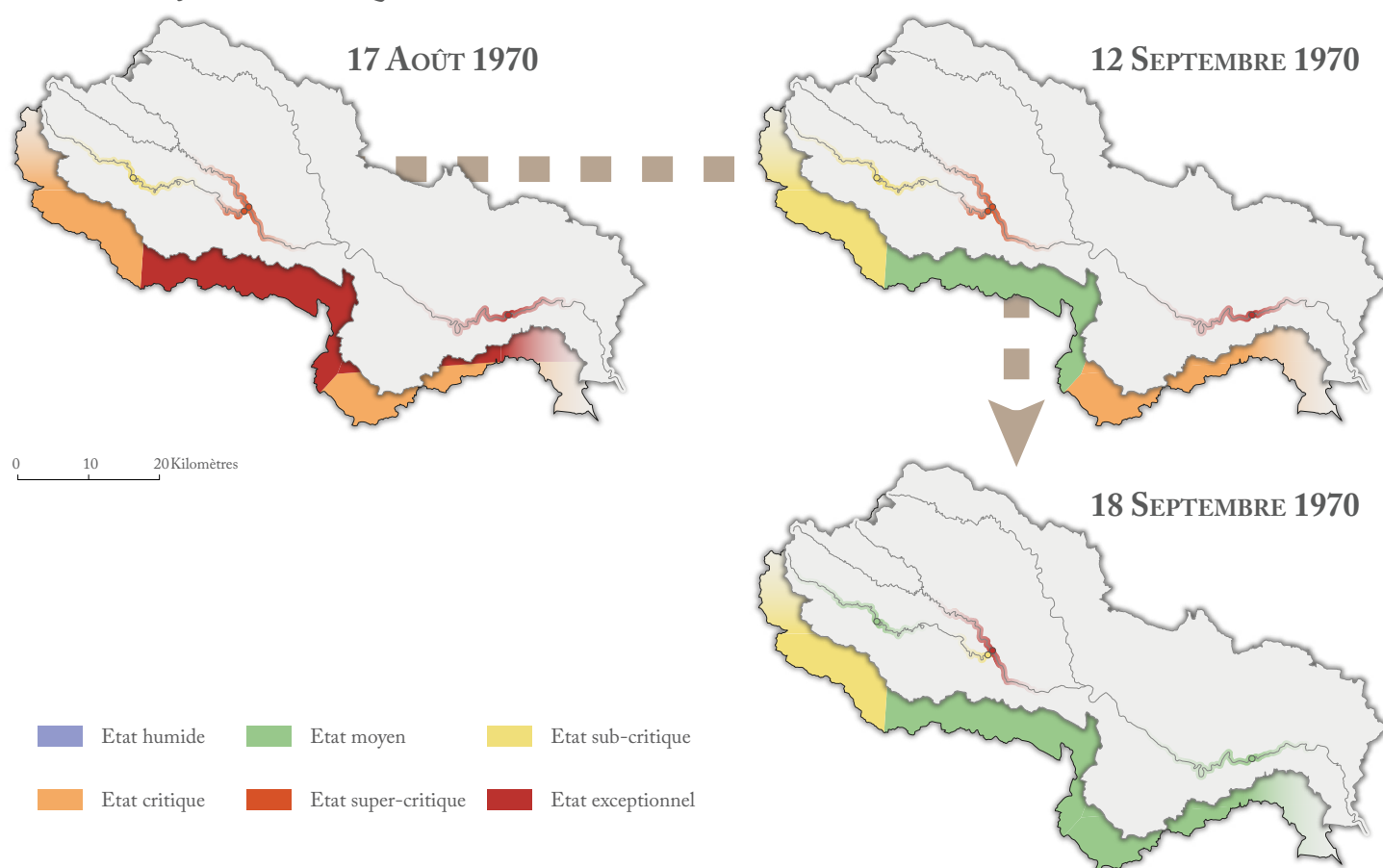
9.3.2 L'état exceptionnel du volume superficiel *vs.* état de l'indice climatique

Étant donné que, dans un contexte où le forçage climatique est en situation exceptionnelle, l'indice volumique journalier ne l'atteint pas, l'analyse inverse est conduite : la comparaison est menée entre l'état pris par le forçage climatique et l'indice volumique journalier à chaque poste en service, lorsque l'un d'eux affiche une situation exceptionnelle (ENCADRÉ E36.2).

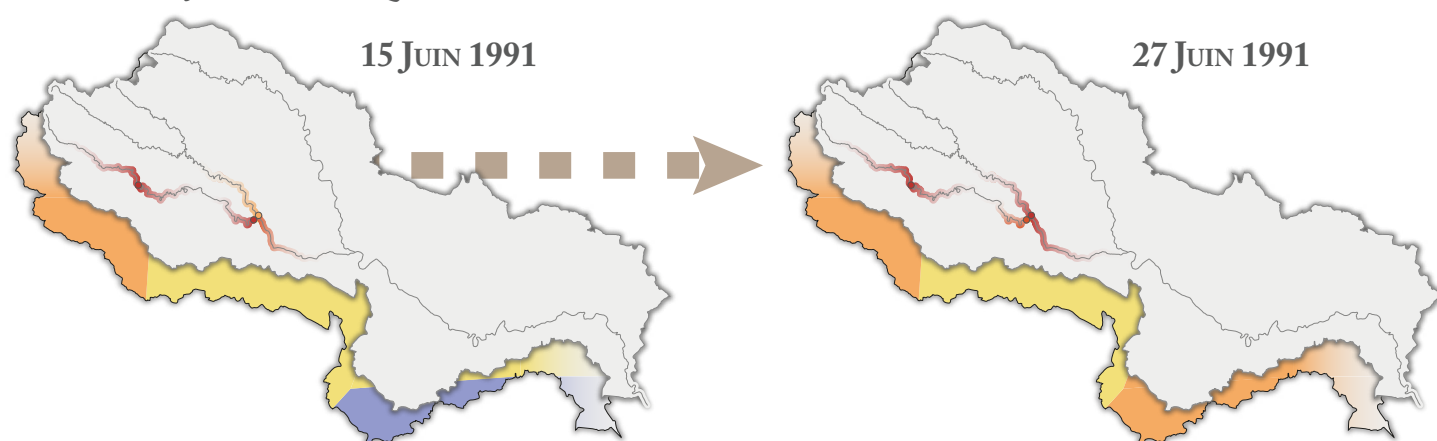
En d'autres termes, il s'agit d'observer comment se répartissent spatialement les états des indices volumiques calculés à chaque poste et dans quel état se trouve le forçage climatique lorsque l'état exceptionnel est atteint sur l'un des postes de débit.

Les dates sont choisies selon deux critères : il est nécessaire qu'au moins deux postes soient en état exceptionnel au cours d'une même année, et qu'un maximum de postes soit renseigné pour les

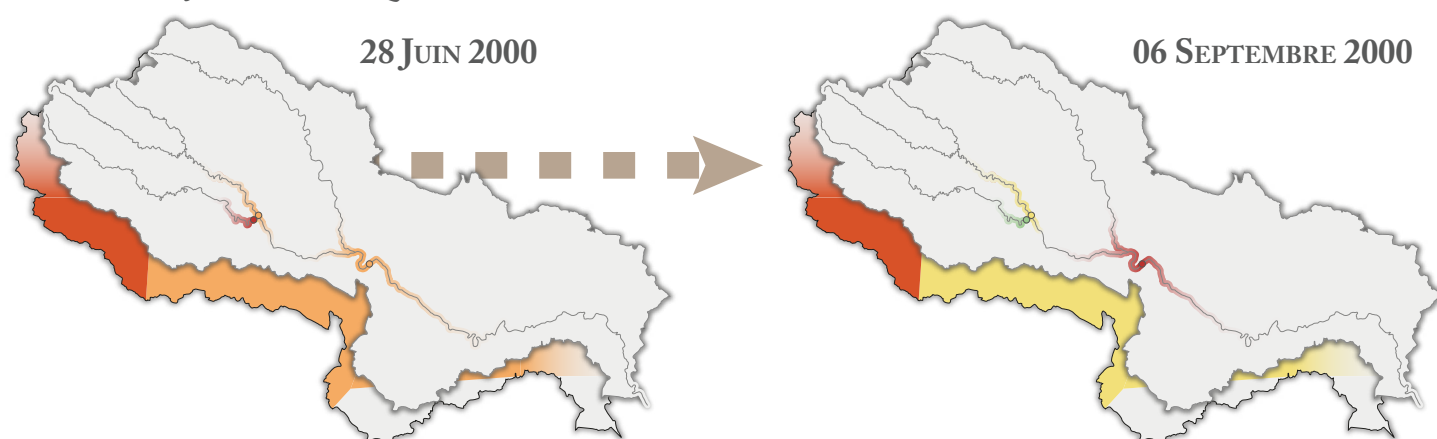
C36.2.1

EVOLUTION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DU VOLUME SUPERFICIEL ET DU FORÇAGE CLIMATIQUE:
IVJ SUPER-CRITIQUE À SANILHAC ET GÉNÉRARGUES

C36.2.2

EVOLUTION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DU VOLUME SUPERFICIEL ET DU FORÇAGE CLIMATIQUE:
IVJ SUPER-CRITIQUE À SAUMANE ET GÉNÉRARGUES

C36.2.3

EVOLUTION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DU VOLUME SUPERFICIEL ET DU FORÇAGE CLIMATIQUE:
IVJ SUPER-CRITIQUE À SAUMANE ET NERS

comparer. Cette dernière prérogative est toutefois limitée, puisque les postes ne se chevauchent que sur quelques années. Aussi, seuls trois postes peuvent être simultanément comparés.

9.3.2.1 Dates « clé » année 1970

Au 17 août, lorsque l'indice volumique affiche un état exceptionnel à Sanilhac, le forçage climatique à Uzès est lui aussi en situation exceptionnelle. Ailleurs, sur les linéaires amont, la situation est super-critique, même si le forçage climatique affiche également un état exceptionnel. À l'extrême amont, le Gardon à Saumane est sub-critique, probablement parce que l'IP0 à Valleraugue n'est « que » critique. Il y a de fait une bonne cohérence.

Au 12 septembre, lorsque l'indice volumique affiche un état exceptionnel à Sanilhac, la configuration sur les autres linéaires est la même qu'exposée précédemment. En revanche l'état du forçage climatique a changé. Sur Uzès et Nîmes, la situation est « seulement » critique. Un événement pluvieux est donc intervenu au cours des quinze jours précédents, sans toutefois avoir été suffisamment significatif pour réduire l'état de criticité du Gardon à Sanilhac. Une configuration identique a dû se présenter à Alès, puisque l'IP0 affiche un état normal tandis que l'indice volumique est super-critique.

Au 18 septembre, soit un peu moins d'une semaine après, le Gardon à Gènerargues a atteint l'état exceptionnel, tandis qu'ailleurs la situation s'est largement améliorée, voire revenue à la normale, tout comme le forçage climatique.

9.3.2.2 Dates « clé » année 1991

Au 15 juin, la situation du Gardon à Saumane et Corbès est exceptionnelle, et critique à Gènerargues. Pourtant, le forçage climatique est sub-critique et critique, à Alès et Valleraugue respectivement.

Cet écart est d'autant plus marqué, que moins de deux semaines plus tard, soit au 27 juin, le forçage climatique s'est maintenu, tandis que le Gardon à Gènerargues a atteint à son tour un état exceptionnel. À cette même date, le Gardon à Corbès est à l'inverse descendu en état en super-critique.

Ces écarts soulèvent un certain nombre d'hypothèses : sont-ils imputables à un facteur localement pesant ? Les seuils des indicateurs sont-ils mal ajustés ? Faut-il l'information climatique (considérer l'IP0 à $j-1$, $j-2$) ?

9.3.2.3 Dates « clé » année 2000

Au 28 juin, les états pris par l'indicateur relatif au volume superficiel sont concordants avec celui du forçage climatique, à l'exception du Gardon à Corbès, en état exceptionnel (impact du déficit cumulé depuis Saumane).

En septembre, la situation est cohérente en amont, tandis que Ners affiche un état exceptionnel sous forçage climatique sub-critique. Est-ce lié à l'effet retardé du décalage de la situation de l'amont vers l'aval, ou à l'impact d'un déficit à Alès ?

Si certaines incohérences ont été soulignées, elles demeurent néanmoins anecdotiques, et peuvent probablement être expliquées par des facteurs locaux ou cumulés : l'analyse ne tient pas compte de la qualité de la mesure, du contexte climatique antérieur, ni du contexte anthropique, etc. Les tendances générales observées sur l'indice volumique sont globalement en adéquation avec l'indice climatique. Les lacunes en termes de données (seulement trois postes renseignés) ne permettent pas de mieux appréhender la dynamique et de formuler ou exclure des hypothèses, qu'elles soient d'autres physiques ou liées aux méthodes de définition des indicateurs et des seuils.

9.3.3 L'état exceptionnel du volume superficiel *vs.* état du volume souterrain et de l'indice climatique

Pour compléter la démarche de validation par dates « clé », l'analyse est étendue à des dates pour lesquelles les niveaux souterrains sont enregistrés. Il s'agit alors de tenter de révéler un lien entre l'état exceptionnel des linéaires des cours d'eau et l'état des réservoirs souterrains associés, en plus de l'influence presque avérée des conditions atmosphériques (ENCADRÉ E36.3).

La sélection des dates est opérée sur la période 2005-2014 (les données piézométriques étant majoritairement disponibles que depuis 2005) suivant les mêmes critères que lors de l'analyse précédente, à savoir : un minimum de deux postes limnimétriques en situation exceptionnelle sur la même année, et un maximum de postes limnimétriques et piézométriques disponibles.

9.3.3.1 Dates « clé » année 2006

Comme précédemment, les données de précipitations n'ayant pas été collectées à Nîmes sur la période 1996 – 2013, les hauteurs précipitées à Uzès sont utilisées pour calculer l'IP0j et les seuils définis à Nîmes lui sont appliqués. Si la méthode est très simplificatrice, elle ne devrait toutefois pas impacter l'analyse, l'influence des précipitations enregistrées au poste d'Uzès étant supposées couvrir l'ensemble des postes de mesure des volumes superficiels et souterrains situés à l'aval du bassin.

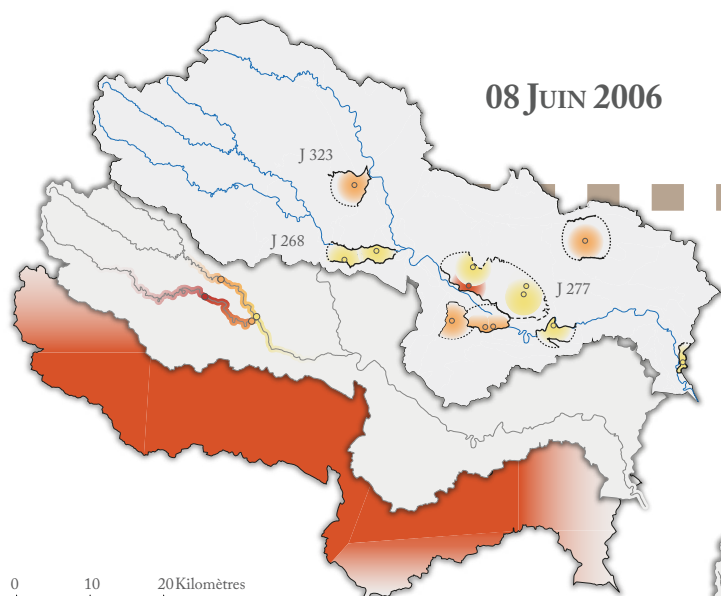
Au 08 juin 2006, le forçage climatique est super-critique sur l'ensemble du bassin. Les états pris par les indicateurs des volumes superficiels et souterrains sont légèrement inférieurs à la situation climatique évaluée. Certaines aquifères, comme les alluvions à Massillargues-Attuech et Cardet (amont), ainsi qu'à Montfrin (extrême aval), sont en état sub-critique, probablement plus inertiels. C'est également le cas d'une partie de la zone karstique, soit entre Castelnau-Valence et Bourdic. Partout ailleurs, l'état est critique. Les linéaires amont affichent eux aussi des états sub-critiques à exceptionnel. Par contre, le manque d'informations sur le linéaire aval à cette date ne permet pas de comparer le forçage climatique et l'état des indicateurs de volume superficiel et souterrain.

Au 19 juillet, les états pris par les indicateurs superficiels et souterrains sont sensiblement en adéquation avec la situation climatique. Cette dernière est retournée à une situation normale, voire

C36.3.1

EVOLUTION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DES VOLUMES SUPERFICIEL ET SOUTERRAIN ET DU
FORÇAGE CLIMATIQUE: IVJ EXCEPTIONNEL À CORBÈS ET ST JEAN DU GARD

08 JUIN 2006



19 JUILLET 2006

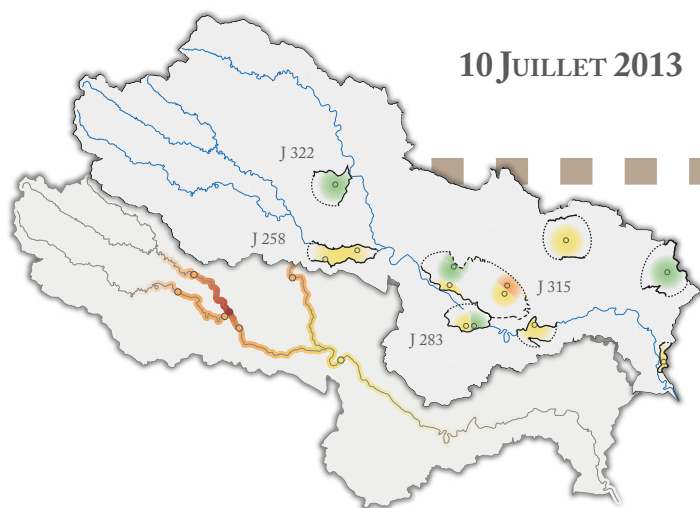


Etat humide Etat moyen Etat sub-critique
Etat critique Etat super-critique Etat exceptionnel

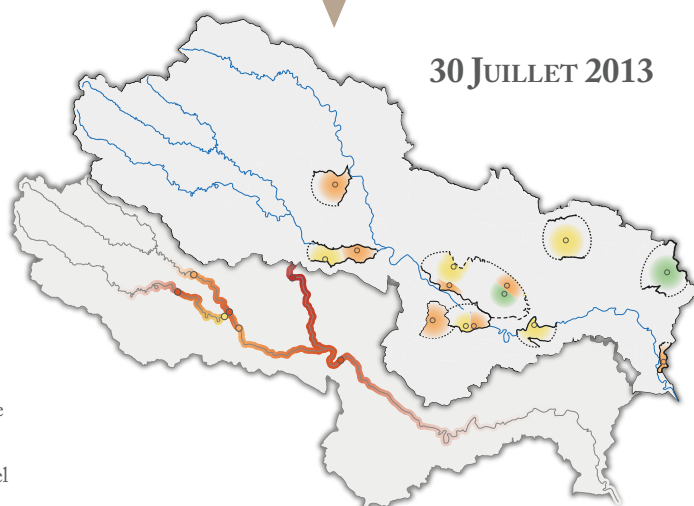
C36.3.2

EVOLUTION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DES VOLUMES SUPERFICIEL ET SOUTERRAIN : IVJ
EXCEPTIONNEL À GÉNÉRARGUES ET ALÈS

10 JUILLET 2013



30 JUILLET 2013



Etat humide Etat moyen Etat sub-critique
Etat critique Etat super-critique Etat exceptionnel

humide. Cela se traduit sur les linéaires par une situation normale du Gardon à Générargues. À saint Jean du Gard, le Gardon s'abaisse à un état critique, situation qui se dégrade et se décale vers Corbès, qui passe en état exceptionnel. Sur les aquifères, une large majorité des indicateurs affichent un état normal, excepté localement sur la zone karstique qui semblait inertielle au 8 juin. La situation est légèrement plus marquée sur les aquifères présents à l'amont du bassin (état sub-critique), ces derniers n'ayant probablement pas eu le temps de se recharger.

9.3.3.2 Dates « clé » année 2013

En 2013, aucune information climatique n'a été recueillie, donc seuls sont comparés les indicateurs relatifs aux volumes superficiels et souterrains.

Au 10 juillet, lorsque le Gardon à Générargues atteint l'état exceptionnel, l'ensemble des linéaires amont est en situation critique. La concordance globale entre les volumes superficiels et souterrains peut toutefois être établie, bien qu'à l'aval les informations sur le linéaire aval ne sont pas disponibles. En effet, l'état du Gardon à Ners semble sub-critique, tout comme les aquifères proches (entre normalité et état sub-critique). En amont, dans le secteur d'Anduze, l'état du linéaire est critique tandis que l'aquifère est sub-critique. Cela demeure assez cohérent, si le cours d'eau réagit plus rapidement que les aquifères plus profonds et inertiels (ici petite zone alluviale). Une configuration identique est observée sur le secteur d'Alès, où le karst affiche encore un état normal alors que le cours d'eau est critique.

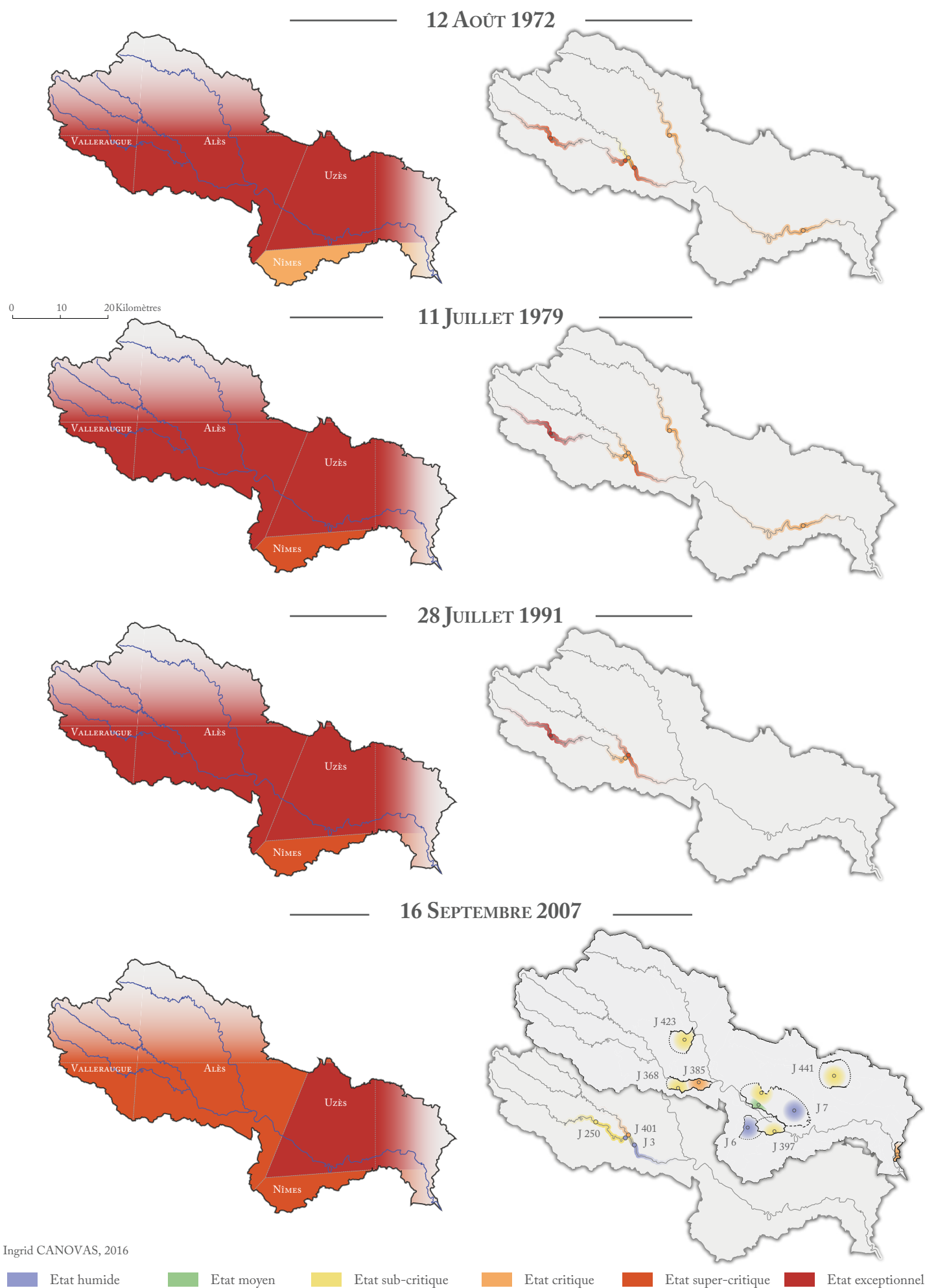
Au 30 juillet, une meilleure relation se présente, apparemment plus visible lorsque les états les plus sévères sont généralisés au bassin. Lorsque le Gardon à Alès est en situation exceptionnelle, l'ensemble des linéaires sont en situation critique voire super-critique, à l'exception du Gardon à Corbès qui présente un état sub-critique. Même le Gardon à Ners est en état super-critique, ce qui semble traduire une situation particulièrement tendue qui s'étendrait à l'ensemble du bassin. En effet, les nappes sont aussi entre sub-critique et critique à deux exceptions près.

9.3.4 L'état exceptionnel des indices pluviométriques *vs.* l'état des volumes superficiels et souterrains

Pour conclure la démarche de validation, la dynamique des volumes superficiels et souterrains est évaluée lorsque l'ensemble du bassin est soumis à un forçage climatique exceptionnel (ENCADRÉ E36.4).

L'état pris par l'indice volumique sur l'ensemble du cours d'eau, aux trois premières dates (1972, 1979 et 1991), s'étalonne entre état critique et état exceptionnel, ce qui confirmerait à nouveau la relation (à présent indiscutable) entre le forçage climatique synthétisé par l'IP0 et l'état du volume superficiel, traduit par l'indice volumique.

Pour la date retenue en 2007, pour pouvoir confronter les volumes souterrains, seul l'IP0 d'Uzès est en état exceptionnel, la situation climatique étant super-critique partout ailleurs. Il apparaît toutefois très compliqué de valider sans discuter les relations entre les indicateurs, la majorité des postes

EVOLUTION DE L'ÉTAT DE CRITICITÉ DU VOLUME SUPERFICIEL : **IP0** EXCEPTIONNEL À
VALLERAUGUE, ALÈS ET UZÈS

affichant des états de début de cycle (l'étiage ayant été atteint presque partout). Néanmoins, une certaine logique peut être soulignée puisque les postes sur lesquels les cycles sont les plus avancés sont en situation sub-critique à critique, tandis que les débuts de cycle sont encore en situation « humide ».

L'analyse des dates « clé », affichant un état exceptionnel du cours d'eau, semble apporter une meilleure compréhension et validation des indicateurs, qui semblent *a priori* en adéquation. Il y aurait tout de même des ajustements à faire pour valider certaines hypothèses et effacer certaines incertitudes ou situations anecdotiques et incohérentes.

En effet, outre les incertitudes liées à la qualité de la donnée et aux méthodes d'extrapolation et de spatialisation de l'information climatique et hydrologique, la discordance entre les états pris à certaines dates peut s'expliquer par l'action de forçages plus locaux (dont, très certainement, les prélèvements anthropiques).

De plus, l'information relative au volume apporté par les pluies lors des épisodes qui coupent les périodes « sans pluie utile » pourrait s'avérer utile, pour pondérer l'influence des durées « sans pluie utile » qui succèdent aux épisodes pluvieux.

Enfin, il est à rappeler que les états sont aussi déterminés par le ième jour du cycle. Ainsi, un état critique observé en un point est probablement plus ou moins critique sur un autre proche, si ce dernier est moins ou plus avancé dans son cycle. Il faut donc bien repenser l'analyse et relativiser les états pris en fonction du jour du cycle correspondant, qui détermine aussi le niveau de tension et qui peut parfois expliquer les différences notables entre deux postes proches notamment souterrains.

Conclusion — Les étapes de validation des indicateurs révèlent des résultats plutôt satisfaisants, qui laissent néanmoins suggérer l'existence de facteurs supplémentaires intervenant dans l'état de criticité des basses eaux. Ces facteurs, supposés plus locaux (tels que les prélèvements anthropiques), expliqueraient les écarts observés et seraient manifestement plus pesants durant la période estivale.

La confrontation des états pris par les indicateurs issus des cycles hydrologiques et des récessions a souligné de petites différences dans l'évaluation du phénomène, ce qui montre très clairement que l'état de la situation est relatif, suivant que l'analyse est menée de sorte à cadrer avec une réalité hydrologique plus globale (découpage en cycles hydrologiques), ou de sorte à établir le bilan d'une situation au regard d'une période généralement plus critique (la récession).

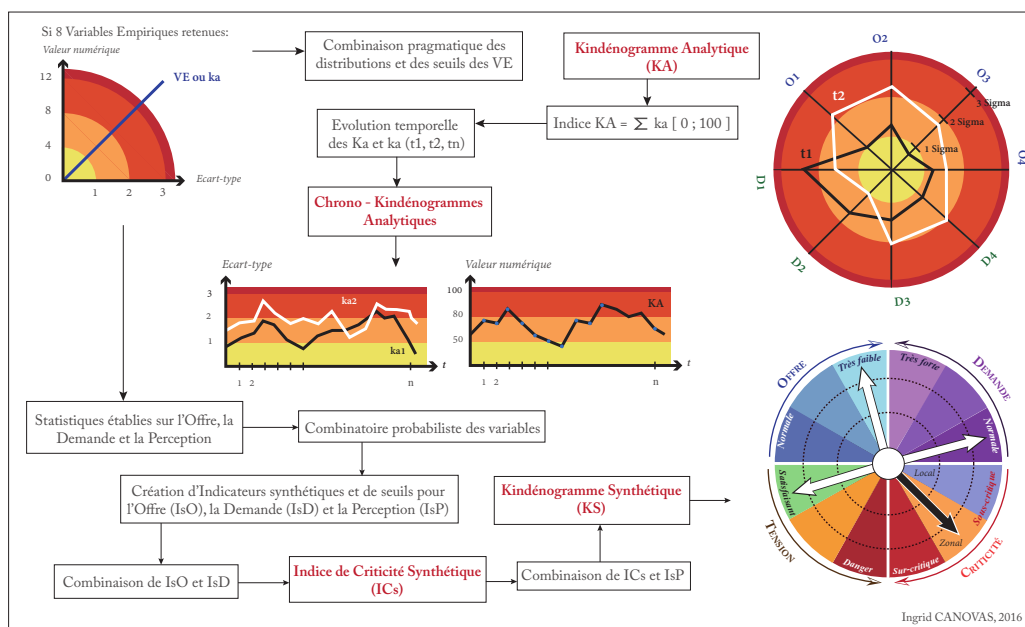
De plus, l'analyse des indicateurs a révélé le manque d'informations (1) sur le réseau hydrographique et sur les entités hydrogéologiques et (2) supplémentaires pour renseigner correctement et fidèlement l'état de tension global (*e.g.* cumul des pluies antérieures, apports entre deux phases sèches, impact des prélèvements). Il faut donc réfléchir au moyen de les intégrer pour obtenir un indice plus pertinent, qui serait issu de la combinatoire des indicateurs, et qui pourrait être envisagé à l'échelle globale comme locale (voir CHAPITRE 10).

Enfin, plus fondamentalement, il semble y avoir un problème de seuils, de décalage des zones sub-critique, critique, etc. Il faudrait que l'état surcritique soit plus rare encore. Il apparaît en effet

trop fréquemment, suivant les seuils retenus ici. Par ailleurs, un problème d'instabilité des valeurs des indices volumiques (plus forte pour les débits que pour la piézométrie) a été mis en évidence, et pourrait sans doute être résolu en changeant le pas de temps, en passant d'un jour (deux dans le calcul) à deux (trois dans le calcul). Une autre solution consisterait à lisser les valeurs journalières avec une valeur modale, de 3 jours par exemple (voir CHAPITRE 10).

Il s'agit dès lors de réfléchir à ces modalités d'ajustement, essentielles pour concevoir une mise en œuvre opérationnelle de la méthode.

MISE EN ŒUVRE OPÉRATIONNELLE DE LA MÉTHODE : MODALITÉS TECHNIQUES ET RÉGLAGES MÉTHODOLOGIQUES



10.1	Les prérequis en matière d'informations	343
10.1.1	Le réseau d'observation des basses eaux	343
10.1.2	Les informations relatives aux pratiques et usages anthropiques de l'eau	343
10.1.3	La perception sociale	345
10.2	Détection et analyse de la phase précoce des basses eaux sur les Gardons : atlas multiscalaire des états de criticité	345
10.2.1	Approches graphiques : le chrono-Kindénogramme et le Kindénogramme Analytique (KA)	346
10.2.2	Le Kindénogramme Analytique, outil d'analyse de la phase d'amorce et de l'évolution du phénomène de basses eaux	355
10.2.3	Approche spatiale : Atlas carto-graphique et analytique	359
10.3	Vers un outil opérationnel pour la définition d'un état de tension synthétique	359
10.3.1	Définition d'un indice de criticité synthétique (ICs)	363
10.3.2	Le Kindénogramme Synthétique (KS) pour la description du phénomène	367
10.4	Automatisation et « transposabilité » de la méthode	368

La démarche exploratoire menée jusqu'ici a conduit à l'élaboration de trois indicateurs hydro-climatiques pour caractériser un état de basses eaux sur le bassin des Gardons. La procédure de validation a conclu à des résultats encourageants, et conduit à l'idée que des facteurs supplémentaires contribuent vraisemblablement à un état de basses eaux, plus marqué à certains moments. Ces facteurs sont supposés plus locaux, ce qui expliquerait les écarts observés, à certaines dates et ponctuellement. Parmi eux, il y a probablement les prélèvements réalisés pour diverses activités : AEP, irrigation, etc.

Par ailleurs, la définition des basses eaux ne se limite pas à appréhender le phénomène de manière strictement quantitative, mais aussi qualitative. Un état de basses eaux peut s'avérer problématique si la qualité est dégradée et que la ressource ne peut donc être utilisée, et ce, bien qu'elle soit disponible en quantité suffisante. C'est donc bien l'ensemble des variables quantitatives et qualitatives qui devraient définir à terme l'indice de criticité.

De surcroît, en intégrant la perception, un état de tension peut être déterminé, comme évoqué précédemment à l'issue de la comparaison entre les états calculés et les niveaux d'alerte, en confrontant l'indice de criticité et l'indice de perception. Ainsi, selon que la situation est sous-évaluée ou surestimée, le niveau de tension sera respectivement plus ou moins critique. L'état de tension correspondrait ici à une mesure de l'écart entre l'état perçu et l'état calculé (*i.e.* le degré d'adéquation). Il y a toutefois deux cas de figure :

- (1) Lorsque l'état perçu est inférieur à l'état calculé, cet écart peut induire des conséquences dramatiques si la tension est très sous-estimée ;
- (2) Lorsque l'état perçu est supérieur à un état calculé, une éventuelle réaction inappropriée n'entraînera que des gaspillages.

La question qui se pose alors concerne les modalités du croisement de l'ensemble de ces informations, de sorte à rendre l'approche opérationnelle.

Au préalable, une discussion doit nécessairement être menée sur la question des données indispensables pour l'appréhension du phénomène, tant pour la détection que pour le suivi de la montée de la situation dans les états de criticité.

10.1 Les prérequis en matière d'informations

Dans une perspective de mise en œuvre opérationnelle de l'approche développée dans ce travail, il faut, dans un premier temps, déterminer le niveau minimal d'informations (de données) nécessaires pour mener l'analyse des basses eaux. Cela revient, en particulier, à déterminer les postes de mesure fondamentaux, pour chaque échelle d'observation.

10.1.1 Le réseau d'observation des basses eaux

Lors du traitement statistique des données afférentes à chaque poste de mesure, l'analyse a révélé que le recours à des postes de mesure supplémentaires aurait été nécessaire pour mener une analyse exhaustive et localement pertinente. Cependant, pour une mise en application de la méthode (mise en œuvre opérationnelle), seuls quelques postes s'avèrent indispensables. Sur la liste des postes en activité, il est suggéré de retenir :

- 4 ou 5 stations piézométriques pour le suivi du « volume souterrain » : un ou deux postes sur le karst aval et un sur le karst amont, et un sur la nappe alluviale amont et un sur la nappe alluviale à l'aval.
- 3 stations pluviométriques pour le suivi du « forçage climatique » : le poste de Valleraugue pour la partie cévenole, le poste d'Alès pour le pied des Cévennes et celui d'Uzès pour la partie aval.
- 6 à 8 stations limnimétriques pour le suivi de l'état du « volume superficiel », soit aux extrémités de chaque linéaire : Mialet, Saint Jean du Gard, Anduze, Alès, Ners et Remoulins, par exemple. Il serait par ailleurs intéressant de bénéficier de mesures en amont du Gardon d'Alès, à hauteur de Sainte Cécile d'Andorge, et en amont des pertes karstiques, un peu avant l'entrée des gorges du Gardon.

Sur ce dernier point, et au même titre que le réseau de surveillance de l'Observatoire national des étiages (ONDE), coordonné par l'ONEMA, les divers observateurs des gorges du Gardon (Syndicat des Gorges à Russan, etc.) pourraient être mobilisés pour apprécier la situation particulière de l'état d'assec entre Dions-Russan et Sanilhac-Poulx, laquelle correspond à une situation normale en période estivale. Ce type d'observation (appréciations visuelles) assez simple pourrait en effet apporter une information très utile pour déterminer la sévérité de la situation.

10.1.2 Les informations relatives aux pratiques et usages anthropiques de l'eau

Pour mener une analyse plus locale, des paramètres plus spécifiques, qui ont un sens localement, peuvent être introduits : cela concerne des informations anthropiques (*e.g.* prélèvements en eau, etc.) et des paramètres qualitatifs (*e.g.* eau de baignade, eau de consommation, etc.).

En effet, la qualité de l'eau est un problème essentiellement local, mais dont l'impact peut toutefois être nuancé, en fonction des charges et du type de pollution. À titre d'exemple, un problème de pollution ponctuelle peut être étendu à une partie du linéaire aval, mais ne peut être généralisé au bassin versant. Il en est de même pour la qualité des eaux de baignade, qui n'a de sens *a priori* qu'au site de baignade : un mauvais état décelé en un point ne peut être traduit par une interdiction de baignade sur la totalité du cours d'eau. Toutefois, si certaines charges sont effectivement très locales et se dissipent vite, d'autres sont plus résilientes. Ainsi, selon le type et le niveau de pollution, la représentativité de l'information qualitative peut être étendue. En ce sens, si localement, la situation est (très) satisfaisante, elle le sera également sur une bonne partie du linéaire amont et, selon toute vraisemblance sur une partie du linéaire aval, tant qu'il n'y a pas d'apports (*i.e.* rejets) supplémentaires.

Avant de se pencher plus avant sur la façon dont ces spécificités locales seront ensuite globalisées au travers d'un indice plus synthétique, il faut d'abord considérer un problème majeur, qui est celui des données pouvant renseigner ces variables localement pertinentes, et essentielles pour déterminer un état de tension sur la ressource en eau.

10.1.2.1 La qualité de l'eau

Les indices réglementaires de qualité de l'eau souterraine et superficielle (*e.g.* chimique, biologique (IBGN), etc.)), sont définis à une fréquence annuelle. Ils sont néanmoins assez bien répartis sur le bassin, ce qui accroît leur potentiel d'intégration dans l'analyse. Il serait toutefois utile qu'ils soient mis à jour à une fréquence plus élevée.

Idéalement, il faudrait recourir aux données issues des mesures brutes des paramètres physico-chimiques et bactériologiques suivis, à des pas de temps plus réduits (bimensuel ou mensuel), à partir desquelles, la demande de qualité pourrait être établie par un écart aux normes sur certains critères : la dureté de l'eau, par exemple n'est pas fondamentalement problématique, tandis que la présence de métaux lourds est déjà plus dangereuse pour les consommations. Il pourrait en être de même pour les critères biologiques pour les besoins des milieux et espèces aquatiques, etc.

De même, la qualité de l'eau de baignade pourrait être renseignée par un indice unique variant au long de la saison balnéaire. Il faudrait pour cela avoir accès aux données en temps réel des mesures, théoriquement effectuées tous les quinze jours, afin de les intégrer dans l'analyse en temps voulu.

10.1.2.2 Les prélèvements en eau

Les prélèvements en eau constituent une information indispensable, pour expliquer les écarts observés entre les états pris sur un même linéaire ou une même entité hydrogéologique à une même date (voir CHAPITRE 9). Par ailleurs, en déterminant le degré de pression qu'ils exercent sur la ressource, il serait alors possible de mieux anticiper l'évolution de l'état global de la situation, tout au long de la phase de veille et de suivi du phénomène. Par exemple, si les prélèvements augmentent tandis que la ressource diminue, une évolution de la situation vers des niveaux de criticité supérieurs

est à prévoir. Au-delà de la prévision, cette information peut contribuer à déclencher la mise en place de mesures de limitation et de restriction, basées sur des évaluations quantifiées, à la fois de prélèvements et de volumes disponibles. Cela contribuerait peut-être à une meilleure acceptation sociale des mesures.

Dans cette perspective, des évaluations prospectives pourraient être faites afin de déterminer les demandes de l'irrigation, de l'industrie, de l'évolution des prélèvements de l'AEF durant l'année (et la part des prélèvements en période estivale), à défaut de données issues de la comptabilisation des volumes prélevés en sortie de forage (ce qui serait idéal, au pas de temps au moins mensuel).

10.1.3 La perception sociale

La question de la perception sociale de l'état de basses eaux est encore plus délicate. Il est envisagé ici de la décliner sur deux volets : celle des autorités publiques et celle des populations (usagers de l'eau).

Pour la première, le recours au niveau d'alerte activé (via les arrêtés-cadre sécheresse) a été adopté.

Le ressenti des populations, quant à lui, pourrait être appréhendé (1) par le biais d'un référent, d'une personne ressource capable de traduire les préoccupations des usagers (un représentant de la Fédération de pêche, un agriculteur, un gérant de camping, d'une structure de loisirs nautiques, etc.) ici ou là ; (2) par le biais de campagnes d'enquêtes menées directement auprès des usagers de la ressource (*i.e.* population touristique, agriculteurs, population communale). Cette dernière démarche nécessiterait toutefois de penser, en amont, les informations à recueillir, de sorte à obtenir des données homogènes, c'est-à-dire simples à traiter et à comparer par la suite. Cela sous-tend, par conséquent, tout un travail de réflexion sur l'élaboration d'un questionnaire adapté et un minimum guidé (*i.e.* questions fermées, remarques particulières formulées par mots-clé).

Cette démarche doit d'ailleurs être mise en œuvre dans un projet de recherche (HydroPop) en cours de développement en Cévennes, dans le cadre d'un financement de l'Agence de l'eau RMC et de la ZABR.

10.2 Détection et analyse de la phase précoce des basses eaux sur les Gardons : atlas multiscalair des états de criticité

Au vu des exigences imposées par ce travail, la question des indicateurs anthropiques, et relatifs à la qualité de la ressource, ne peut être traitée correctement, ni de manière aussi précise que les indicateurs hydroclimatiques (Iv, IHN, et IP0). Ils sont toutefois intégrés à l'analyse finale, et renseignés par les valeurs annuelles disponibles dans les diverses bases de données (Portail ADES, ARS, etc.), dans le seul dessein d'illustrer la démarche globale. Par ailleurs, considérées comme localement influentes, ces variables seront abordées à une résolution plus grande (*i.e.* celle du sous-bassin).

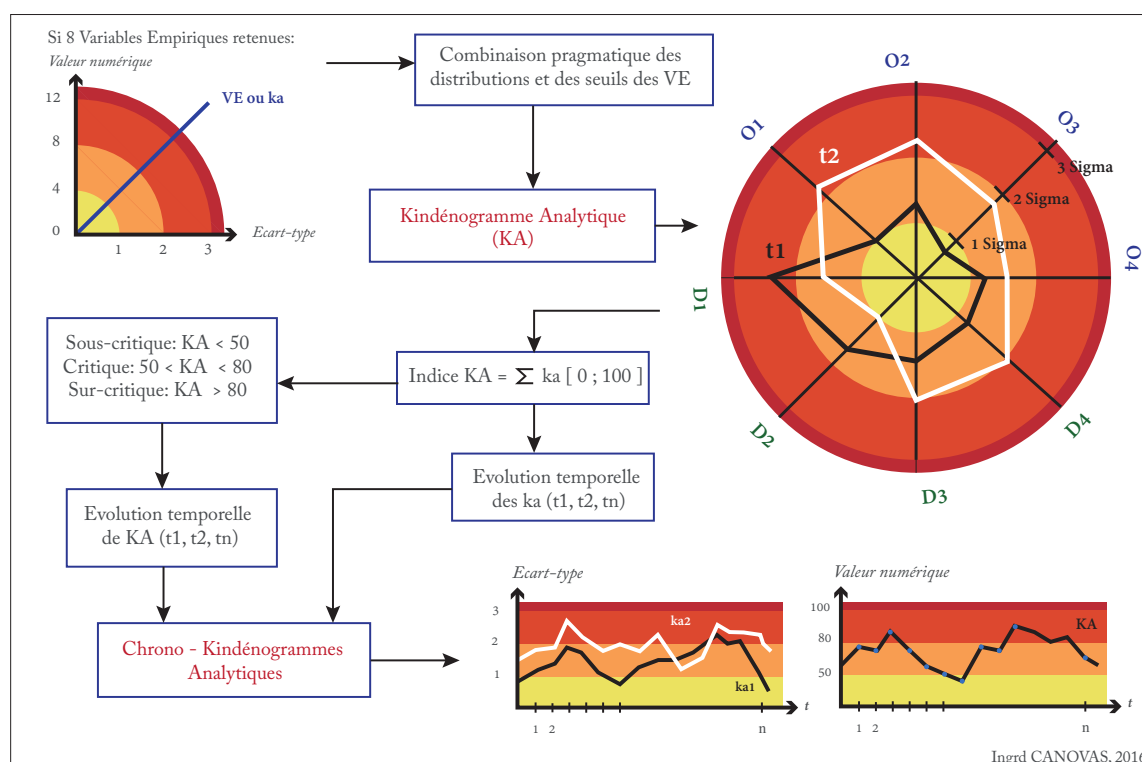


FIGURE 10.1 : DE LA DÉFINITION DES SEUILS À L'ANALYSE CHRONOLOGIQUE ET COMBINÉE DES ÉTATS DE CRITICITÉ

À partir de l'ensemble de ces informations, en supposant que la totalité des indicateurs relatifs aux variables considérées comme essentielles ait pu être élaborée, leur représentation graphique et cartographique peut être envisagée, de manière simultanée. Cela conduit à une synthèse des états individuels des indicateurs à différentes échelles spatiales, et à différentes temporalités, sous la forme d'un atlas vraisemblablement numérique.

Pour y parvenir, il est préalablement nécessaire de s'interroger sur la date à partir de laquelle un point de situation peut être fait, afin d'anticiper le phénomène de basses eaux. En d'autres termes, cela revient à se demander à partir de quel moment (1^{er} jour de la phase de décroissance, 1^{er} juin, etc.) ou à partir de quel niveau (état normal, état sub-critique, etc.) le suivi de la situation doit être initié, et surtout, comment détecter cette phase d'amorce du phénomène.

Le recours au chrono-kindénogramme et au Kindénogramme Analytique (KA) est ici proposé : le premier, dans une perspective de détection et, le second, en complément, pour la description et le suivi de la situation à différents instants.

10.2.1 Approches graphiques : le chrono-Kindénogramme et le Kindénogramme Analytique (KA)

La description statistique des variables retenues, pour un territoire, peut être présentée de façon comparative et être appréciée visuellement au travers d'un Kindénogramme Analytique unique (KA), lequel traduit :

- L'état de chaque territoire à un instant t , en affichant clairement la (les) variable(s) problématique(s), dont l'état est critique ;
- L'état global de la situation à ce même instant, qui est d'autant plus tendu que le polygone formé est déployé.

Il est également possible de comparer les situations en fin de cycle hydrologique (ou à tout autre moment) sur plusieurs années pour tenter d'apprécier si la situation se détériore ou s'améliore (chrono-kindénogramme).

10.2.1.1 Le chrono-kindénogramme comme support d'aide à la veille hydroclimatique

L'analyse des indicateurs traduisant l'état des volumes (Ivj et IHnj) a révélé une forte variabilité de leurs états, lesquels changent presque quotidiennement pour les Ivj. Ces indicateurs ne sont donc pas suffisamment stables pour être envisagés tels quels dans la mise en œuvre d'un système opérationnel.

Il convient alors de procéder à des modulations (lissage) de l'information, le recours aux valeurs journalières n'étant pas totalement satisfaisant. À cela s'ajoute la question de l'indicateur à prendre en considération pour déterminer la phase précoce, c'est-à-dire à définir l'indicateur (ou les indicateurs ?) d'alerte du phénomène.

Pour illustrer cette réflexion, un premier essai de mise en application de la démarche est initié sur le bassin des Gardons. L'objectif est ici d'appréhender le phénomène de basses eaux au cours de l'année 2012. Cette dernière est retenue pour les raisons suivantes :

- Plusieurs niveaux d'alerte ont été activés, ce qui permet de comparer les résultats à la perception de la situation par les autorités publiques ;
- Les variables essentielles peuvent être (même partiellement) renseignées ;
- Un nombre maximal de postes étaient en service.

Dans un premier temps, pour modérer la trop grande variabilité des états des indicateurs hydrologiques, les valeurs des Ivj et IHnj sont lissées sur 3, 6 et 9 jours, à partir des séries issues du découpage des cycles hydrologiques. Les nouvelles séries sont ainsi obtenues en calculant les moyennes glissantes des valeurs sur 3, 6 et 9 jours, le résultat étant introduit au niveau du dernier jour (la valeur attribuée au jour 12 par exemple, et lissée sur 9 jours, correspond à la moyenne des jours 4 à 12). Les seuils, initialement définis sur l'ajustement statistique des valeurs journalières, sont conservés.

Les résultats sont ensuite comparés afin d'identifier l'intervalle qui semble le mieux stabiliser l'information, pour une mise en œuvre opérationnelle (ENCADRÉ 37.1).

Pour davantage de rigueur, la méthode pourrait donc être complétée en procédant à un nouvel ajustement (nouvelle analyse fréquentielle) des valeurs moyennées, pour chaque pas de temps considéré.

La démarche aurait également pu être conduite sur les indicateurs issus des récessions. Néanmoins, les phases de récession sont observées certaines années au 15 juin, ce qui est sans doute trop

tardif. En effet, si cette phase fait suite à un printemps très peu humide, des situations précoces peuvent certainement apparaître. En conséquence, ces états potentiellement problématiques pourraient échapper à l'analyse, ce qui ne s'accorde pas avec les objectifs d'une démarche centrée sur la détection et l'anticipation.

Au vu des résultats obtenus sur le traitement de l'année calendaire de 2012, une meilleure stabilité des états pris par les indicateurs hydrologiques (Ivj et IHnj) est observée sur les valeurs moyennées sur 9 jours. Dans le détail, en augmentant le nombre de jours pour le calcul des valeurs moyennes des indices volumiques, les situations super-critiques (mais ponctuelles) observées en début d'année s'effacent. Les états se rapportant à la période estivale, en revanche, sont toujours représentés au poste d'Anduze, ce qui n'est pas le cas au poste d'Alès, où ils ont également été lissés. Les situations absorbées (*i.e.* ramenées au niveau inférieur) correspondraient donc à des situations certes plus extrêmes, mais relativement anecdotiques (apparition sur une ou deux journées). La sévérité de ces états se retrouve toutefois dans le niveau inférieur, dont la durée est alors étendue par l'intégration de ces valeurs extrêmes. Cela pourrait alors conduire à une situation problématique. L'information n'est donc pas perdue, mais légèrement modifiée, sans que la situation globale soit changée.

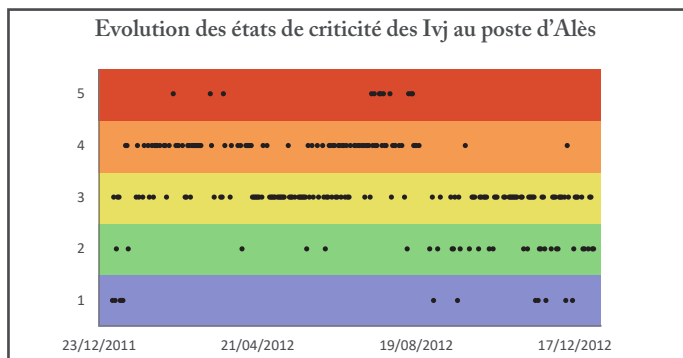
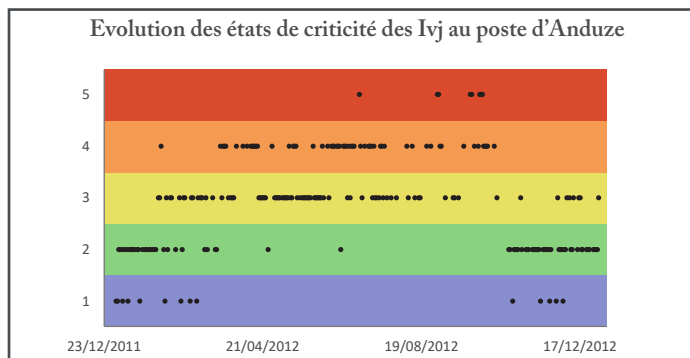
Ces constats s'observent également pour les « sauts » humides, également très ponctuels, donc peu représentatifs de l'état du système, manifestement plus proche de la normalité durant les périodes où sont observés ces changements.

De surcroît, l'augmentation des durées à partir desquelles sont effectuées les moyennes des Ivj, entrainerait une structuration plus nette et logique des états pris par l'indicateur au cours de l'année 2012 : une partie de la période automnale et hivernale est caractérisée par l'état humide, une partie de la période automnale et printanière est caractérisée par un état sub-critique, et la période couvrant la fin de l'hiver et le début du printemps, ainsi que la période estivale sont caractérisées par l'état critique.

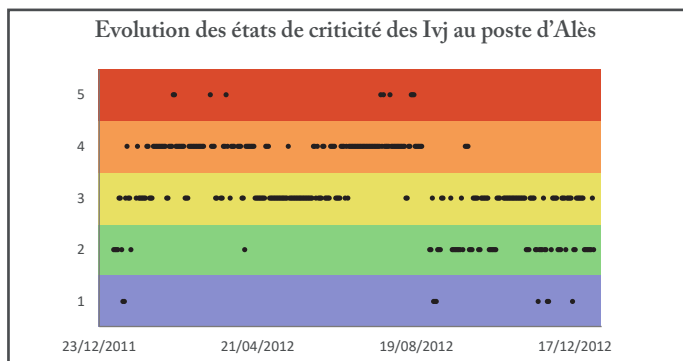
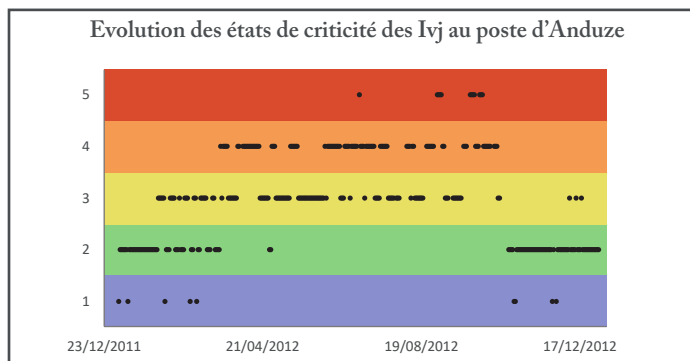
Le lissage de l'information véhiculée par l'Ivj apparaît très probant. Toutefois, il n'est pas envisagé d'étendre la moyenne au-delà de 9 jours. Tout d'abord, parce qu'au-delà d'une dizaine de jours, l'information pourrait commencer à perdre du sens, notamment pour assurer la veille et le suivi du phénomène (même s'il n'est pas caractérisé par une cinétique importante). Ensuite, parce que les moyennes à 6 jours offrent déjà une stabilisation suffisante pour être exploitées à des fins opérationnelles. Le recours aux moyennes à 6 ou 9 jours sera par conséquent à adapter en fonction de la résolution optimale décelée pour l'IHnj.

Les valeurs moyennées caractérisant l'état des aquifères présentent des résultats assez similaires à ceux observés sur l'Ivj. Sur la nappe alluviale, à Massillargues-Attuech, une meilleure stabilité est constatée avec l'augmentation de la durée prise en compte pour le calcul de la moyenne (peut-être même meilleure à 6 jours). Les valeurs isolées extrêmes (sèches comme humides) sont résorbées, mais certains états exceptionnels sont maintenus. Cela porte à croire qu'ils sont atteints sur plusieurs jours consécutifs, ce qui n'a plus rien d'anecdotique. Mais pour autant, ces états ne sont pas encore suffisamment représentés pour constituer un véritable palier. Le karst à la Grand Combe reste

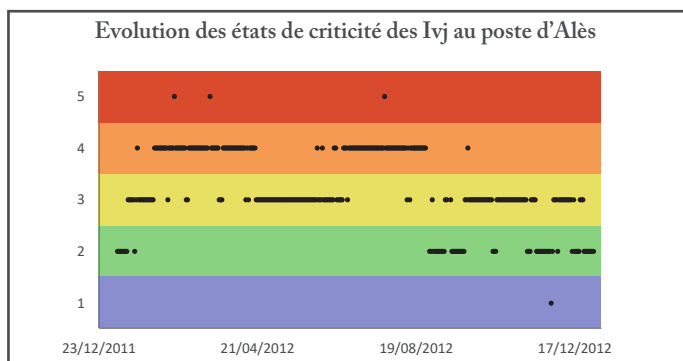
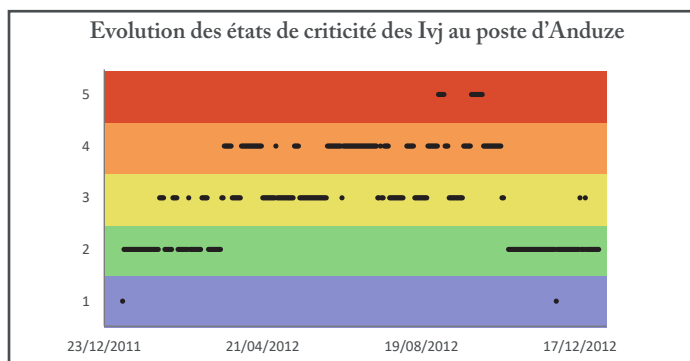
G37.1.1 VARIABILITÉ DES ÉTATS DE CRITICITÉ PRIS PAR LES Ivj À ANDUZE ET ALÈS - ANNÉE 2012



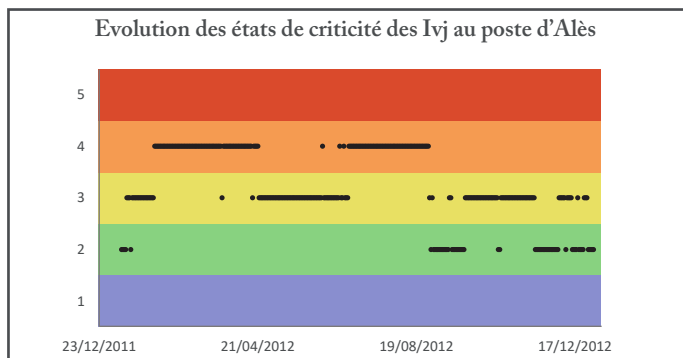
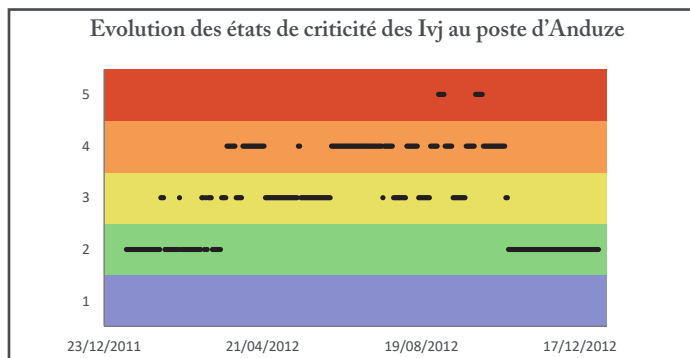
G37.1.2 VARIABILITÉ DES ÉTATS DE CRITICITÉ PRIS PAR LES Ivj MOYENNÉS SUR 3 JOURS À ANDUZE ET ALÈS - ANNÉE 2012

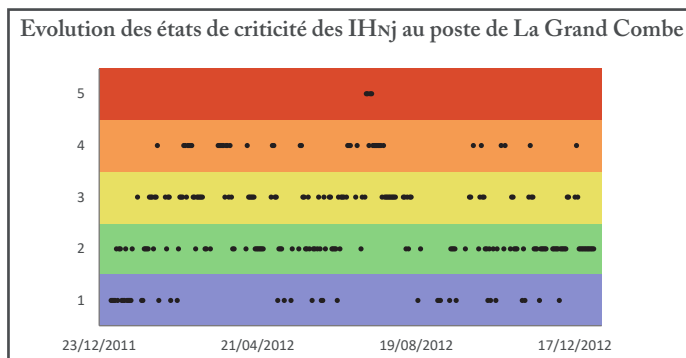
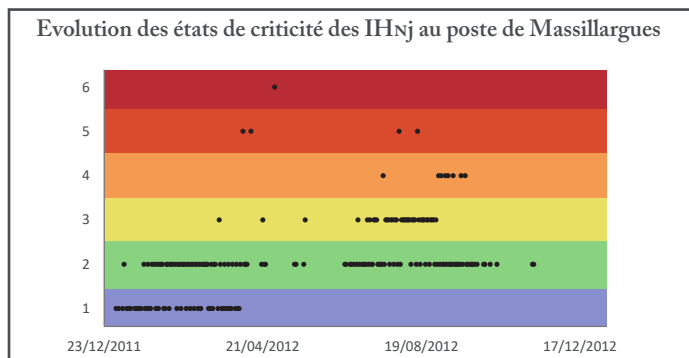
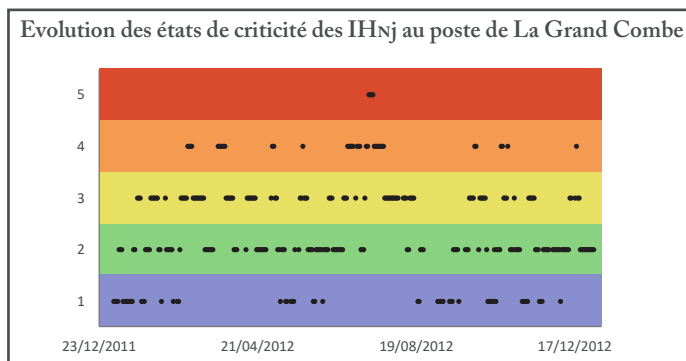
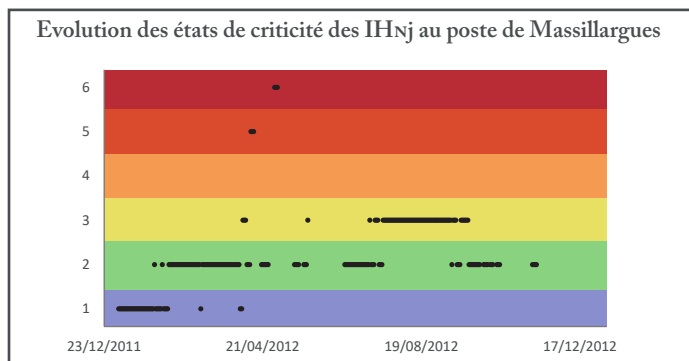
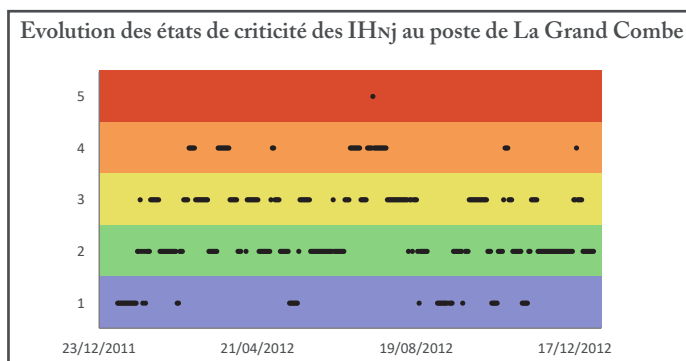
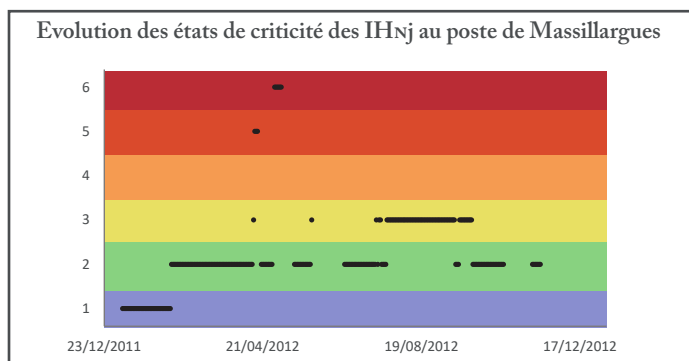
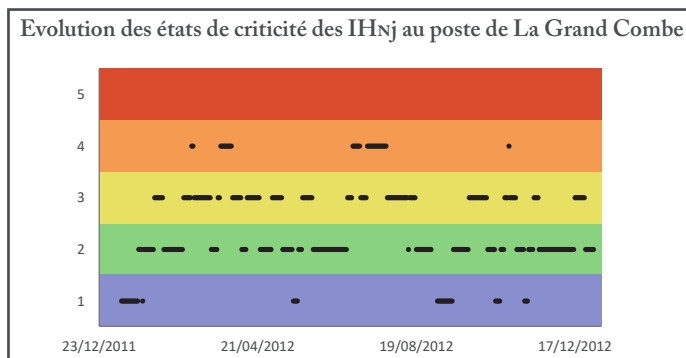
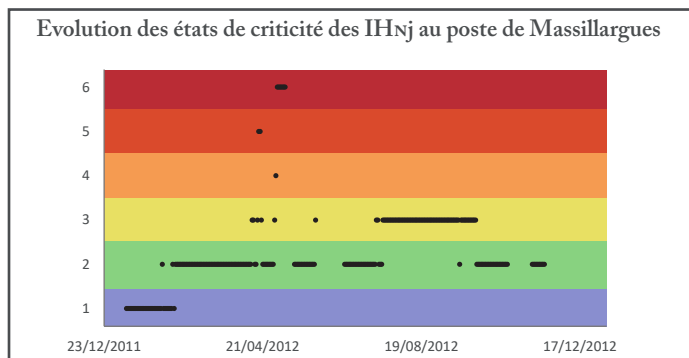


G37.1.3 VARIABILITÉ DES ÉTATS DE CRITICITÉ PRIS PAR LES Ivj MOYENNÉS SUR 6 JOURS À ANDUZE ET ALÈS - ANNÉE 2012



G37.1.4 VARIABILITÉ DES ÉTATS DE CRITICITÉ PRIS PAR LES Ivj MOYENNÉS SUR 9 JOURS À ANDUZE ET ALÈS - ANNÉE 2012



G37.2.1 VARIABILITÉ DES ÉTATS DE CRITICITÉ PRIS PAR LES IHnj À LA GRAND COMBE ET
MASSILLARGUES - ANNÉE 2012G37.2.2 VARIABILITÉ DES ÉTATS DE CRITICITÉ PRIS PAR LES IHnj MOYENNÉS SUR 3 JOURS À LA GRAND
COMBE ET MASSILLARGUES - ANNÉE 2012G37.2.3 VARIABILITÉ DES ÉTATS DE CRITICITÉ PRIS PAR LES IHnj MOYENNÉS SUR 6 JOURS À LA GRAND
COMBE ET MASSILLARGUES - ANNÉE 2012G37.2.4 VARIABILITÉ DES ÉTATS DE CRITICITÉ PRIS PAR LES IHnj MOYENNÉS SUR 9 JOURS À LA GRAND
COMBE ET MASSILLARGUES - ANNÉE 2012

quant à lui très instable, malgré une amélioration de la stabilité de l'information avec l'augmentation du nombre de jours considéré pour le calcul des valeurs moyennes (aucune stabilité observée à 12 jours non plus, pas de temps qui est sans doute déjà trop important pour un suivi opérationnel du phénomène).

Cela étant, la structuration des états intra-annuels des aquifères, révélée par les valeurs moyennées, indique nettement un état global moins critique que pour les volumes superficiels. Cela suit donc la logique hydrologique selon laquelle les aquifères sont généralement plus inertiels que les cours d'eau. Ainsi, la période la plus sévère correspond à la période estivale, laquelle est, en 2012, sub-critique à Massillargues-Attuech (aquifère alluvial) et sub-critique à critique à La Grand Combe (aquifère karstique).

Globalement, ces moyennes « abaissent » l'état de criticité d'un niveau environ et regroupe par ailleurs les valeurs de criticité par séquences et par niveau de criticité. Cela conduit à penser à un dénombrement par niveau qui serait l'homologue d'une persistance du phénomène à un niveau x .

À partir de ces nouvelles modalités (*i.e.* les états moyennés et stabilisés des variables hydrologiques), il s'agit (1) d'évaluer le positionnement des états des aquifères, du forçage climatique, et éventuellement des cours d'eau sur l'échelle de criticité (entre état humide et exceptionnel) avant la période estivale, afin (2) de déterminer la période à laquelle la veille du phénomène doit être initiée, et (3) identifier l'indicateur d'alerte.

Pour cela, la démarche peut s'appuyer sur l'état des apports printaniers, à savoir si ces derniers ont été suffisants ou s'il faudra accuser un déficit, auquel cas une situation de tension, voire de crise, est à prévoir. Cette dernière sera d'autant plus forte que les apports durant la période estivale seront faibles (IP0j élevé).

L'anticipation peut en effet être établie sur la base de l'état des réservoirs, puisqu'aucun indicateur traduisant le volume précipité (*e.g.* l'indice des précipitations antérieures (IPA)) n'a ici été proposé. À défaut, il est possible de définir une entrée en situation de criticité, à partir de l'état des aquifères (IHnj), éventuellement combiné à l'état du forçage climatique (IP0j).

Cela revient à considérer que le volume précipité durant la période antérieure à la situation évaluée se retrouve dans les débits (sur une semaine à dix jours) et dans les aquifères (sur un mois, voire sur plusieurs cycles, selon l'effet mémoire de l'aquifère considéré (*e.g.* la Fontaine de Vaucluse)). C'est d'ailleurs pour cette raison que les apports antérieurs ne sont pas pris en compte dans l'analyse proposée dans ce travail. Cela contribuerait sans doute à une redondance de l'information climatique relative aux cumuls de précipitations. En revanche, l'indicateur relatif aux périodes « sans pluie utile » constitue une information complémentaire pour juger de la sévérité du contexte climatique et, indirectement, de la situation hydrologique.

Par ailleurs, il a été jugé nécessaire, pour être en phase avec une réalité contextuelle, de procéder également à un réglage de l'information climatique. Faut-il considérer une absence absolue de pluie (IP0j inférieur ou égal à 0 mm), une absence réglementaire (inférieure ou égale à 1 mm), etc. ? Un seuil à 0 mm, pour la fragmentation des durées « sans pluie utile », est sans doute trop restrictif. Par

contre, en tenant compte des erreurs éventuelles de mesure et des approximations de l'ETP (pour le calcul de l'IP0j), un seuil d'au moins 3 mm semble plus correct. Un test est ainsi mené sur trois seuils (3 mm, 6 mm, 9 mm) afin de déterminer leur pertinence respective pour évaluer la phase précoce d'une situation de basses eaux. Cela revient à s'assurer que l'information climatique n'est pas pour autant trop dénaturée (ENCADRÉS E38.1 et E38.2).

Au vu des résultats affichés, un seuil établi à 6 mm semble de toute évidence la meilleure solution pour ces deux postes. Les ajustements sont très bons et sans écarts majeurs pour les fréquences les plus rares, et les processus en cours sur l'année sont très clairs. Pour préciser les choses, il faudrait en outre comparer les précipitations utiles de 6 mm (et plus) aux réactions hydrologiques, en particulier lors des phases de basses eaux, et quand les pluies sont limitées (inférieures à 25 mm, par exemple).

Sur la base de ces hypothèses et des modalités de calibrage de l'information, et en vue d'une anticipation du phénomène de basses eaux, la démarche a été mise en œuvre aux dates des 15 avril, 30 avril, 15 mai et 31 mai de chaque année, sur la période 2003-2015. En effet, au vu des résultats obtenus pour l'année 2012 au cours du processus de stabilisation de l'information, des situations relativement sévères semblent apparaître aux alentours de ces dates-là.

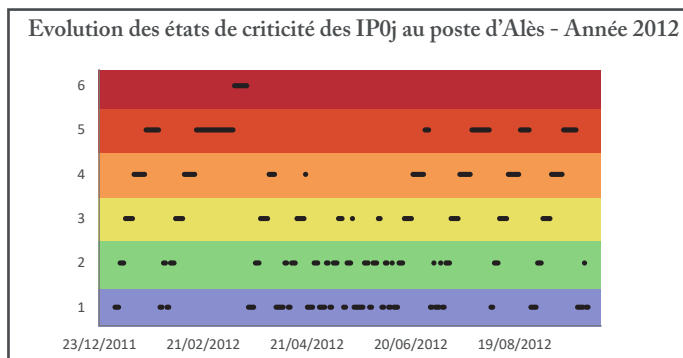
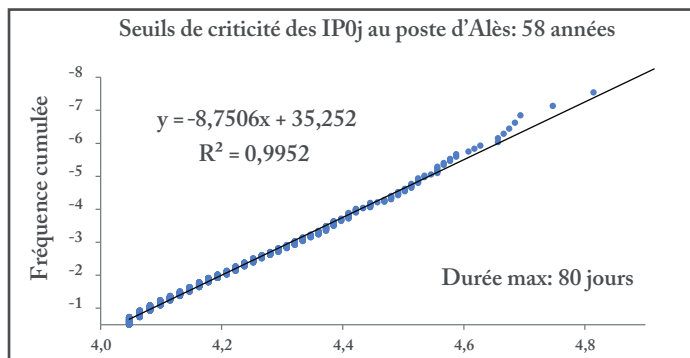
Cela conduit à l'élaboration de quatre chrono-kindénogrammes, sur lesquels sont projetées les valeurs des trois indicateurs, moyennées à 9 jours pour les Ivj et les IHNj, et sous un seuil de 3 mm pour l'IP0j (ENCADRÉ E39).

L'HNj paraît stable, bien que l'analyse sur 11 années ne soit pas suffisante (pas assez de profondeur historique) pour révéler des tendances robustes. Au 15 avril, il semblerait que l'état soit normal, et évolue une fois tous les 8 ans environ en état sub-critique. Cette fréquence augmenterait au 30 avril, 15 mai et 31 mai, mais seulement jusqu'en 2011 (ou 2012 ?), année à partir de laquelle cette tendance s'inverserait. Pour les trois dates les plus précoces, la fréquence du passage de l'état normal à sub-critique s'accélère, tandis qu'au 31 mai, l'état deviendrait globalement sub-critique, et ne repasserait qu'une fois tous les cinq ans (?) en état normal. Cela suggère donc d'initier la phase de veille hydrologique un peu après le 15 avril (état normal stable) et avant le 31 mai (état sub-critique), soit entre le 30 avril et le 15 mai.

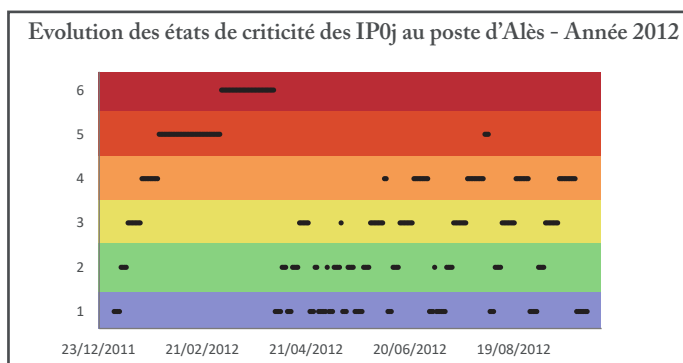
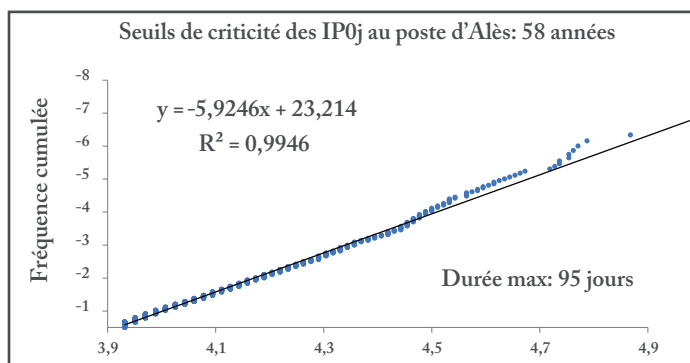
Il est moins aisé de faire ressortir des tendances sur les Ivj et IP0j. Les niveaux atteints chaque année évoluent généralement sur quatre états (entre trois états pour les Ivj au 30 avril et jusqu'à cinq états pour les IP0 à cette même date). Cette absence de régularité et cette forte variabilité interannuelle, observée pour chaque date, ne permettent pas le recours à ces indicateurs comme support d'alerte pour l'activation de la veille du phénomène. En revanche, ils constitueraient un complément d'information utile pour le suivi en temps réel de l'évolution de la situation, dès le déclenchement de l'état de veille.

La variable d'état de l'aquifère s'avère donc être la plus stable et sans doute la plus représentative des états précoces, puisqu'elle synthétise les apports pluviométriques de fin d'hiver et de début de printemps. De plus, elle révèle une tendance (partielle) mieux marquée de l'évolution du phénomène de basses eaux. L'HNj pourrait donc être conçu comme l'indicateur d'alerte précoce de la montée vers

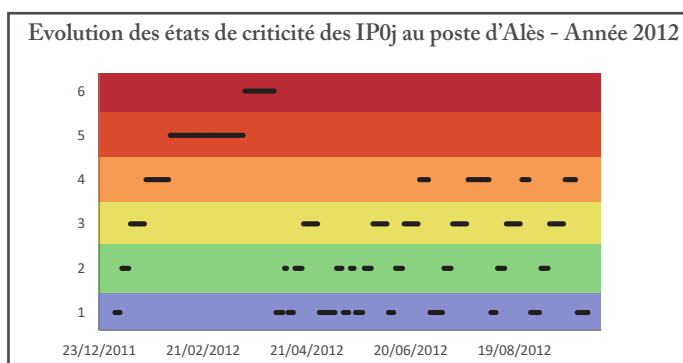
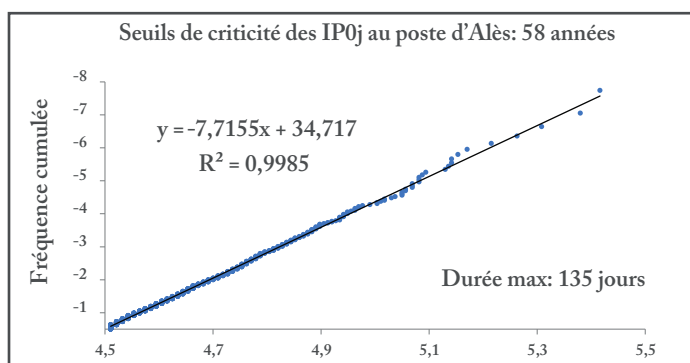
G38.1.1 SEUILS DE CRITICITÉ POUR IP0j SUPÉRIEUR À 0MM ET ÉVOLUTION DES ÉTATS SUR L'ANNÉE 2012



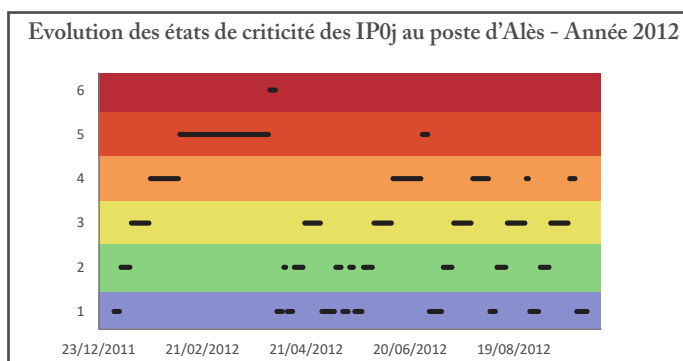
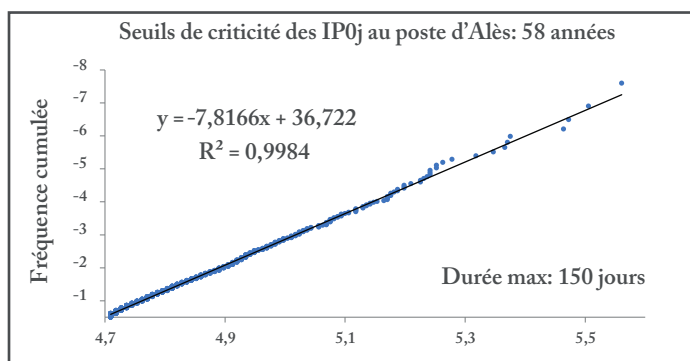
G38.1.2 SEUILS DE CRITICITÉ POUR IP0j SUPÉRIEUR À 3MM ET ÉVOLUTION DES ÉTATS SUR L'ANNÉE 2012



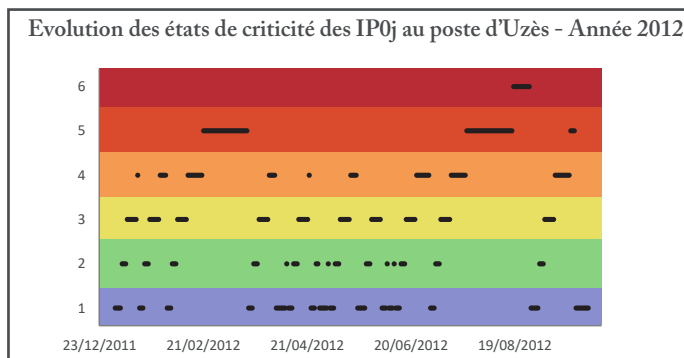
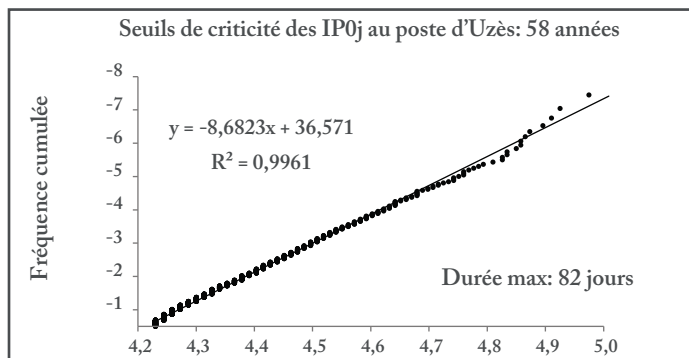
G38.1.3 SEUILS DE CRITICITÉ POUR IP0j SUPÉRIEUR À 6MM ET ÉVOLUTION DES ÉTATS SUR L'ANNÉE 2012



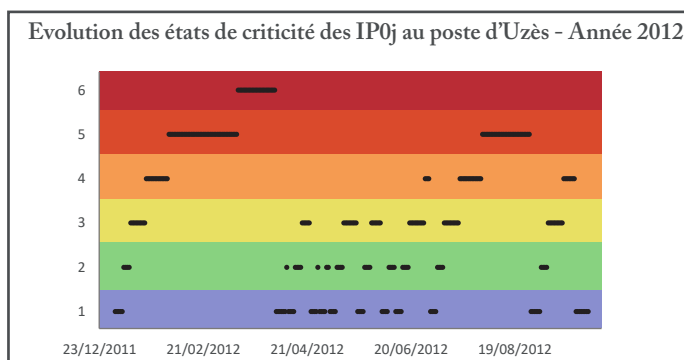
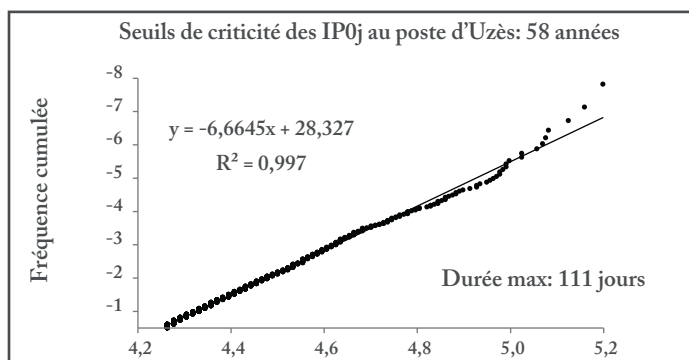
G38.1.4 SEUILS DE CRITICITÉ POUR IP0j SUPÉRIEUR À 9MM ET ÉVOLUTION DES ÉTATS SUR L'ANNÉE 2012



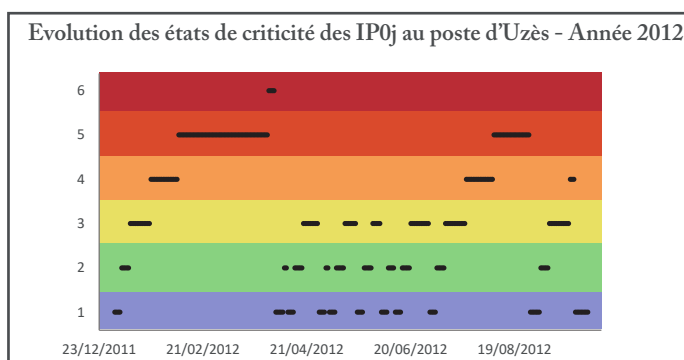
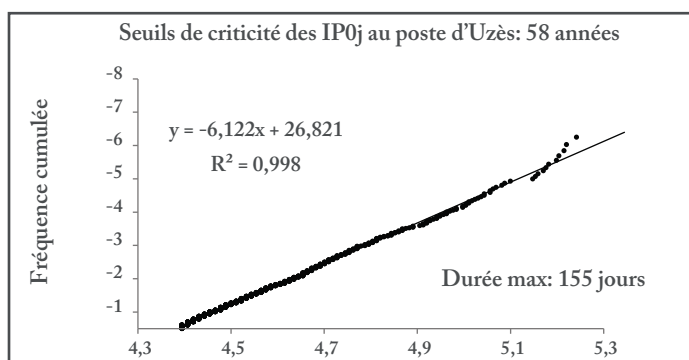
G38.2.1 SEUILS DE CRITICITÉ POUR IP0j SUPÉRIEUR À 0MM ET ÉVOLUTION DES ÉTATS SUR L'ANNÉE 2012



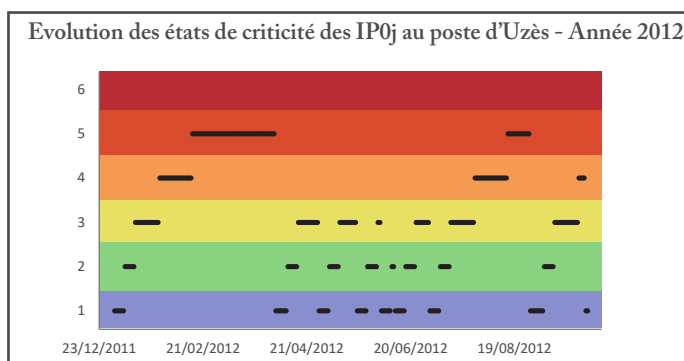
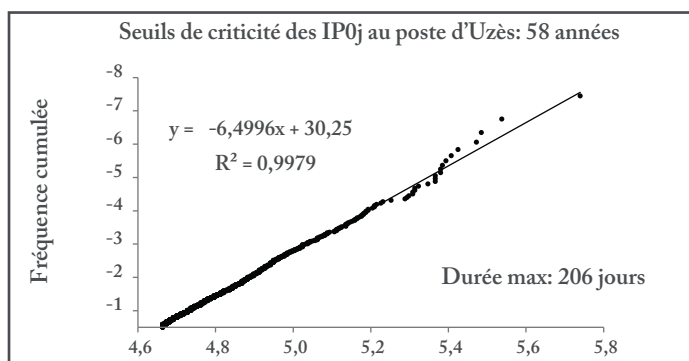
G38.2.2 SEUILS DE CRITICITÉ POUR IP0j SUPÉRIEUR À 3MM ET ÉVOLUTION DES ÉTATS SUR L'ANNÉE 2012



G38.2.3 SEUILS DE CRITICITÉ POUR IP0j SUPÉRIEUR À 6MM ET ÉVOLUTION DES ÉTATS SUR L'ANNÉE 2012



G38.2.4 SEUILS DE CRITICITÉ POUR IP0j SUPÉRIEUR À 9MM ET ÉVOLUTION DES ÉTATS SUR L'ANNÉE 2012



un état de criticité en basses eaux. S'il est difficile de définir la date optimale à laquelle déclencher la veille du phénomène, le début du mois de mai semble convenir. Rien n'empêche néanmoins d'établir, comme proposé ici, un point de situation tous les quinze jours afin de s'assurer de ne pas exclure une potentielle manifestation précoce et sévère du phénomène en début de printemps, faisant suite à un hiver sec.

10.2.2 Le Kindénogramme Analytique, outil d'analyse de la phase d'amorce et de l'évolution du phénomène de basses eaux

L'activation du processus de veille et de suivi de l'évolution de la situation nécessite de recourir à une analyse régulière ou en temps réel des indicateurs. Cela revient à entrer dans l'information probabiliste, à la fois individuelle et combinée, par le biais d'un outil adapté et simple de conception et d'utilisation.

En ce sens, le Kindénogramme Analytique (KA) a été conçu comme un outil graphique de représentation du niveau de l'état de criticité atteint par chacune des variables, à un instant donné (*e.g.* une date, une année, etc.) et pour un territoire défini (*e.g.* commune, bassin versant, etc.). En reliant l'ensemble des valeurs prises par chacune des variables projetées sur un radar, un polygone est obtenu, dont la taille témoigne de manière simple (et visuelle) de la sévérité de la situation globale (Canovas *et al.*, 2016).

Il peut également être envisagé de définir un état global en transformant l'échelle de dispersion statistique (0 à 4σ — écart-type) en échelle arithmétique (0 à 12.5, si huit indicateurs), afin d'obtenir un indice global compris entre 0 et 100. Dans un cas comme dans l'autre, la représentation graphique autorise une première évaluation de la pertinence d'une combinatoire empirique simple des indicateurs (c'est-à-dire sans pondération) : le résultat modélisé est-il en adéquation avec la situation t réelle et connue ?

Ainsi, la description des états (individuels et combinés) peut être actualisée, en construisant un graphique à des moments clés de la montée en tension (avant une réunion d'une cellule sécheresse, par exemple). De la même manière, il est possible de comparer deux dates proches, et de visualiser l'évolution de la situation globale (géométrie du polygone) ou de chaque variable.

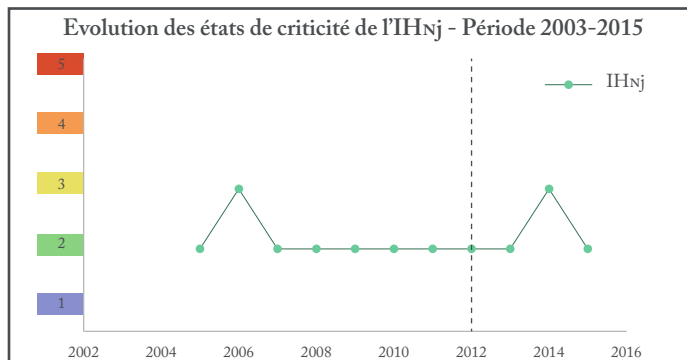
La mise en place d'un code couleur commun (bleu, vert, jaune, orange, rouge), et ajusté aux seuils statistiques, permet d'un seul coup d'œil de vérifier si globalement le polygone est plutôt dans le vert (la situation serait satisfaisante), ou dans le rouge (la situation serait très problématique). Sur ces bases colorimétriques, le KA offre une représentation souple de l'information, en permettant au concepteur de choisir les niveaux qu'il souhaite afficher. Par exemple, il est possible de ne faire apparaître que les états les plus critiques (sub-critique à exceptionnel), ou encore l'ensemble des états de criticité (humide à exceptionnel) (FIGURE 10.2).

Enfin, grâce à cet outil, il peut être envisagé d'introduire une ou plusieurs variables liées à la perception de la situation (décisions des autorités, perceptions des usagers).

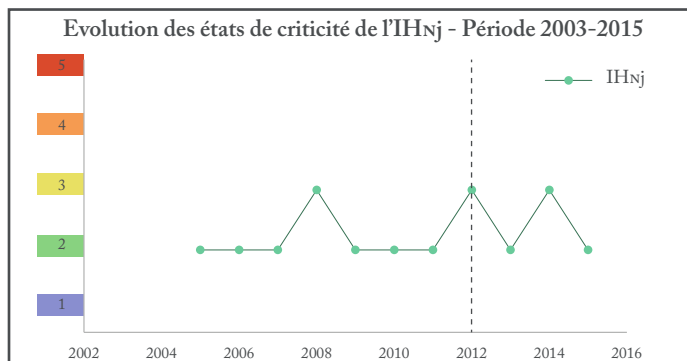
G39.1

CHRONO-KINDÉNOGRAMME DE L'IH_{Nj}
À MASSILLARGUES - ATTUECH

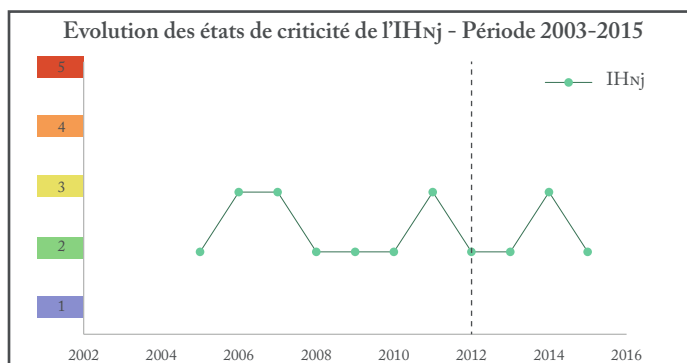
15 AVRIL



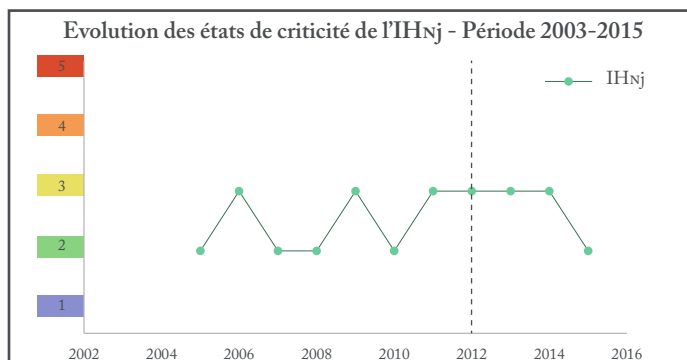
30 AVRIL



15 MAI



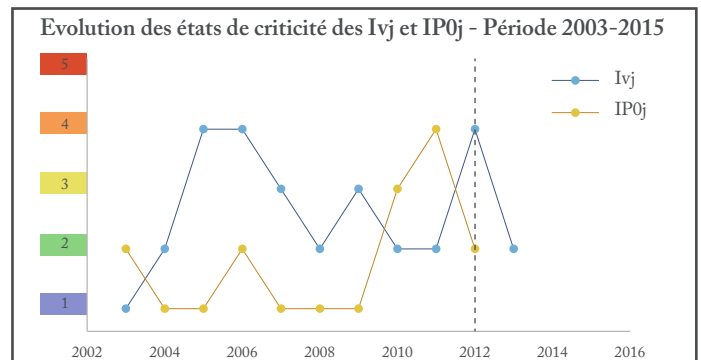
31 MAI



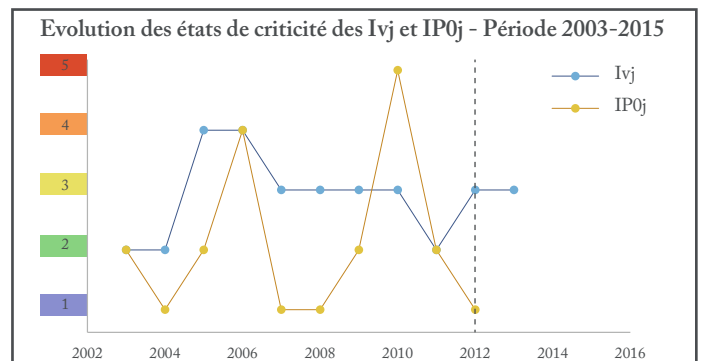
G39.2

CHRONO-KINDÉNOGRAMME DE L'Iv_j À
ANDUZE ET DE L'IP0_j À ALÈS

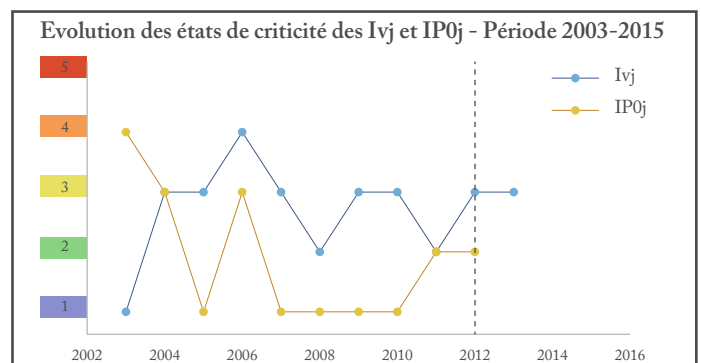
15 AVRIL



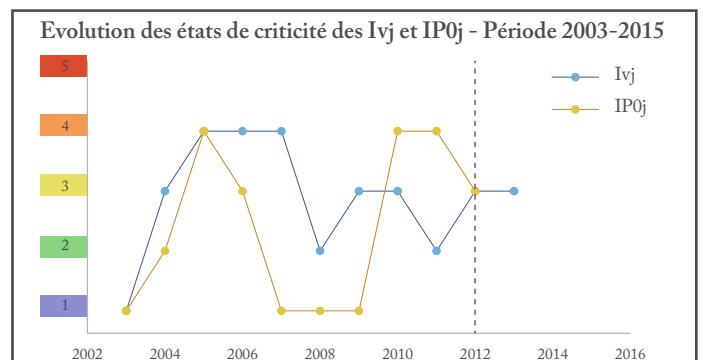
30 AVRIL



15 MAI



31 MAI



10.2. Détection et analyse de la phase précoce des basses eaux sur les Gardons : atlas multiscalaire des états de criticité

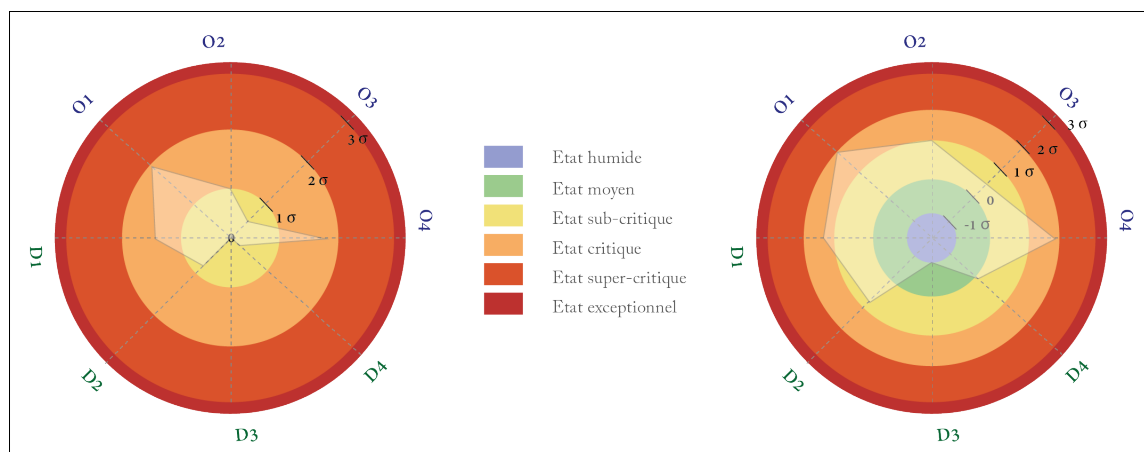


FIGURE 10.2 : REPRÉSENTATIONS POSSIBLES DES ÉTATS DE CRITICITÉ SUR LE KINDÉNOGRAMME ANALYTIQUE (KA)

Afin d'illustrer la démarche, un Kindénogramme Analytique est conçu sur le bassin des Gardons, à l'échelle du sous-bassin versant d'Anduze. Le graphique présente la situation au 31 mai 2012, date supposée à la charnière entre la période de veille et l'amorce du phénomène (FIGURE 10.3).

Le modèle graphique, issu du modèle théorique défini pour le territoire d'Anduze (voir *supra* 5.2.1.2) est renseigné de la manière suivante :

- À la variable « forçage climatique », synthétisée par l'IP0, correspond la valeur de la durée « sans pluie utile inférieure à 3 mm ». Au 31 mai 2012, cette valeur est comprise dans l'intervalle d'état sub-critique, défini par une fréquence comprise entre 25 et 50 %.
- À la variable « volume souterrain », synthétisée par l'IHN, est associée la valeur de l'indice volumique journalier moyennée sur 9 jours. Au 31 mai 2012, cette valeur est située dans l'intervalle d'état sub-critique, borné par les écarts-types [0 ; 1 σ].
- À la variable « volume superficiel », synthétisée par l'Ivj, est attribuée la valeur de l'indice volumique journalier moyennée sur 9 jours. Au 31 mai 2012, cette valeur est incluse dans l'intervalle d'état sub-critique, borné par les écarts-types [0 ; 1 σ].
- À la variable « qualité de l'eau souterraine », notée QuN, est attribuée la valeur annuelle de l'indice de qualité chimique. En 2012, cette valeur est inscrite dans l'intervalle d'état normal, correspondant à un état bon chimique de la ressource souterraine.
- À la variable « qualité de l'eau superficielle », notée QuR, est affectée la valeur annuelle de l'indice de qualité chimique. En 2012, cette valeur est inscrite dans l'intervalle d'état normal, correspondant à un état bon chimique de la ressource superficielle.
- À la variable « qualité de l'eau de baignade », notée QuB, est affectée la valeur annuelle (saison balnéaire) de l'indice de qualité de l'eau de baignade. En 2012, cette valeur est inscrite dans l'intervalle d'état sub-critique, correspondant à un état moyen de l'eau superficielle destinée à la baignade.

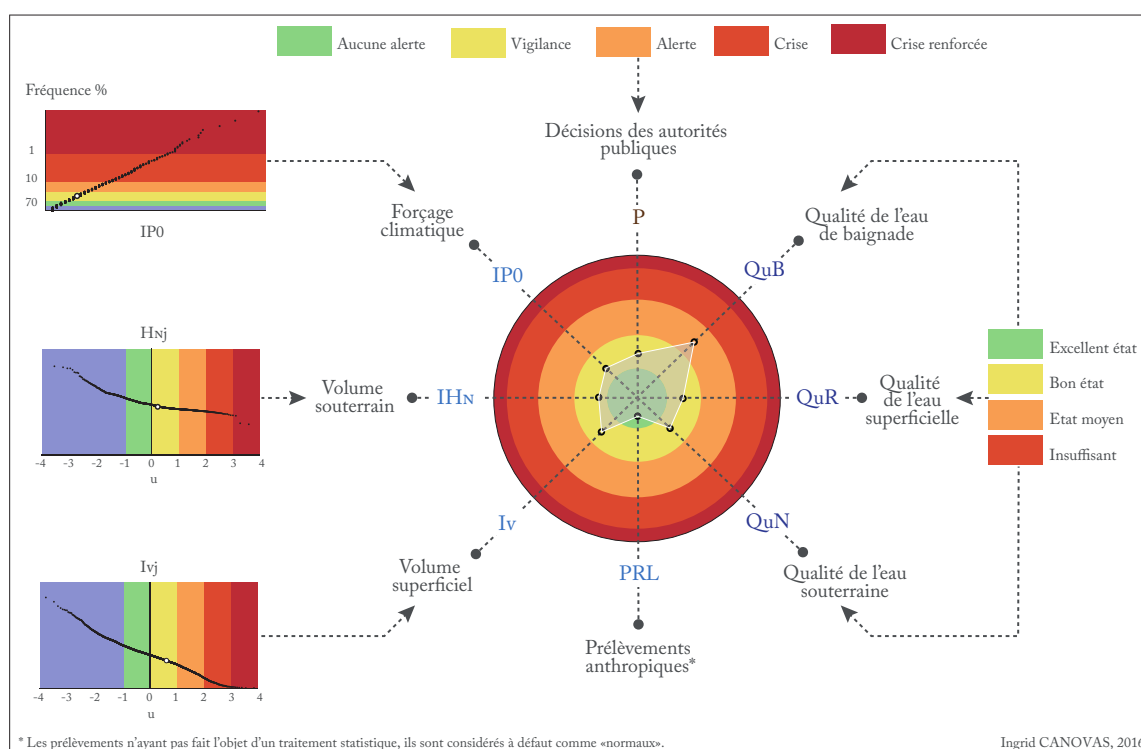


FIGURE 10.3 : LE KINDÉNOGRAMME ANALYTIQUE SPÉCIFIQUE AU SOUS-BASSIN D'ANDUZE – POINT DE SITUATION DÉTAILLÉE DES ÉTATS DE CRITICITÉ AU 31 MAI 2012

- À la variable « décisions des autorités publiques », notée P (pour Perception), correspond le niveau d'alerte activé. Au 31 mai 2012, cette valeur est comprise dans l'intervalle d'état sub-critique, lequel est défini par l'activation du niveau de vigilance.
- À la variable « prélèvements anthropiques », notée PRL, aucune information n'a été associée. Les données annuelles ne permettant pas de discrétiser des états de pression sur la ressource. À défaut, la variable est considérée, à titre d'illustration, comme étant à un état normal.

Il est à noter que les indices de qualité des eaux superficielles et souterraines auraient tout aussi bien pu refléter l'état biologique (IBGN) de l'eau, ou encore celui du niveau de pollution par les pesticides, tous deux renseignés dans les bases de données sollicitées, à une fréquence également annuelle. Le choix de recourir à l'indice chimique n'a pas de justification particulière, si ce n'est d'illustrer les modalités de conception du modèle graphique probabiliste.

Au vu des modalités de conception relativement simples, le Kindénogramme Analytique peut, de fait, être répliqué à d'autres dates, afin de suivre au plus près l'évolution du phénomène. En d'autres termes, il est possible de recourir à cet outil de manière dynamique, soit de générer des graphiques à des pas de temps variables, selon que le phénomène s'intensifie, ou, au contraire, se maintient.

Le KA a en effet été pensé de sorte à pouvoir constituer un support d'aide à la décision, puisqu'il permet le suivi de l'évolution de chaque variable et du phénomène en général, autant de manière précoce (en supplément du chrono-kindénogramme) que durant toute la phase de récession, voire au-delà. Il fournit un bilan analytique détaillé, qui pourrait par ailleurs être optimisé et rendu plus

opérationnel avec une automatisation assistée, permettant la génération de points de situations aussi régulièrement que souhaité, ou nécessaire.

Cette approche peut aussi être répliquée sur d'autres découpages territoriaux, et être envisagée, par exemple sur la partie amont (un radar pour la situation en Cévennes) et sur la partie aval (un radar pour la situation en plaine et garrigues) du bassin versant des Gardons. Suivant cette logique, cette approche pourrait jusqu'à être reproduite sur le bassin de la Cèze et de l'Ardèche, qui présentent des configurations hydromorphologiques très proches, une structuration amont-aval similaire, et des problématiques relatives au manque d'eau en période estivale identiques.

Cette modélisation probabiliste graphique n'est toutefois qu'une étape préliminaire à l'élaboration de l'indice de criticité synthétique. En effet, il faudra nécessairement s'interroger sur la méthode à mettre en œuvre pour la combinatoire de leurs probabilités respectives (voir *infra* 10.3).

10.2.3 Approche spatiale : Atlas carto-graphique et analytique

Toujours suivant une démarche analytique, des cartes de situation peuvent être générées en parallèle de l'analyse probabiliste graphique, en vue de compléter chaque point de situation. À cette fin, une base pour la conception d'un atlas, compilant l'ensemble des informations carto-graphiques (*i.e.* probabilisées et spatialisées), est ici proposée.

Cet atlas se veut être un outil plus complet, qui offre une appréhension et une lecture optimisées de la situation. De la même manière que le KA, il pourrait être généré autant de fois que souhaité, pour une approche analytique et spatialisée de la situation, à la fois globale et locale.

Il est ici conçu en vue d'un point sur la situation au 31 mai 2012, sur le territoire des Gardons (ENCADRÉ A1). Il est également décliné, à cette même date, sur les neuf sous-bassins versant (ENCADRÉS A1, A2.1 et A2.2).

Il ne s'agit donc que d'une simple compilation des informations obtenues selon les procédés présentés précédemment (élaboration du KA), à laquelle s'ajoute une représentation spatialisée de ces mêmes informations, suivant les modalités détaillées dans le CHAPITRE 9.

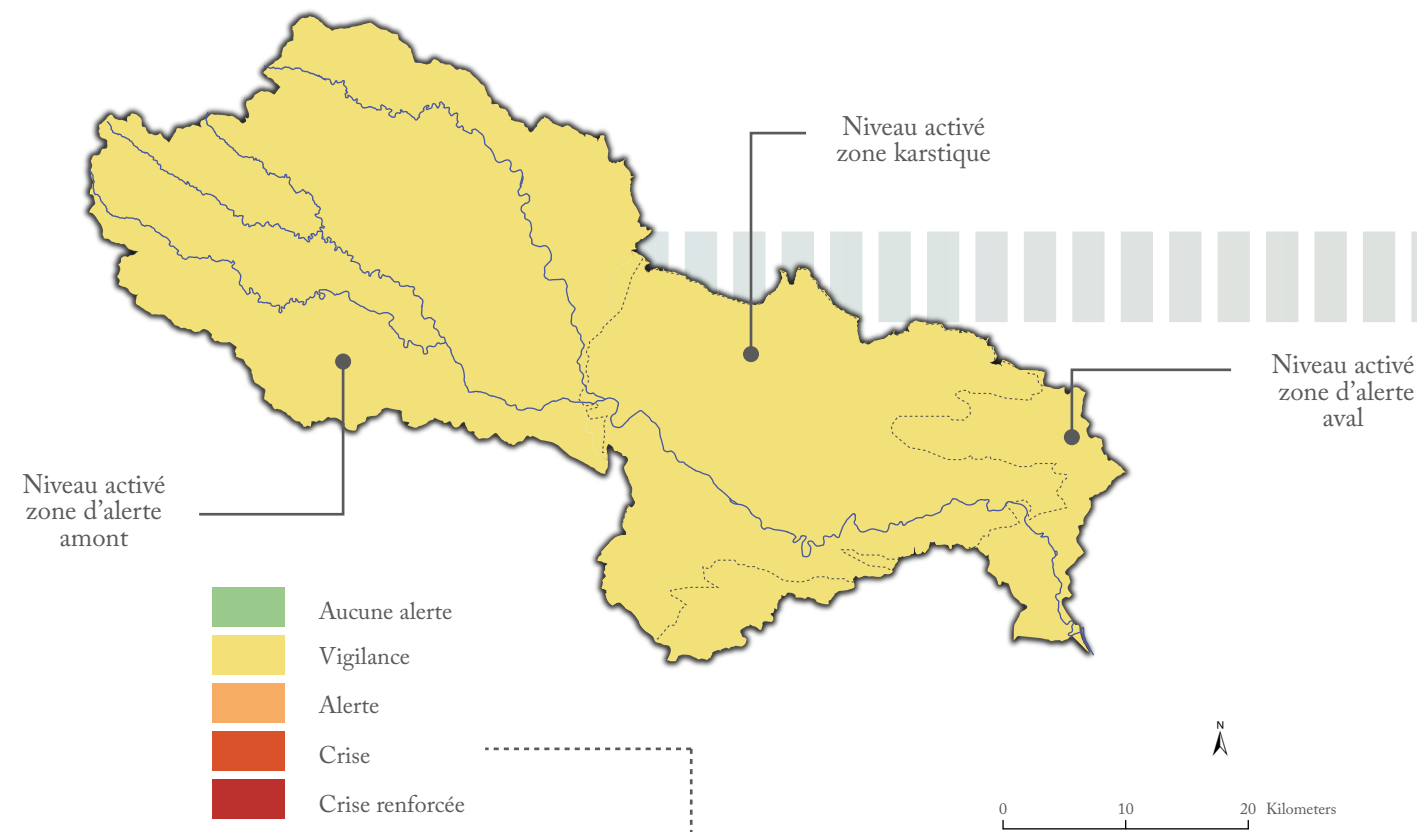
Les deux outils analytiques proposés ne permettent toutefois pas de faire une synthèse de l'état de criticité sur un territoire donné. Il faut dès lors réfléchir au moyen de combiner l'ensemble des informations (*i.e.* l'ensemble des indicateurs) pour obtenir un indice unique traduisant un état de criticité global.

10.3 Vers un outil opérationnel pour la définition d'un état de tension synthétique

Suivant le modèle conceptuel des basses eaux développé en début d'étude (voir *supra* 3.3), la définition d'un état de tension s'opère en plusieurs phases.

CA.1.1

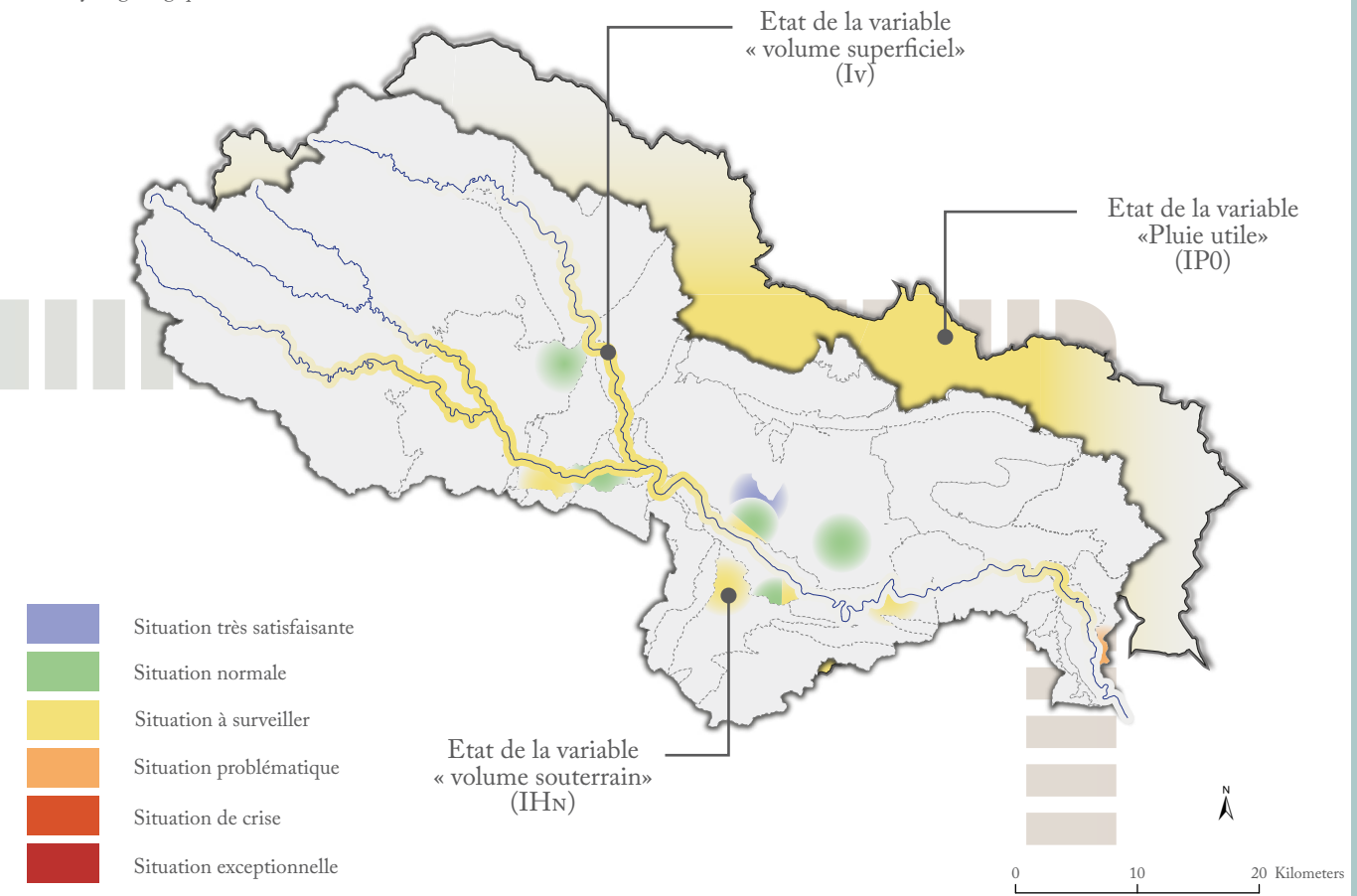
SPATIALISATION DE L'ÉTAT PERÇU DE LA SITUATION DE BASSES EAUX SUR LE BASSIN DES GARDONS



CA.1.2

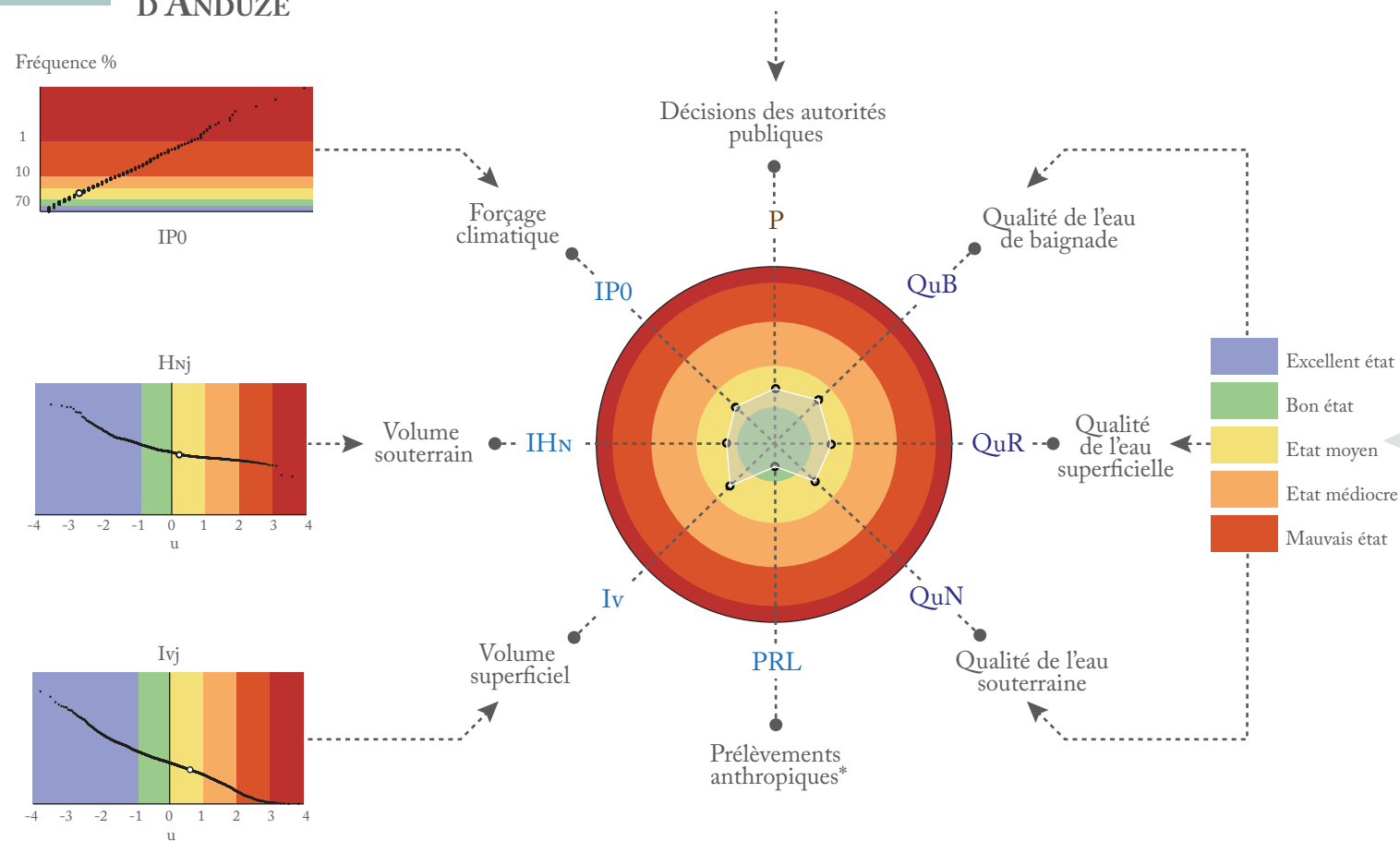
SPATIALISATION DES ÉTATS DE CRITICITÉ DES BASSES EAUX SUR LE BASSIN VERSANT DES GARDONS

Entité Hydrogéologique



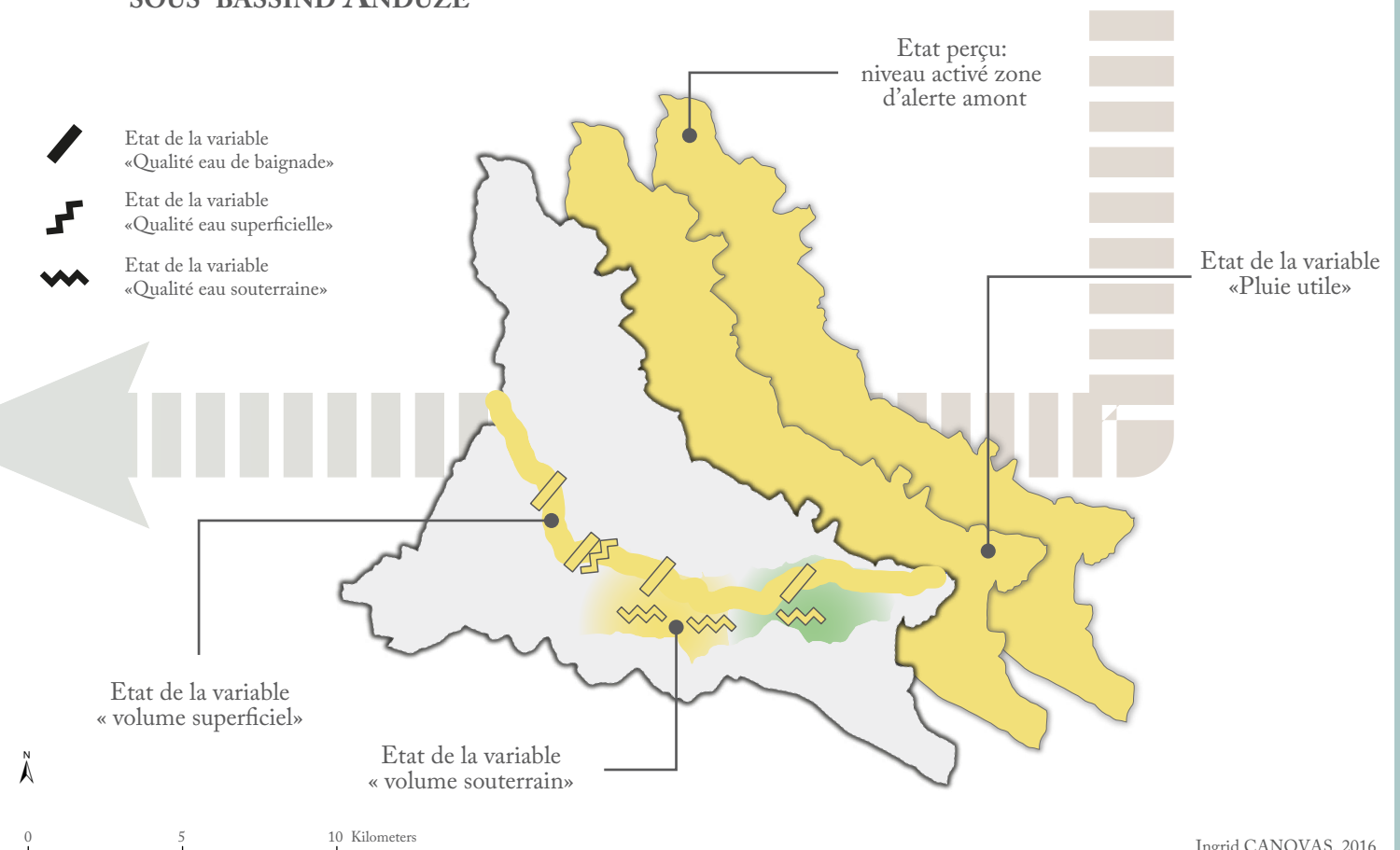
FA.1.1

LES ÉTATS DE CRITICITÉ DES INDICATEURS DE BASSES EAUX SUR LE SOUS-BASSIN D'ANDUZE



CA.1.3

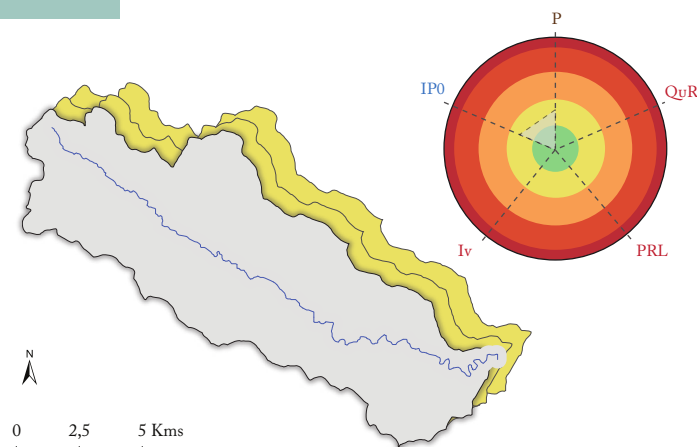
SPATIALISATION DES ÉTATS DE CRITICITÉ DES INDICATEURS DE BASSES EAUX SUR LE SOUS-BASSIN D'ANDUZE



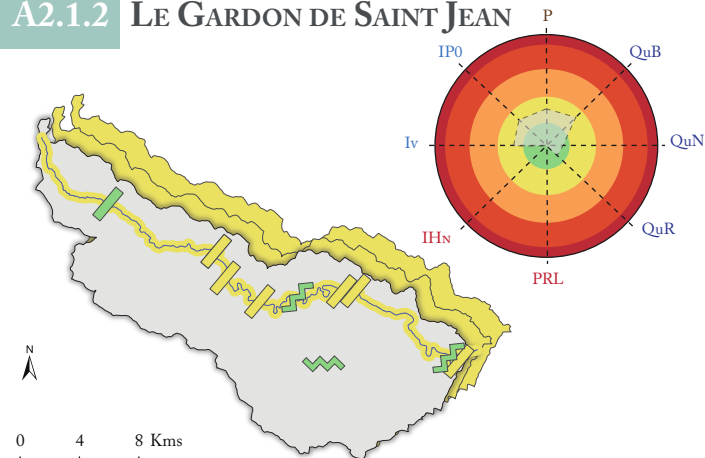
* Les prélèvements n'ayant pas fait l'objet d'un traitement statistique, ils sont considérés à défaut comme «normaux».



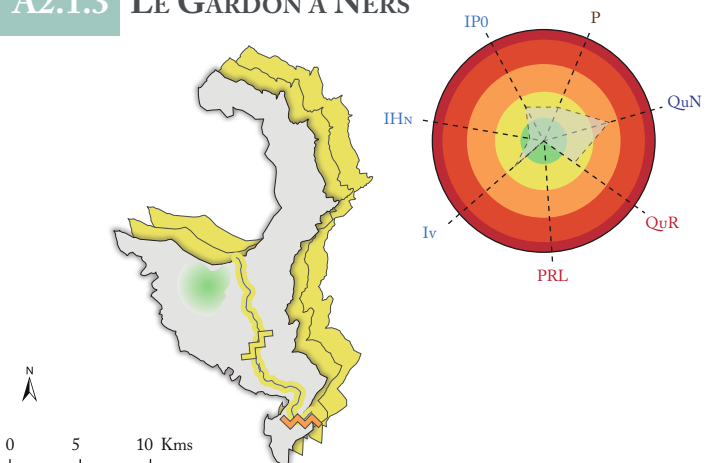
A2.1.1 LE GARDON DE SAINTE CROIX



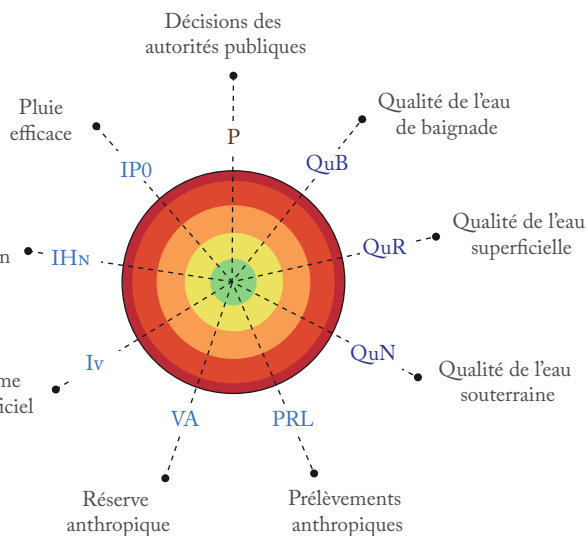
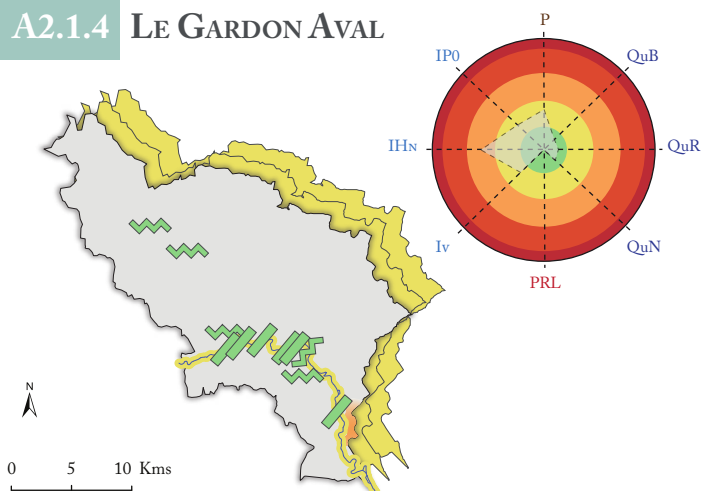
A2.1.2 LE GARDON DE SAINT JEAN



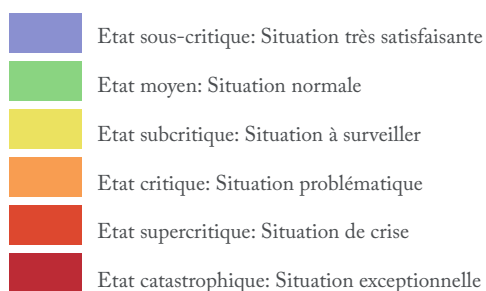
A2.1.3 LE GARDON À NERS

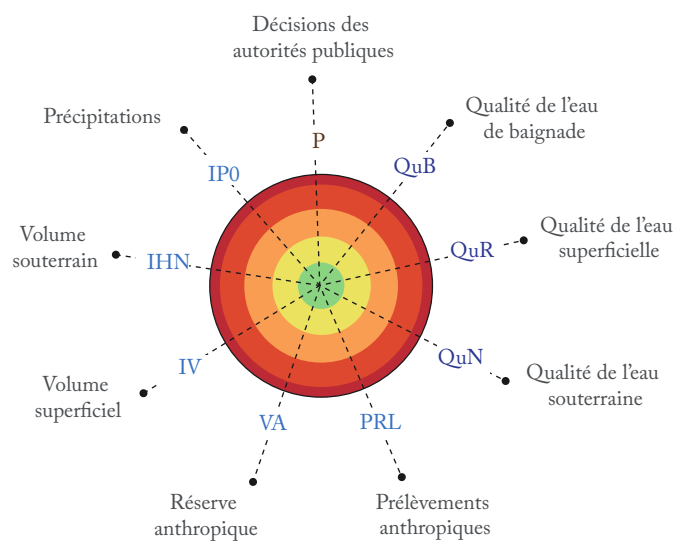


A2.1.4 LE GARDON AVAL

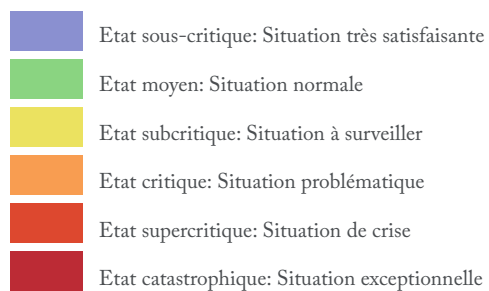


En rouge: les variables non renseignées

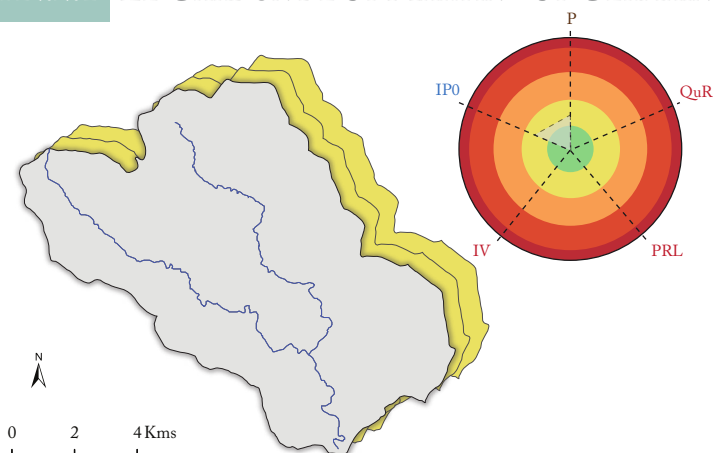




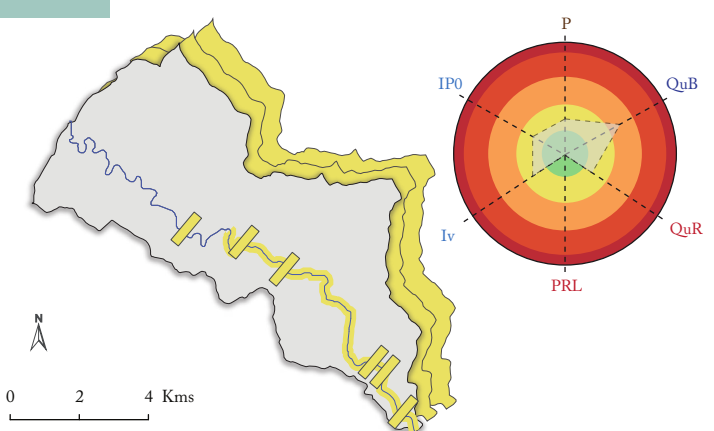
En rouge: les variables non renseignées



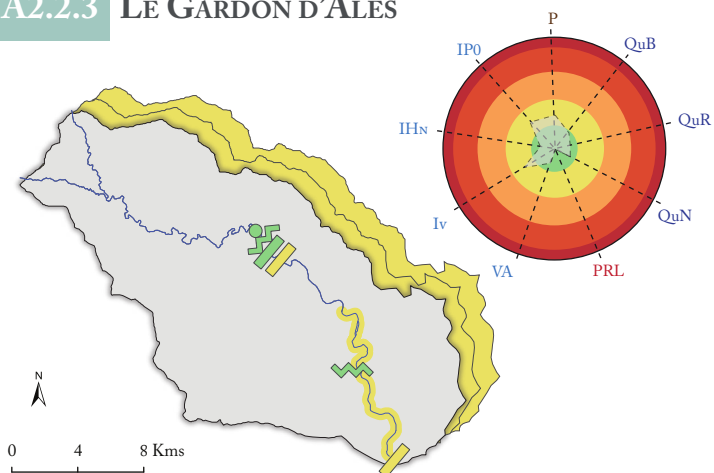
A2.2.1 LE GARDON DE ST MARTIN - ST GERMAIN



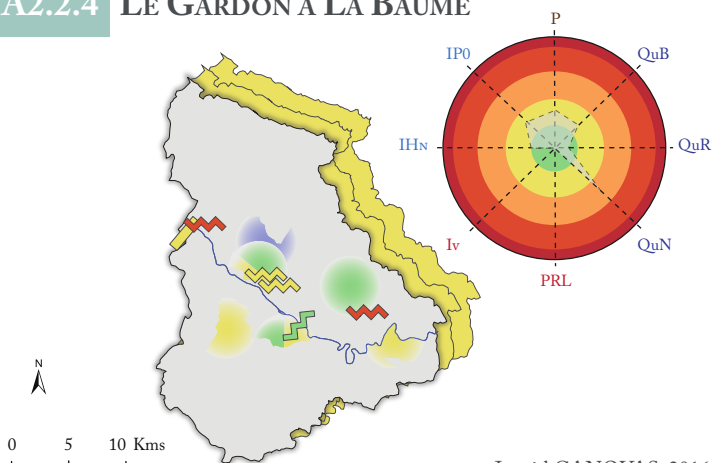
A2.2.2 LE GARDON DE MIALET



A2.2.3 LE GARDON D'ALÈS



A2.2.4 LE GARDON À LA BAUME



Dans un premier temps, la combinatoire des indicateurs, qui revient à croiser leurs probabilités respectives, est effectuée, de sorte à obtenir :

- Un indice d'Offre (IsO) ;
- Un indice de Demande (IsD) ;
- Un indice de Perception (IsP).

Les indices d'Offre et de Demande sont ensuite combinés pour obtenir un indice de Criticité synthétique (ICs), qui, croisé à son tour à l'indice de Perception, définit l'état de tension d'un territoire sur la ressource.

L'ensemble de ces étapes nécessite d'étendre la réflexion aux conditions inhérentes à la combinatoire :

- Des probabilités individuelles : faut-il faire une moyenne sur les fréquences ? Ne considérer que la probabilité la plus basse (ou la plus forte) ? Cette dernière condition conduirait à déterminer indirectement l'indicateur d'alerte sur l'offre et sur la demande, lorsque le phénomène est engagé et que la situation évolue vers une montée dans les niveaux critiques. Pour l'offre, s'agira-t-il toujours de l'IH_{Nj}, ou de l'information climatique (IP0), définie par l'absence prolongée des pluies ?
- Des indices alors obtenus : le recours à des matrices simples et qualitatives est-il pertinent ? Faudrait-il effectuer une pondération des indices, ou des états ? Etc.

Pour tenter d'apporter des premiers éléments de réponse, des essais sont effectués ici sur les Gardons.

10.3.1 Définition d'un indice de criticité synthétique (ICs)

Définir un indice de criticité nécessite au préalable la définition d'un indice d'Offre (IsO) et de Demande (IsD), à partir des indicateurs. Cette étape n'est optionnelle que lorsqu'un seul indicateur a été retenu pour déterminer l'indice correspondant. C'est le cas, dans ce travail, de l'indice de Perception (IsP), lequel est déterminé à l'aide de l'indicateur unique « niveau d'alerte activé ». Ce dernier renseigne la perception des autorités publiques sur la situation, et constitue (à titre d'exemple) l'indice de perception final (voir ENCADRÉS A1, A2.1 et A2.2).

Lorsque plusieurs indicateurs ont été retenus pour définir un indice, il faut en revanche procéder à leur combinaison. Des propositions de mise en œuvre sont illustrées sur les trois indicateurs élaborés dans ce travail (IP0, Iv et IH_N), qui déterminent ensemble l'état de l'offre quantitative sur le territoire des Gardons.

10.3.1.1 Élaboration de l'indice d'Offre (IsO)

Quatre alternatives sont avancées pour croiser les trois indicateurs et obtenir un indice d'offre quantitative, lequel sera par ailleurs aussi considéré comme indice d'Offre (IsO) global dans cette étude :

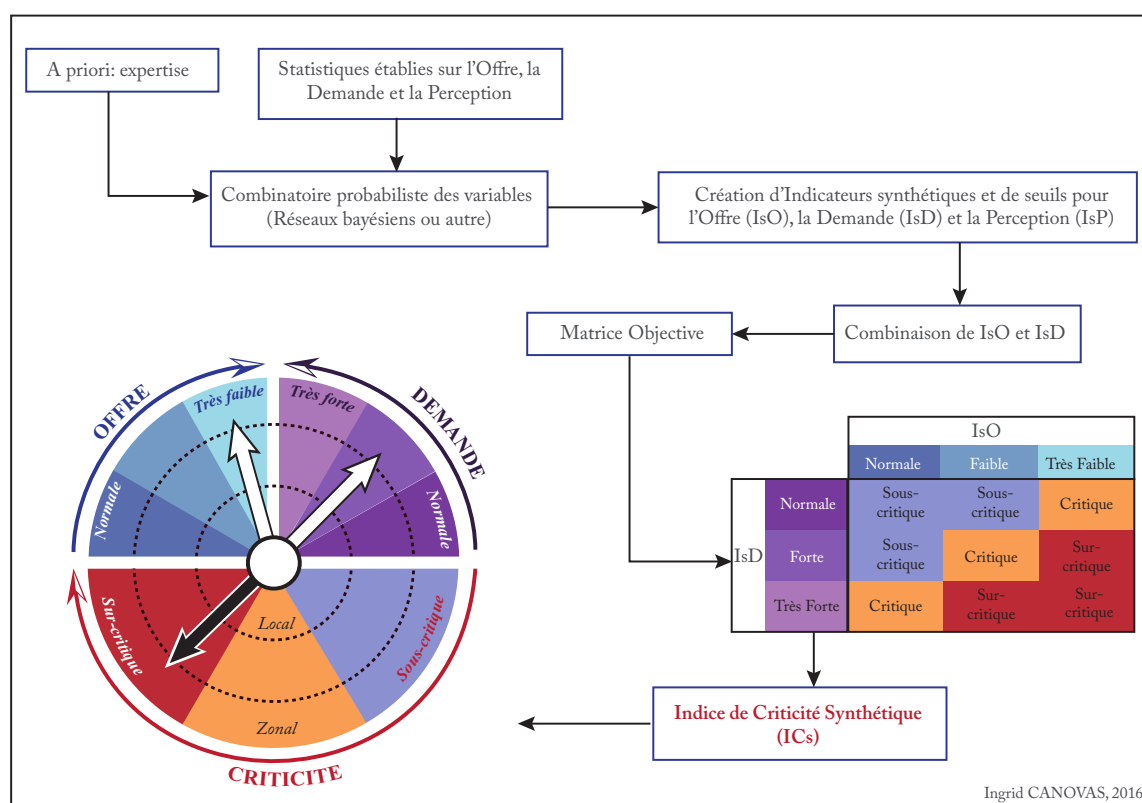


FIGURE 10.4 : ÉTAPES MÉTHODOLOGIQUES POUR LA CONSTRUCTION DE L'INDICE DE CRITICITÉ (ICs)

- La première option suggère d'effectuer une moyenne sur les trois fréquences, donc sur les trois probabilités, même si statistiquement cela n'est peut-être pas rigoureux.
- La seconde consiste à ne retenir que l'indicateur présentant la probabilité la plus basse, de sorte à sous-évaluer la situation.
- La troisième, à l'inverse, suggère de retenir la probabilité la plus forte, de sorte à minimiser le risque de passer à côté d'une situation problématique, en surestimant la situation.
- Enfin, la quatrième alternative consiste à attribuer à l'indice d'Offre la fréquence de l'indicateur de forçage climatique (IP0). Cela permet en outre de se rapprocher de la perception sociale, laquelle est supposée fortement influencée par les conditions météorologiques. Le cas échéant, cela faciliterait de surcroît l'acceptation de mesures restrictives.

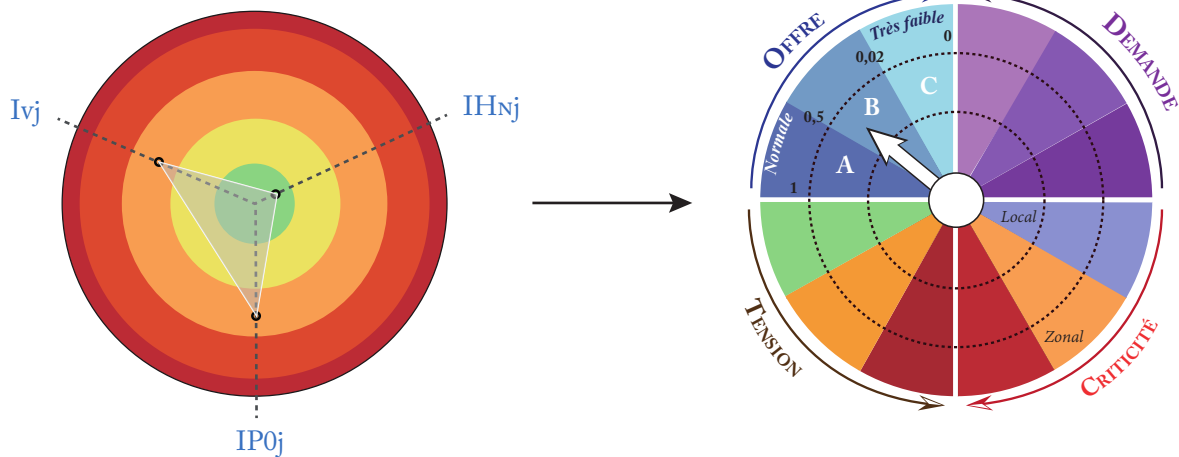
Ces quatre propositions sont mise en œuvre, à titre d'illustration, sur le sous-bassin d'Anduze au 1^{er} juillet 2012, suivant des ajustements de l'information identiques à ceux effectués lors de l'élaboration du chrono-kindénogramme (ENCADRÉ E40). Ainsi, les valeurs des I_{vj} et des I_{HNj} correspondent aux moyennes calculées sur 9 jours au 31 juillet 2012, et la valeur attribuée à l' $IP0j$ correspond à la durée « sans pluie utile » inférieure à 3 mm au même jour.

La question des seuils se pose ensuite à un deuxième niveau : celui de la répartition des valeurs des fréquences obtenues pour l'indice d'Offre au sein de trois états : « Offre Normale », « Offre faible » et « Offre très faible ». Il s'agit donc de passer de six états de criticité individualisés (humide à exceptionnel) à trois états d'appréciation plus englobants, l'objectif étant de faire une évaluation

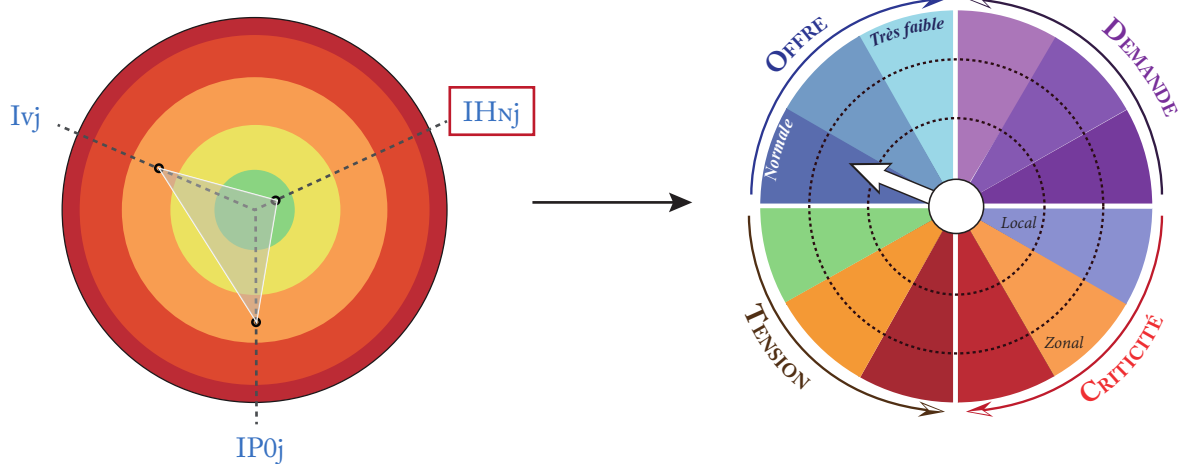
	Ivj ANDUZE	HNj MASSILL.	IP0 ALÈS
Etat	4	2	3
Fréquence	0,13	0,73	0,11

	SEUIL	FRÉQUENCE	ETAT
SCÉNARIO 1	Pobabilité Moy.	0,30	B
SCÉNARIO 2	Probabilité +	0,73	A
SCÉNARIO 3	Probabilité -	0,11	B
SCÉNARIO 4	Probabilité IP0	0,11	B

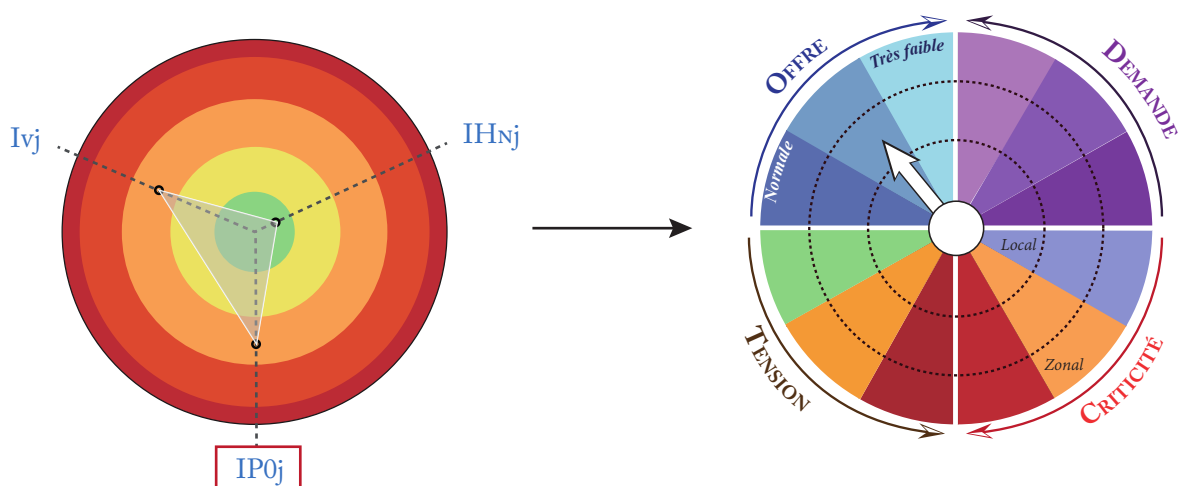
F40.1 SCÉNARIO 1: SEUIL FIXÉ PAR LA PROBABILITÉ MOYENNE DES INDICATEURS D'OFFRE



F40.2 SCÉNARIO 2: SEUIL FIXÉ PAR L'INDICATEUR À LA PROBABILITÉ LA PLUS ÉLEVÉE



F40.3 SCÉNARIO 3 ET 4: SEUIL FIXÉ PAR L'INDICATEUR À LA PROBABILITÉ LA PLUS FAIBLE ET PAR L'IP0j



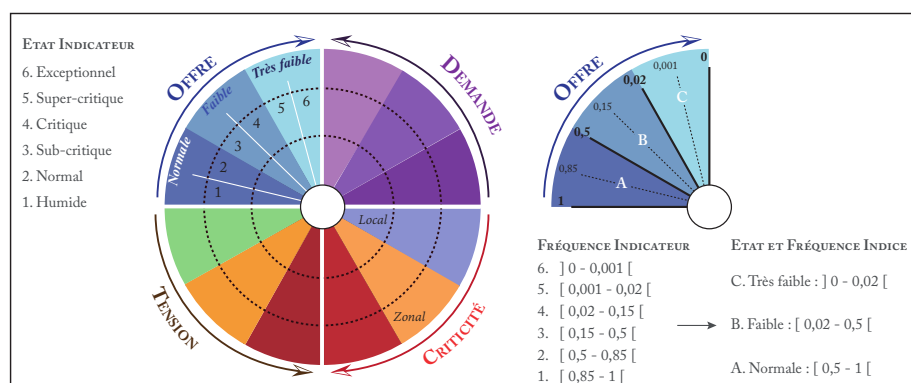


FIGURE 10.5 : DÉFINITION DES SEUILS DE L'INDICE D'OFFRE À PARTIR DES SEUILS DE CRITICITÉ DES INDICATEURS

synthétique et globale. Un exemple de discrétisation est ici proposé, suivant lequel les seuils relatifs aux états de l'indice d'Offre sont établis de sorte que (FIGURE 10.5) :

- Les fréquences déterminant les états supercritique et exceptionnel soient regroupées au sein de la classe « Offre très faible » $] 0 - 0,02 [$;
- Les fréquences déterminant les états sub-critique et critique soient regroupées au sein de la classe « Offre faible » $[0,02 - 0,5 [$;
- Les fréquences déterminant les états humide et normal soient regroupées au sein de la classe « Offre Normale » $[0,5 - 1 [$.

Parmi les quatre scénarios proposés pour déterminer l'état de l'indice d'Offre, et suivant les modalités de définition des seuils relatifs à l'Offre tout juste exposées, trois d'entre eux présentent un résultat identique. En effet, l'état synthétique de l'Offre apparaît « Faible », qu'il soit défini par la moyenne des fréquences portées par chaque indicateur, ou par la fréquence la plus faible, laquelle coïncide, au 1^{er} juillet 2012, avec celle de l'indicateur de l'état du forçage climatique (IP0). En revanche, l'Offre est considérée comme « Normale » lorsqu'elle se rapporte à l'indicateur présentant la fréquence la plus forte (ici, l'IHnj).

Par ailleurs, les seuils fixés par les fréquences associées aux écarts-types pour les indicateurs hydrologiques (IHnj et Ivj), et les seuils fixés *a priori* à partir des fréquences cumulées pour l'indicateur climatique (IP0) ne s'accordent pas systématiquement. En effet, l'Ivj affiche au 1^{er} juillet 2012 une fréquence supérieure à celle de l'IP0, mais se situe pourtant dans un état de criticité supérieur. Ainsi, si l'état de l'Offre devait être défini par le niveau de criticité le plus élevé, il afficherait certes un état « Faible », mais se rapprocherait sensiblement de l'état « Très faible ».

Cela étant, l'état de l'aquifère semble donc réguler l'état général de l'Offre, puisque la moyenne des indicateurs (dont trois sont en état sub-critique) demeure relativement basse. Il semble donc essentiel de le conserver dans le bilan synthétique de l'état de la ressource, notamment dans une approche à petite échelle (*i.e.* grands territoires). Toutefois, il minimise fortement l'état de l'Ivj, lequel est pourtant fondamental pour garantir la satisfaction d'usages spécifiques, telles les pratiques ludiques de l'eau (*e.g.* baignade, canoë, etc.), et dans certains cas l'irrigation. Aussi, il faudrait sans

doute envisager de moduler les critères de détermination des seuils relatifs à l'état de l'Offre en fonction de l'usage considéré, notamment dans des approches plus locales.

10.3.1.2 L'indice de Criticité synthétique (ICs)

Une fois les indices d'Offre (IsO) et de Demande (IsD) obtenus, il faut les combiner à leur tour. Pour ce faire, il est possible de recourir à une matrice simple et qualitative, dans laquelle chaque indice est discrétisé en trois états : sous-critique, critique et sur-critique.

Les bornes sont définies intuitivement, qualitativement, suivant deux hypothèses principales. D'une part, il est logique de penser que, lorsqu'une situation normale ($[0\sigma - 1\sigma]$) pour l'offre et pour la demande est observée, la situation du territoire sera sous-critique. En revanche, si l'offre est très faible et la demande très forte, ce qui correspondrait par exemple à des raretés $[2\sigma - 3\sigma]$, alors la situation du territoire sera sur-critique. Sur ces premières bases, des situations particulières peuvent être définies à leur tour, dont le cas, par exemple, d'une demande très forte avec une offre faible ou celui d'une demande forte avec une offre très faible (FIGURE 10.4).

Cette étape étant encore au stade de la réflexion, c'est pourquoi la matrice qualitative obtenue sera sans doute à améliorer. L'ajustement des seuils pourrait être effectué par une série d'applications sur des dates ou des événements particuliers (récessions humides, étés secs, etc.). Dans cette étude, cette phase ne peut être abordée, les indicateurs essentiels pour caractériser la demande n'ayant pas été développés.

10.3.2 Le Kindénogramme Synthétique (KS) pour la description du phénomène

Cela étant, en admettant que l'ensemble des variables d'offre et de demande aient été renseignées, la réflexion peut être poursuivie en introduisant ensuite les variables de perception, lesquelles sont préalablement traduites en un indice de Perception (IsP), suivant les mêmes modalités d'obtention des indices d'Offre (IsO) et de Demande (IsD).

Cela aboutit alors à une nouvelle matrice, qui confronte l'indice de Criticité (ICs) à l'indice de Perception (IsP) (FIGURE 10.6). Les écarts entre les états calculés (par le biais des indicateurs) et les états perçus d'une même situation sont ainsi représentés. Le problème essentiel, dans ce cas, est la surestimation ou, pire, la sous-estimation de la situation, en particulier par les autorités qui ne prendraient pas les décisions qui s'imposent. La perception d'un état sous-critique, alors qu'il est réellement critique ou sur-critique, exposerait le territoire à un danger manifeste.

La totalité des informations peut finalement être synthétisée dans une représentation unique. Le Kindénogramme Synthétique (KS), qui résulte de l'analyse des variables d'offre, de demande et de perception, sert à mettre en évidence, de manière très instinctive, l'état de chacune des dimensions. Il permet d'exposer clairement le niveau de criticité de la ressource au travers d'une flèche qui caractérise l'offre et d'une autre qui caractérise la demande. Le niveau de tension d'un territoire sur la ressource, correspondant à la mesure du degré d'adéquation entre l'état de criticité établi et l'état perçu, est quant à lui décliné au travers de trois catégories (satisfaisant, tension, danger).

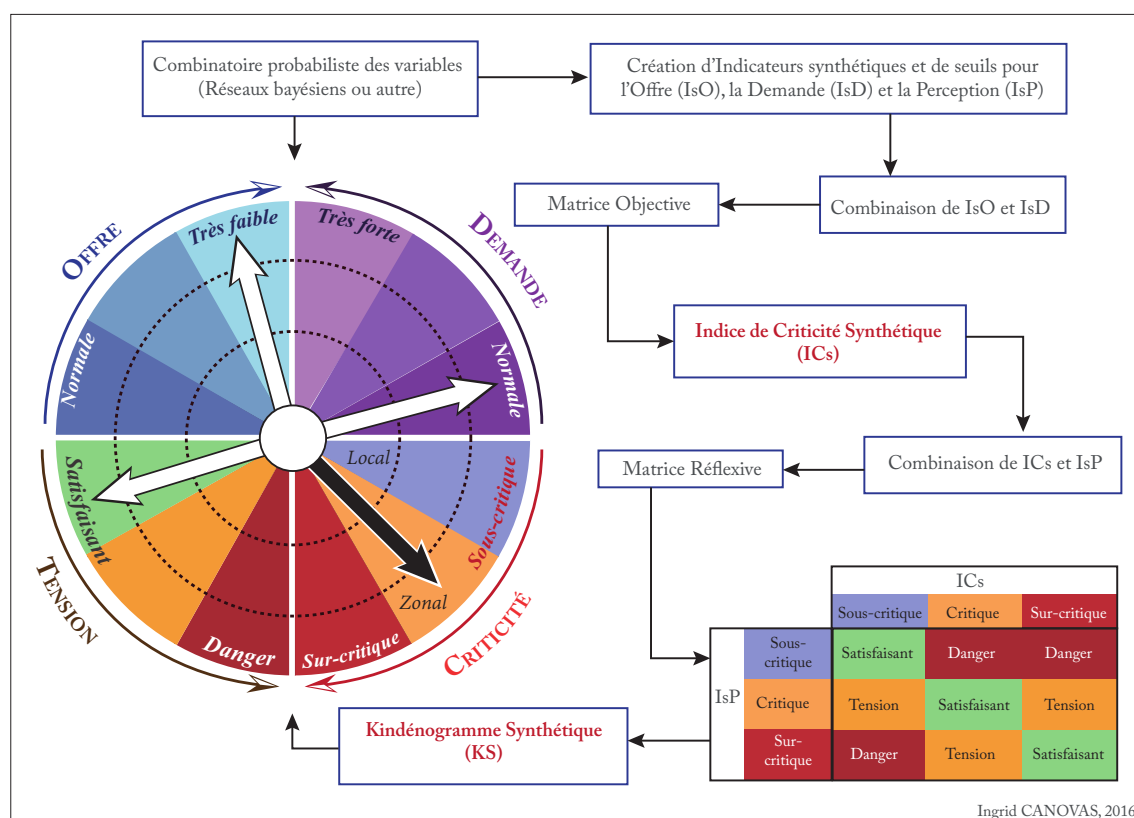


FIGURE 10.6 : ÉTAPES MÉTHODOLOGIQUES POUR LA DÉFINITION D'UN INDICE DE TENSION SUR LA RESSOURCE

L'emprise géographique de la situation évaluée peut quant à elle être spécifiée par la longueur de la flèche noire. Ainsi, une flèche longue associée à un état sur-critique traduirait l'existence d'un phénomène catastrophique de très grande ampleur. Cet outil graphique peut ainsi être décliné et adapté à toutes les échelles spatiales, notamment à petite échelle (bassin versant, département, voire région).

10.4 Automatisation et « transposabilité » de la méthode

Établir un bilan de situation en temps réel, que ce soit durant la période de veille ou pendant le suivi de l'avènement du phénomène, requiert une chaîne de traitement des données relativement complexe pour :

- La mise à jour des structures et des seuils statistiques - alimentation en continu des modèles ;
- La mise en à jour de la situation – génération des points de situation carto-graphiques (atlas).

Ces aspects impliqueraient donc une automatisation de collecte et sortie des informations, à une fréquence à déterminer (5, 10, 15 jours), en fonction de la dynamique du phénomène et de la sévérité affichée de la situation (FIGURE 10.7).

Il pourrait être ensuite envisagé de :

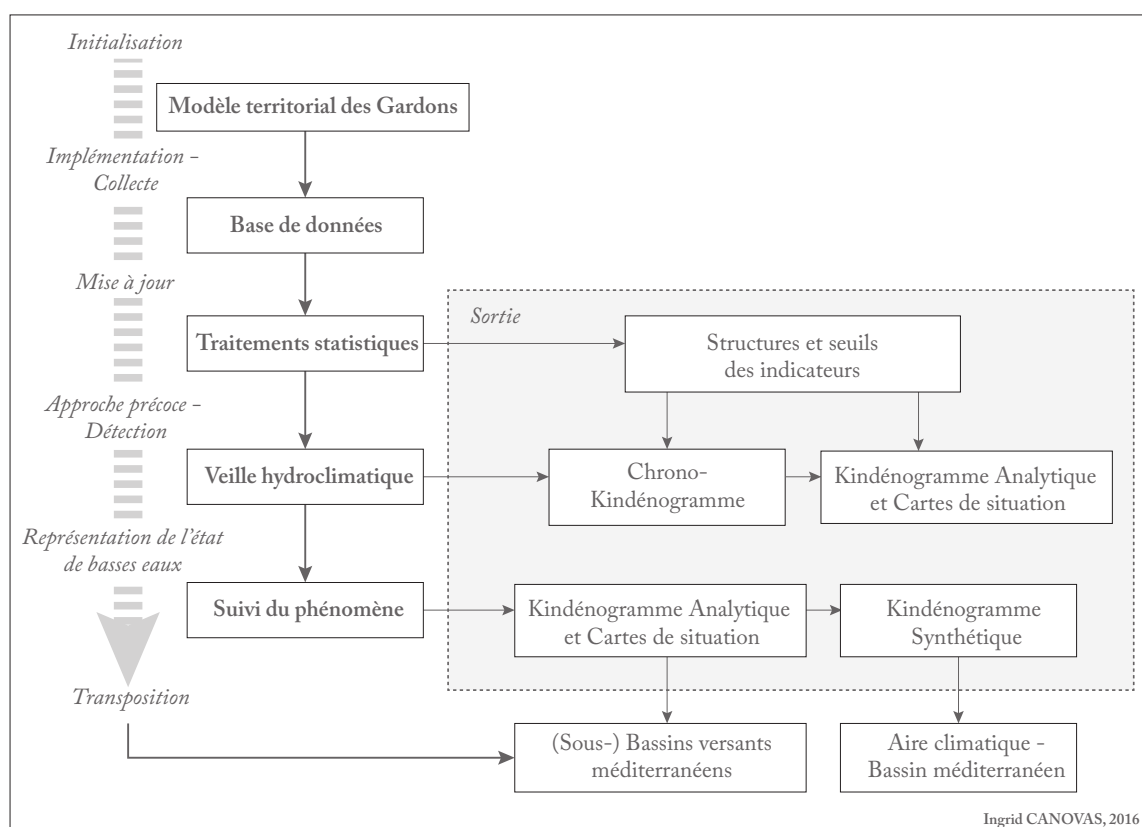


FIGURE 10.7 : LES ÉTAPES DE MISE EN ŒUVRE DE L'OUTIL : UNE NÉCESSAIRE AUTOMATISATION DE LA MÉTHODE

- Répliquer la méthode analytique (KA) sur d'autres bassins aux caractéristiques physiques et anthropiques proches (Cèze, Ardèche, etc.), afin de sa pertinence pour l'étude des basses eaux méditerranéennes ;
- Déployer la méthode synthétique (KS) sur un grand territoire méditerranéen, pour un suivi annuel homogène et une amélioration de la connaissance en termes de vulnérabilité de la ressource dans un contexte de changement climatique.

Conclusion — La méthode développée dans ce travail se destine à une mise en œuvre opérationnelle pour le suivi de l'évolution de la ressource en domaine méditerranéen, plus particulièrement en période sèche. En apportant une analyse spatiale et temporelle plus fine de la situation, mais toujours englobante, cette approche des basses eaux a été conçue de sorte à constituer un support d'aide à la décision pour les gestionnaires de la ressource (syndicats de bassin, préfecture, etc.), notamment de matière de prévention et de régulation des usages de l'eau (*i.e.* des arrêtés plus judicieusement pris dans le temps et dans l'espace).

Pour rendre effective la démarche, des ajustements méthodologiques ont été proposés (lissage de l'information fournie par les indicateurs journaliers, etc.), mais d'autres modulations restent à envisager. Les bases des outils d'analyse (KA et atlas carto-graphique) et de synthèse (KS) ainsi posées, il s'agit désormais d'étendre la réflexion aux modalités de détermination des seuils relatifs à l'Offre, à la Demande et à la Perception, qui leur seront associés.

Une fois le calibrage du modèle « basses eaux » validé, et l'automatisation de la chaîne de collecte, de traitement et de rendu de l'information mise en place, la méthode pourra ensuite être conduite sur d'autres territoires méditerranéens, aussi bien pour une analyse locale (bassin versant) que pour une synthèse plus globale (aire climatique).

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail est à considérer davantage comme un démonstrateur que réellement une étude de l'état de sécheresse du bassin versant du Gardon. Toutefois certains résultats sont directement applicables à cette rivière méditerranéenne et comme très certainement à bien d'autres (*e.g.* Cèze, Ardèche).

L'idée initiale ne consistait pas à établir des bilans de masse (en litre par jour par habitant, ou autres) comme c'est souvent le cas, mais à vérifier si une approche probabiliste, qui par définition est moins sujette à des situations particulières, était possible et, le cas échéant, à en expliciter les modalités.

L'objectif de ce travail a donc par exemple consisté à replacer au centre des méthodes d'évaluation de la ressource en eau, les demandes en eau environnementale et sociétale, tout en introduisant tant des problématiques locales que plus globales (approche multiscalaire), en lien avec les attentes et les perceptions sociales. Il ne s'agit donc pas ici de reproduire les processus hydrologiques (*i.e.* créer un modèle hydrologique), ni d'établir les liens (*i.e.* connections) entre les différents réservoirs présents sur les territoires concernés, mais de déterminer leurs états respectifs, que ces derniers soient interdépendants ou non.

Comment caractériser une tension entre l'offre et la demande en eau : approche probabiliste et heuristique — Pour cela, le concept de basses eaux a été précisé, de sorte de définir un écart négatif de la ressource disponible (qualitatif ou quantitatif) à la demande, qui doit correspondre à une situation de « manque hydrologique ». La criticité (et son évolution) analysée sous une forme probabiliste (fréquences des niveaux des variables et des combinaisons de variables) a ensuite été retenue comme une mesure de ce manque hydrologique, ou de ses degrés de gravité, qui peuvent alors se décliner en termes de tensions, tout en intégrant la perception sociale. Après une réflexion sur les approches classiques, les conditions techniques d'une modélisation heuristique de la criticité des basses eaux ont été présentées. À partir de l'identification des variables contribuant *a priori* à l'état des basses eaux, des modèles théoriques susceptibles de définir un état de basses eaux à différentes échelles ont été proposés. Cela a conduit à articuler des indices caractérisant :

- L'offre (IsO), en termes d'abondance en eau à un moment donné en un lieu donné ;
- La demande (IsD), définie comme la consommation souhaitée, mais ce pourrait être la consommation souhaitable dans le cadre d'une gestion plus durable ;

- La perception de la situation hydrologique et des décisions publiques (IsP), correspondant à la représentation que se fait la population de la situation observable, et aux décisions administratives prises en préfecture.

À partir de ces trois éléments, un indice de criticité synthétique peut être établi, et décliné en pour un moment donné et un territoire spécifié (*e.g.* sous-bassin, aquifère...).

Caractérisation du niveau de criticité, malgré un manque d'information dans un bassin versant pourtant assez bien suivi : constitution préalable d'une base de données critiquée — Le développement de l'approche a été réalisé en se fondant sur les informations disponibles pour le bassin des Gardons, compilées dans diverses bases de données en accès libre, à partir desquelles il a fallu :

- Identifier, pour les trois composantes (offre, demande, perception), ce qui est disponible et les moyens d'obtenir cette information ;
- Mesurer la nature et la qualité de ces données, ce qui a nécessité d'en faire la critique tant d'un point de vue métrologique qu'au regard de leur pertinence ;
- Apprécier l'échelle de leur validité : par exemple, la mesure de la qualité d'une eau de rivière en un lieu de baignade n'a de valeur que pour ce point ou sur les quelques centaines de mètres en amont et en aval (selon la nature et la charge de la pollution). Par contre, la variation du niveau piézométrique d'un aquifère relativement isotrope et inertiel a une validité plus étendue, etc. ;
- Mettre en évidence les lacunes et les manques en termes d'informations, aussi bien dans l'espace (*e.g.* faible densité des réseaux de mesure) que dans le temps (*e.g.* historicité, pas de temps).

Cette approche a donc conduit à une acquisition de données, reposant sur le choix de 14 variables jugées essentielles (11 en regroupant les prélèvements anthropiques), dont le nombre a été amené à varier selon les territoires, leur extension, la quantité et la qualité des informations disponibles. En effet, entre 5 et 9 variables (sans la prise en compte de la perception) ont été mobilisées pour l'élaboration des 9 modèles spécifiques aux sous-bassins du bassin des Gardons. À partir des informations collectées, une base de données propre à la thématique des basses eaux a été conçue, de sorte à :

- Intégrer des informations de toute nature, de toute résolution temporelle ;
- Annexer les données à l'échelle spatiale supposée correspondante ;
- Mobiliser l'ensemble des informations requises par un système de requêtes relativement simples et intuitives.

La chaîne de traitement qui s'en est suivie s'est quant à elle attachée à traiter, dans ce travail, particulièrement les variables hydro-climatiques fondamentales, à savoir : les volumes superficiel et souterrain et le forçage climatique. L'analyse a dans un premier temps été menée sur l'ensemble des postes de mesure disponibles (en service et hors service) et sur les phases de récession, définies par le jour du pic de crue le plus important observé entre le 1^{er} mars et le 15 juin de chaque année et le jour de l'étiage strict.

Mise en œuvre d'un nouveau modèle hydrologique différentiel afin de caractériser l'offre hydrologique — Les volumes superficiel et souterrain, caractérisés respectivement par la dynamique d'écoulement du cours d'eau et la dynamique de vidange des aquifères en récession, au travers de l'indice volumique journalier (I_{vj} et I_{HNj}), ont révélé une structuration généralement gaussienne, conforme, qui peut toutefois être améliorée sur certains postes piézométriques, en considérant par exemple la racine carrée des valeurs de I_{HNj} (anamorphose).

Cela étant, une grande irrégularité intra-annuelle de la dynamique de vidange superficielle et souterraine a été révélée à partir de l'ensemble des postes de mesure. Cette instabilité des résultats numériques est davantage marquée sur les séries issues des débits (I_{vj}) que sur celles établies à partir des données piézométriques, ce qui était attendu, les aquifères ayant un fonctionnement bien plus lissé. Cela a conduit à proposer un lissage de l'information obtenue en la calculant sur des durées de 3, 6, 9 jours, ceci afin d'avancer aussi vers une mise en œuvre opérationnelle ultérieure de ces indicateurs.

Par ailleurs, si globalement une bonne cohérence dans la structuration spatiale attendue de ces informations a été révélée, certaines incohérences ont été observées, ce qui laisse penser qu'il existe des facteurs locaux assez importants, qui ne permettent pas de retrouver une logique amont-aval attendue pour les I_{vj} , et une typologie hydrogéologique postulée pour les I_{HNj} .

Enfin, une structuration particulière de vidange des aquifères a été soulignée. Celle-ci est organisée en paliers. Il serait donc judicieux d'approfondir l'analyse de cette caractéristique, qui pourrait apporter une information complémentaire à l'analyse des basses eaux.

Description statistique de l'absence de pluie avec le modèle d'Estoup-Zipf étendu — Le forçage climatique a quant à lui été appréhendé au travers de l'information d'absence de « pluie utile » (*i.e.* précipitations brutes corrigées de l'ETP), définie à partir des longueurs de périodes (*i.e.* durées « sans pluie utile »). Une structure statistique parétienne a été établie sur les chroniques complètes et sur les chroniques issues des phases de récession des quatre postes offrant, sur ce territoire, les enregistrements les plus longs et dont l'influence supposée s'étend à l'ensemble du territoire. Les valeurs ont ensuite été modélisées grâce au modèle d'Estoup-Zipf, étendu par Mandelbrot et adapté par Ph. Martin (2016).

Détermination des seuils de criticité et processus de validation des modèles statistiques — Une fois l'analyse statistique conduite pour chaque variable, des seuils plus ou moins empiriques ont été définis, à partir desquels un état insatisfaisant est supposé se produire, puis une montée vers un état non désiré, progressivement critique. Dans le cas d'indicateurs à structure gaussienne avérée (I_{vj} et I_{HNj}), les seuils ont été fournis par l'écart-type (σ), dans l'autre ($IP0j$) par des césures au dire d'expert (pour le moment) dans la fréquence cumulée.

Les valeurs ont donc été réparties dans les classes correspondantes : l'état normal est borné par des valeurs comprises entre -1σ et 0σ pour les I_{vj} et les I_{HNj} , et entre des fréquences cumulées comprises entre 50 et 75 % pour les $IP0$.

La confrontation des états pris lors de situations passées et au regard de l'appréciation faite par les autorités publiques a été faite à partir des valeurs calculées sur les phases de récession, puis sur des cycles hydrologiques. Globalement, les résultats sont assez satisfaisants, dans la mesure où ils n'aboutissent pas à une information opposée à la situation évaluée, et les variables hydro-climatiques suivant une dynamique assez proche (pas d'évolution ou d'états affichés qui soient antagonistes). En revanche, il semblerait que :

- Les seuils ne soient pas bien ajustés (les situations super-critiques et exceptionnelles semblent trop fréquentes) ;
- Des facteurs locaux biaisent peut être l'analyse et créent des situations localement plus sévères qu'attendues ;
- La résolution de l'information journalière ne semble pas très adaptée, en raison de fluctuations qui brouillent le message sans apporter de précisions supplémentaires.

Il était en effet supposé une plus grande régularité de l'information hydrologique suite à la répartition des valeurs au sein des états définis par les seuils (*e.g.* lissage), ce qui ne s'avère pas être le cas.

Ajustement de la méthode dans une perspective opérationnelle — De ce constat, un premier ajustement de la méthode, en vue de sa mise en application à des fins opérationnelles, a été effectué. Les valeurs des indicateurs hydrologiques ont été lissées sur 9 jours (bien que les moyennes sur 6 jours semblent déjà convenables), et les durées « sans pluie utile » ont été définies sous un seuil de 3 mm. En effet, le seuil fixé initialement à zéro, ne s'avère pas forcément pertinent pour juger de la sévérité du forçage climatique en période estivale, même après soustraction de l'ETP. Il a donc été envisagé d'augmenter le seuil, de sorte à obtenir des durées plus longues, et donner plus de poids au facteur climatique pour juger de la sévérité de la situation.

À partir de ces nouvelles modalités, des propositions pour réaliser une analyse des phases précoces (logique de veille) et de suivi de l'évolution du phénomène, ont été avancées. L'analyse graphique chronologique (apportée par le chrono-kindénogramme), a conclu à la pertinence de l'IHnj comme indicateur d'alerte pour définir la date d'entrée en phase précoce de tension (généralement autour du 1^{er} mai sur le territoire des Gardons). En complément d'information, une évaluation probabilisée de la situation à tout instant, et à différentes échelles, a été proposée, au travers des représentations graphiques (Kindénogramme Analytique) et spatialisée (cartographie), à la fois individuelle et combinée des indicateurs. Ces deux représentations réunies sous la forme d'un atlas offrent un point de situation relativement simple et efficace.

Une série de configurations a ensuite été envisagée pour déterminer les modalités des combinaisons des indicateurs afin d'obtenir un indice synthétique d'offre. En considérant la fréquence la plus faible (situation rare), l'état global de l'offre est déterminé, au 1^{er} juillet 2012, sur le Gardon d'Anduze, par les précipitations et les débits. En revanche, en tenant compte de l'ensemble des fréquences (moyenne) ou de la fréquence la plus élevée, l'état global est déterminé par l'état des aquifères. Il faut donc pousser l'analyse et réfléchir plus amplement à cette question.

Enfin, des pistes méthodologiques ont été proposées pour poursuivre l'analyse et obtenir un indice de criticité et de tension, par combinaison empirique opérée via des matrices qualitatives.

Validation qualitative des hypothèses de base : mesure probabiliste de la tension sur les basses eaux et évaluation de leur appréciation par les autorités (approche réflexive) — Finalement, il a donc pu être vérifié que la majorité des variables d'offre (dites « naturelles ») peuvent être traduites en indicateurs présentant une distribution généralement gaussienne, ou à défaut une structure statistique, autorisant la définition de seuils statistiques explicites et probabilisés. Par extension, notre postulat initial stipulant que les tensions lors de basses eaux (et leurs évolutions) peuvent être caractérisées par une combinaison de distributions de probabilités demeure théoriquement valide.

La démarche a par ailleurs conduit à la présentation et la définition des Kinédogramme Analytique, chronologique et Synthétique, lesquels peuvent être vu comme des outils de caractérisation semi-empiriques du niveau de tension sur la ressource à partir d'indicateurs issus d'une approche probabiliste de variables naturelles et potentiellement de variables anthropiques. Ils ont été conçus pour être aussi « parlants » (intuitifs) que possible et adaptés à des populations de spécialistes et de non-spécialistes (*e.g.* élus, gestionnaires, populations pérennes ou saisonnières). Ceci ouvre sur la possibilité de développer une hydrologie participative et nous l'espérons sur une gestion moins conflictuelle de la ressource en eau en particulier en été dans les amonts du bassin des Gardons où la ressource est très faible.

Toutefois, des ajustements de la méthode sont encore à prévoir, parmi lesquels certains d'entre eux peuvent d'ores et déjà être évoqués :

- Le calcul des I_{vj} et des I_{HNj} (qui s'effectue sur 2 jours) peut être envisagé sur plusieurs jours (et non plus en moyennant l'information de n jours), ce qui nécessite alors de refaire l'analyse fréquentielle ; ce développement appellera avant la réalisation d'un outil numérique plus adapté ;
- L'analyse de la structure statistique des IPO peut être menée à partir de seuils supérieurs à 3 mm ; il devient alors possible de chercher une structure en fonction des seuils et de spatialiser cette variation plutôt que les résultats obtenus selon les seuils eux-mêmes ;
- Les seuils statistiques relatifs aux trois indicateurs pourraient être mieux définis (*e.g.* meilleure cohérence entre les seuils fixés avec les écart-types et les fréquences cumulées, réduction ou augmentation des valeurs des bornes).

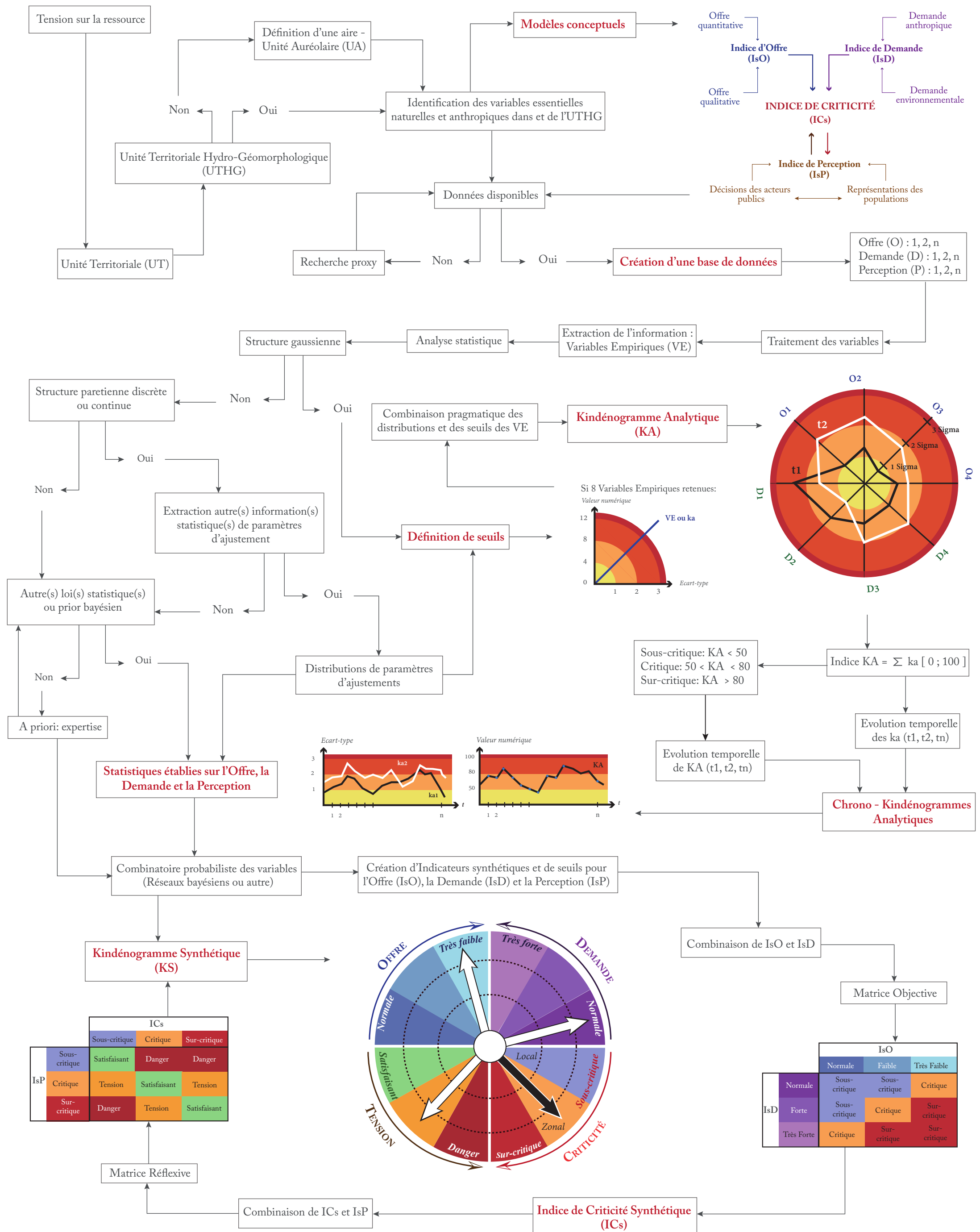
Il faudrait également pousser la réflexion sur les modalités de croisement des indicateurs et des indices qui en découlent. Cela revient à définir les fréquences à affecter aux bornes des trois seuils définis pour l'indice d'offre, de demande et de perception, ainsi que le critère à prendre en compte pour traduire l'état synthétique de chacun (*e.g.* la fréquence la plus basse, la plus forte).

Par ailleurs, il est possible de compléter la méthode en intégrant l'information des pluies entre les durées « sans pluie utile », pour pondérer l'information de l'absence de pluie (poids plus fort si le cumul antérieur est très faible et plus faible si le cumul antérieur est très important, par exemple).

De plus, il est envisageable de développer une approche similaire sur d'autres indicateurs identifiés comme potentiellement pertinents à l'échelle annuelle.

Enfin, il reste à mieux prendre en compte les variables relatives à la qualité des eaux et les informations relatives à la perception des populations. La difficulté étant ici la rareté de l'information, il a fallu d'une part réfléchir à un possible mode dégradé de modélisation, et donc au nombre minimal nécessaire de variables à une caractérisation, et d'autre part, faire des propositions pour améliorer le système de collecte des informations de base.

PROCESSUS DE MODÉLISATION HEURISTIQUE DE LA CRITCITÉ DES BASSES EAUX DES TERRITOIRES MÉDITERRANÉENS



BIBLIOGRAPHIE

- ABI-ZEID, I. et BOBÉE, B. (1999). La modélisation stochastique des étiages : une revue bibliographique. *Revue des sciences de l'eau*, 12(3) :459–484.
- ALI, S., GHOSH, N. et SINGH, R. (2010). Rainfall–runoff simulation using a normalized antecedent precipitation index. *Hydrological Sciences Journal*, 55(2) :266–274.
- ASCHAN-LEYGONIE, C. (2000). Vers une analyse de la resilience des systèmes spatiaux. *Espace géographique*, 29(1) :64–77.
- ASCHWANDEN, H. et KAN, C. (1999). Le débit d'étiage Q347 - Etat de la question. *Communications hydrologiques*, 27.
- BAILLY, F. et LONGO, G. (2006). Situations critiques étendues : la singularité physique du vivant 1.
- BAK, P., CHEN, K. et CREUTZ, M. (1989). Self-organized criticality in the game of life. *Nature*, 342(6251) :780–782.
- BARBIER, R., BARRETEAU, O. et BRETON, C. (2007). Gestion de la rareté de l'eau : entre application négociée du décret "sécheresse" et émergence d'arrangements locaux. *Ingénieries-EAT*, 50 :3–19.
- BÉOUTIS, A., JEAN, P. et COLAS, S. (2005). L'Observatoire du littoral. Démographie et économie du littoral. *Les dossiers de l'Observatoire du littoral*, page 22.
- BERNIER, J. (1964). La prévision statistique des bas débits. *Symposium on Surface Waters. General Assembly of Berkeley - AIHS*, 63 :340 – 361.
- BESCHTA, R. L., ZIEMAR, R. R., O'LOUGHLIN, C. L. et HAMILTON, L. S. (1990). Peakflow estimation using an antecedent precipitation index (API) model in tropical environments. *IAHS Publication*, (192) :128–137.
- BLONDEL, P. et BRUNEL, C. (2004). Etude et hiérarchisation du risque infectieux nosocomial selon la criticité : nouvelle approche. *Risques & qualité en milieu de soins*, (3) :17–23.
- BOLLE, H.-J. (2003). Climate, climate variability, and impacts in the Mediterranean area : an overview. In *Mediterranean Climate*, pages 5–86. Berlin Heidelberg, Springer édition.
- BOUCHON, S. (2011). *L'identification des infrastructures critiques : réflexion à partir de l'ensemble européen*. Thèse de doctorat, Paris X Nanterre.

- BOÉ, J., TERRAY, L. et MARTIN, E. (2009). Projected changes in components of the hydrological cycle in French river basins during the 21st century. *Water Resources Research*, 45(8).
- BROWN, A. et MATLOCK, M. D. (2011). A Review of Water Scarcity Indices and Methodologies. *White paper*, 106.
- BUCHS, A. (2012). *Observer, caractériser et comprendre la pénurie en eau. Une approche institutionnaliste de l'évolution du mode d'usage de l'eau en Espagne et au Maroc*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble.
- CANCELLIERE, A., DI MAURO, G. et BONACCORSO, B. (2001). Drought forecasting using the standardized precipitation index. *Water resources management*, 21(5) :801–819.
- CANOVAS, I., MARTIN, P. et SAUVAGNARGUES, S. (2016). Modélisation heuristique de la criticité des basses eaux en région méditerranéenne. *Physio-Géo*, 10 :191–210.
- CATALOGNE, C. (2012). *Amélioration des méthodes de prédétermination des débits de référence d'étiage en sites peu ou pas jaugés*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble.
- CATCHE, S. (2013). *Analyse des défauts de paroi de trou et de leur criticité sur la tenue mécanique des structures composites percées*. Thèse de doctorat, Toulouse, INSA.
- CHAOUCHE, K., NEPPEL, L., DIEULIN, C., PUJOL, N., LADOUCHE, B., MARTIN, E., SALAS, D. et CABALLERO, Y. (2010). Analyses of precipitation, temperature and evapotranspiration in a French Mediterranean region in the context of climate change. *Comptes Rendus Géoscience*, 342 :234–243.
- CHEN, Y., HUANG, G. et SHAO, Q. (2006). Regional analysis of low flow using L-moments for Dongjiang basin, South China. *Hydrological Sciences Journal*, 51(6) :1051–1064.
- CHEVALIER, P. (1983). L'indice des précipitations antérieures fivaluation. *Cahiers de l'ORSTOM*, XX(3 et 4) :179–190.
- COSANDEY, C. (1995). La forêt réduit-elle l'écoulement annuel? *Annales de Géographie*, 104(581/582) :7–25.
- COSANDEY, C., BOUDJEMLINE, D., ROOSE, E. et LELONG, F. (1990). Etude expérimentale du ruissellement sur des sols à végétation contrastée du Mont Lozère. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 34(1) :61–73.
- COSANDEY, C. et ROBINSON, M. (2000). *Hydrologie continentale*. Paris, Armand Colin édition.
- COSANDEY, C., VAZKEN, A., MARTIN, C., DIDON-LESCOT, J.-F., LAVABRE, J., FOLTON, N., MATHYS, N. et RICHARD, D. (2005). The hydrological impact of the mediterranean forest : a review of French research. *Journal of Hydrology*, 301(1-4) :235–249.
- DACHARRY, M. (1996). Dictionnaire français d'hydrologie.

- DAUPHINÉ, A. et PROVITOLO, D. (2007). La résilience : un concept pour la gestion des risques. *Annales de géographie*, 2(654) :115–125.
- DAUPHINÉ, A. et PROVITOLO, D. (2013). *Risques et catastrophes : observer, spatialiser, comprendre, gérer*. Armand Colin.
- DE GROOT, R. S., WILSON, M. A. et BOUMANS, R. M. J. (2002). A typology for the classification , description and valuation of ecosystem functions , goods and services. *Ecological Economics*, 41(The Dynamics and Value of Ecosystem Services : Integrating Economic and Ecological Perspectives) : 393–408.
- DE MARSILY, G. (1981). *Hydrogéologie quantitative*. Masson édition.
- DÉQUÉ, M. (2007). Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario : model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, 57(1) :16–26.
- D'ERCOLE, R. et PIGEON, P. (1999). L'expertise internationale des risques dits naturels : intérêt géographique/Geographical relevance of natural risk assessment on an international scale. *Annales de Géographie*, 108(608) :339–457.
- EKELAND, I. (1977). La théorie des catastrophes. *La recherche*, 81 :745–754.
- EKINS, P. (2003). Identifying critical natural capital Conclusions about critical natural capital. *Ecological Economics*, 44 :277–292.
- EKINS, P., SIMON, S., DEUTSCH, L., FOLKE, C. et DE GROOT, R. S. (2003). A framework for the practical application of the concepts of critical natural capital and strong sustainability. *Ecological Economics*, 44 :165–185.
- FALKENMARK, M. (1989). The massive water scarcity threatening Africa-why isn't it being addressed. *Ambio*, 2(18) :112–118.
- FARGES, G. (2015). Criticité des dispositifs médicaux : méthodes et taux normé. *IRBM News*, 2(36) :51–55.
- FEDORA, M. A. et BESCHTA, R. L. (1989). Storm runoff simulation using an antecedent precipitation index (API) model. *Journal of Hydrology*, 112(1) :121–133.
- FEITELSON, E. et CHENOWETH, J. (2002). Water poverty : towards a meaningful indicator. *Water Policy*, 4(3) :263–281.
- FRÉCAUT, R. (1975). Contribution à l'étude statistique des étiages . Application au domaine tempéré océanique. *Revue Géographique de l'est*, 15(1-2) :89–99.
- FRÉCAUT, R. (1979). 2e thème : Étiages (Low waters). Application à l'Afrique occidentale et centrale du Nord-Ouest (Low waters in Western and central Africa). *Bulletin de l'Association de géographes français*, 459(56e année) :61–71.

- GALÉA, G., JAVELLE, P. et CHAPUT, N. (2000). Un modèle débit-durée-fréquence pour caractériser le régime d'étiage d'un bassin versant. *Revue des sciences de l'eau*, 13(4) :421.
- GALÉA, G., MERCIER, G. et ADLER, M. J. (1999). Modèles débit-durée-fréquence d'étiage, concept et usage pour une approche régionale des régimes de basses eaux des bassins hydrographiques de la Loire (France) et du Crisu-Alb (Roumanie). *Revue des sciences de l'eau*, 12(1) :93.
- GALÉA, G., MIC, R. et GHIOCA, M. (2007). Modélisation statistique des modules annuels et des étiages du bassin roumain du Timis-Bega, similitudes régionales avec la Moselle française. *Revue des sciences de l'eau*, 20(1) :71.
- GARNIER, E. (2009). Bassesses extraordinaires et grandes chaleurs. 500 ans de sécheresses et de chaleurs en France et dans les pays limitrophes. In *Colloque 193 SHF : « Etiages, Sécheresses, Canicules rares et leurs impacts sur les usages de l'eau »*, Lyon.
- GIEC (2007). *Climate Change 2007 : An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- GIEC (2013). *Changement climatiques 2013 – Les éléments scientifiques*.
- GIRET, A. (2002). L'hydrologie de la Charente entre nature et anthropisation (1960-1994). *Science et changements planétaires / Sécheresse*, 13(2) :105–12.
- GIUNTOLI, I., RENARD, B., VIDAL, J.-P. et BARD, A. (2013). Low flows in France and their relationship to large-scale climate indices. *Journal of Hydrology*, 482 :105–118.
- GRIFFIN, D. et ANCHUKAITIS, K. (2014). How unusual is the 2012 – 2014 California drought? pages 9017–9023.
- GUSTARD, A. et DEMUTH, S. (2008). Manual on Low-flow Estimation and Prediction. *World Meteorological Organization, Operational Report*, 50 :136.
- GUSTARD, A. et GROSS, R. (1989). Low flow regimes of Northern and Western Europe. *FRIENDS in Hydrology*, pages 205–212.
- GUTTMAN, N. (1998). Comparing the Palmer drought index and the Standardized Precipitation Index. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1) :311–322.
- HAYES, M. J., SVOBODA, M. D., WILHITE, D. a. et VANYARKHO, O. V. (1999). Monitoring the 1996 Drought Using the Standardized Precipitation Index. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(3) :429–438.
- HEDDINGHAUS, T. R. et SABOL, P. (1991). A review of the Palmer Drought Severity Index and where do we go from here. *Proc. 7th Conf. on Applied Climatology*, pages 242–246.
- HEIM JR, R. R. (2002). Century Drought Indices Used in the United States. *American Meteorological Society*, pages 1149–1165.

- HERMANN, F., KELLER, L. et KUNKEL, R. (2015). Determination of spatially differentiated water balance components including groundwater recharge on the Federal State level—A case study using the mGROWA model in North Rhine-Westphalia (Germany). *Journal of Hydrology : Regional Studies*, 4(294-312).
- HINGRAY, B., PICOUET, C. et MUSY, A. (2009). *Hydrologie : Une science pour l'ingénieur*, volume 2. PPUR presses polytechniques.
- HOLLING, C. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4 :1–23.
- HUMBERT, J. et KADEN, U. (1994). Détection des modifications de l'écoulement fluvial au moyen de l'indice de débit de base. *Revue de géographie alpine*, 82(2) :25–36.
- IPCC (2014). *Climate Change 2014 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B : Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, volume 53. Cambridge.
- IRSN (2010). Guide d'analyse - Les risques de criticité et leur prévention dans les usines et les laboratoires. Rapport technique.
- JHA, M. K. (2010). *Natural and Anthropogenic Disasters : Vulnerability, Preparedness and Mitigation*. Springer édition.
- JOLY, D., BROSSARD, T., CARDOT, H., CAVAILHES, J., HILAL, M. et WAVRESKY, P. (2010). Les types de climats en France, une construction spatiale. *Cybergeo : European Journal of Geography*.
- LACEY, G. et GRAYSON, R. (1998). Relating baseflow to catchment properties in south-eastern Australia. *Journal of Hydrology*, 204(1-4) :231–250.
- LAMBERT, R., LAMI, J. M. et SENGES, F. (1990). La sécheresse de 1989 dans le bassin de la Garonne (à l'amont du Mas d'Agenais). In *Université de Toulouse-Mirail*.
- LANG, C. (2007). *Etiages et tarissements : vers quelles modélisations ? L'approche conceptuelle et l'analyse statistique en réponse à la diversité spatiale des écoulements en étiage des cours d'eau de l'Est français*. Thèse de doctorat, Metz.
- LANG, C. et GILLE, E. (2006). Une méthode d'analyse du tarissement des cours d'eau pour la prévision des débits d'étiage. *Noroi*, 201.
- LANG DELUS, C. (2011). Les étiages : définitions hydrologique, statistique et seuils réglementaires. *Cybergeo : European Journal of Geography*.
- LAWRENCE, P. R., MEIGH, J. et SULLIVAN, C. (2002). *The water poverty index : an international comparison*. Department of Economics, Keele University Keele, Staffordshire, UK.

- LE BISSONNAIS, Y. et GASCUEL-ODOUX, C. (1998). *L'érosion hydrique des sols cultivés en milieu tempéré*. Paris, INRA édition.
- LESPINAS, F. (2008). *Impacts du changement climatique sur l'hydrologie des fleuves côtiers en région Languedoc-Roussillon*. Thèse de doctorat, Perpignan.
- LHOMME, J., HUMBERT, J. et FARGES, G. (2013). Nouvelle méthode pour l'analyse de la criticité des dispositifs médicaux en exploitation (mace). *IRBM News*, 34(5-6) :150–4.
- LIVADA, I. et ASSIMAKOPOULOS, V. (2007). Spatial and temporal analysis of drought in Greece using the Standardized Precipitation Index (SPI). *Theoretical and applied climatology*, 89(3-4) :143–153.
- LÉONE, F. et VINET, F. (2006). La vulnérabilité, un concept fondamental au cœur des méthodes d'évaluation des risques naturels. La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles. *Analyses géographiques–Géorisques*, 1 :9–25.
- MARGAT, J. (2005). Quels indicateurs pertinents de la pénurie d'eau ? *Géocarrefour*, 80(4) :261–262.
- MARGAT, J. et VALLEE, D. (1999). Vision méditerranéenne sur l'eau , la population et l'environnement au XXI ème siècle. Rapport technique, Plan Bleu.
- MARTIN, P. (1998). Possibilité d'alimentation en eau de la population romaine de Nîmes par la Fontaine de Nîmes et la Fontaine d'Eure (Uzès, Gard). *Étude de géographie physique*.
- MARTIN, P. (2016). Modélisation des longueurs des périodes sans pluies supérieures à différents seuils de la chronique de Marseille (1864-2008). *Physio-Géo*, 10.
- MARTIN, P. (a.p.). Nouveau modèle hydrologique différentiel (MHD). Application aux cycles et récessions de la fontaine de vaucluse mesurés entre 1967 et 2014. *À paraître*.
- MARTIN, R. (2015). *Design of an architecture for measurement and diagnosis of physical parameters in critical airborne systems*. Theses, Université de Bordeaux.
- MAY, R. (1977). Thresholds and breakpoints in ecosystems with a multiplicity of stable states. *Nature*, 269.
- MAZEAUD, A. (2011). Quel est le bon débit de l'eau ? Les régulations territoriales sur les usages de l'eau à l'épreuve de la DCE. *Pôle Sud* 2, 35 :59–75.
- MEYLAN, P., FAVRE, A.-C. et MUSY, A. (2008). *Hydrologie fréquentielle : une science prédictive*. PPUR presses polytechniques.
- MOLLE, F. et MOLLINGA, P. (2003). Water poverty indicators : conceptual problems and policy issues. *Water Policy*, 5(5) :529–544.
- MORTUREUX, Y. (2002). Analyse préliminaire de risques. *Techniques de l'ingénieur, SE. Sécurité et gestion des risques*, 4010.

- NATHAN, R. J. et McMAHON, T. A. (1990). Practical aspects of low flow frequency analysis. *Water Resources Research*, 26(9) :2135–2141.
- NATHAN, R. J. et McMAHON, T. A. (1992). Estimating low flow characteristics in ungauged catchments. *Water Resources Management*, 6(2) :85–100.
- OHLSSON, L. (2000). Water conflicts and social resource scarcity. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B : Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(3) :213–220.
- OMM (2012). Guide d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé.
- PALMER, W. C. (1965). *Meteorological drought*, volume 30. US Department of Commerce, Weather Bureau Washington, DC.
- PASCUAL, M. et GUICHARD, F. (2005). Criticality and disturbance in spatial ecological systems. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(2) :88–95.
- PIGEON, P. (2002). Réflexions sur les notions et les méthodes en géographie des risques dits naturels. *Annales de Géographie*, 111(627) :452–470.
- PLAN BLEU (2008). Changement climatique et énergie en Méditerranée. Rapport technique, Sophia Antipolis.
- PYRCE, R. (2004). Hydrological Low Flow Indices and their Uses. Rapport technique, Watershed Science Centre, Peterborough, Ontario.
- QUINTANA SEGUÍ, P. (2008). *Simulation hydrologique en région méditerranéenne avec SAFRAN-ISBA-MODCOU : amélioration de la physique et évaluation des risques dans le cadre du changement climatique*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier.
- RIJSBERMAN, F. R. (2006). Water scarcity : Fact or fiction ? *Agricultural Water Management*, 80(1-3 SPEC. ISS.) :5–22.
- ROCHE, M. (1963). *Hydrologie de surface*. Gauthier-Villars édit., Paris.
- ROCHE, M. (1986). *Dictionnaire français d'hydrologie de surface*. Masson édition.
- ROCHE, P.-A., MIQUEL, J. et GAUME, E. (2012). *Hydrologie quantitative : Processus, modèles et aide à la décision*. Springer Science & Business Media.
- RODIER, J. (1981). Phénomènes hydrologiques extrêmes - Sécheresses et crues exceptionnelles. Conférence internationale sur l'hydrologie et les bases scientifiques de la gestion rationnelle des ressources en eau.
- RUF, T. (2015). Transférer l'eau du Rhône dans le Languedoc : regard critique sur les incidences du projet aqua domitia et les contradictions territoriales. *Territoire en mouvement Revue de géographie et aménagement. Territory in movement Journal of geography and planning*, (25-26).

- SAGASPE, L. (2008). *Allocation sûre dans les systèmes aéronautiques : Modélisation, Vérification et Génération*. Thèse de doctorat, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I.
- SCHEFFER, M., CARPENTER, S., FOLEY, J. A., FOLKE, C. et WALKER, B. (2001). Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 413.
- SCHEFFER, M. et CARPENTER, S. R. (2003). Catastrophic regime shifts in ecosystems : linking theory to observation. *Trends in Ecology & Evolution*, 18(12) :648–656.
- SCHREFFLER, C. (1998). Low-flow statistics of selected streams in Chester County. Rapport technique, Water- Resources Investigations, Pennsylvania.
- SEILER, R. A., HAYES, M. et BRESSAN, L. (2002). Using the standardized precipitation index for flood risk monitoring. *International journal of climatology*, 22(11) :1365–1376.
- SMAKHTIN, V. (2001). Low flow hydrology : a review. *Journal of Hydrology*, 240(3-4) :147–186.
- SOLÉ, R. V., MANRUBIA, S. C., BENTON, M., KAUFFMAN, S. et BAK, P. (1999). Criticality and scaling in evolutionary ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 14(4) :156–160.
- SOUCHON, Y., VALENTIN, S. et CAPRA, H. (1998). Peut-on rendre plus objective la détermination des débits réservés par une approche scientifique ? *La Houille Blanche*, 8 :41–45.
- SULLIVAN, C. (2002). Calculating a Water Poverty Index. *World Development*, 30(7) :1195–1210.
- SULLIVAN, C., MEIGH, J. et LAWRENCE, P. (2006). Application of the Water Poverty Index at Different Scales : A Cautionary Tale : In memory of Jeremy Meigh who gave his life's work to the improvement of peoples lives. *Water international*, 31(3) :412–426.
- SVENSSON, C., KUNDZEWICZ, W. Z. et MAURER, T. (2005). Trend detection in river flow series : 2. Flood and low-flow index series / Détection de tendance dans des séries de débit fluvial : 2. Séries d'indices de crue et d'étiage. *Hydrological Sciences Journal*, 50(5) :824.
- TALLAKSEN, Lena M. and Madsen, H. et CLAUSEN, B. (1997). On the definition and modelling of streamflow drought duration and deficit volume. *Hydrological Sciences Journal*, 42(1) :15–33.
- TALLAKSEN, L. M. et HISDAL, H. (1997). Regional analysis of extreme streamflow drought duration and deficit volume. *IAHS Publication*, 246 :141–150.
- TIXIER, J., DUSSERRE, G., SALVI, O. et GASTON, D. (2002). Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants. *Journal of Loss Prevention in the process industries*, 15(4) :291–303.
- TREYER, S. (2006). *A quelle raréfaction de l'eau faut-il se préparer ? Construire une intervention prospective au service de la planification pour les ressources en eau en Tunisie*. Thèse de doctorat, ENGREF.
- TÜRKEŞ, M. et TATLI, H. (2009). Use of the standardized precipitation index (SPI) and a modified SPI for shaping the drought probabilities over Turkey. *International Journal of Climatology*, 29(15) :2270–2282.

- VICENTE-SERRANO, S. M. et LÓPEZ-MORENO, J. I. (2005). Hydrological response to different time scales of climatological drought : an evaluation of the Standardized Precipitation Index in a mountainous Mediterranean basin. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 9(5) :523–533.
- WALKER, B. et MEYERS, J. A. (2004). Thresholds in Ecological and Social – Ecological Systems : a Developing Database. *Ecology and Society*, 9(2).
- WILHITE, D. A. (1994). *Preparing for drought : A guidebook for developing countries*. Diane publ édition.
- WILHITE, D. A. (2005). *Drought and Water Crises : Science, Technology, and Management Issues*. Taylor and édition.
- WILHITE, D. A. (2012). *Drought Assessment, Management, and Planning : Theory and Case Studies : Theory and Case Studies (Vol. 2)*. Springer s édition.
- WILHITE, D. A. et GLANTZ, M. (1985). Understanding the Drought Phenomenon : The Role of Definitions. *Water International*, 10(3) :111–120.
- WILHITE, D. A., SVOBODA, M. D. et HAYES, M. J. (2007). Understanding the complex impacts of drought : A key to enhancing drought mitigation and preparedness. *Water Resources Management*, 21(5) :763–774.

MODELISATION DE LA MONTEE VERS UN ETAT CRITIQUE DE LA SITUATION DE BASSES EAUX SOUS FORÇAGES NATUREL ET ANTHROPIQUE EN REGION MEDITERRANEEENNE

L'eau et la vie sont inégalement réparties. Ceci entrave le développement des sociétés, et fait apparaître des situations de tension, dont l'intensité et la fréquence varient selon le contexte climatique, la densité des populations et donc de la demande. Avec le changement climatique en cours et la hausse des besoins en eau (dont la « réserve » à laisser aux milieux naturels), le niveau des tensions est susceptible de s'élever, et la fréquence des très basses eaux de s'accroître. Dans le sud-est de la France, l'aire soumise au climat méditerranéen est particulièrement concernée par la fragilité des ressources en eau en période estivale (une saison très peu arrosée et une forte attractivité touristique, etc.). De plus, une modification du régime climatique (diminution des apports pluviométriques, extrêmes plus marqués, etc.) affectera nécessairement davantage les bassins alimentés par des ressources très locales, tels les cours d'eau et les bassins de vie ne bénéficiant pas de l'influence des grands fleuves allogènes à l'aire climatique méditerranéenne (Rhône, Durance, etc.).

La réflexion sur le manque ou la pénurie en eau, de qualité propre pour satisfaire les usages sur ces territoires, peut dès lors être portée sur la façon dont un tel risque se construit (succession des étapes, retentissement d'un facteur sur les autres, etc.), et sur la façon dont l'évolution des éléments structurels et des forçages extérieurs conduit ou non à s'approcher d'une situation indésirable.

La démarche engagée ici propose de décliner cette approche particulière aux basses eaux. Il s'agit alors de répondre à un triple objectif : (1) identifier et compiler au sein d'une base de données spécifique les informations essentielles pour appréhender le phénomène ; (2) caractériser l'état moyen des basses eaux à partir de situations locales et par le biais de descripteurs statistiques robustes ; (3) déterminer les modalités de son évolution vers des états critiques. Ce travail conduit dans un premier temps au développement d'une modélisation probabiliste, laquelle est conçue pour être déployée dans différentes échelles spatiales et dans différentes temporalités. La réflexion est ensuite étendue aux modalités méthodologiques et techniques pour l'élaboration d'indicateurs analytiques et d'indices synthétiques d'évaluation de la situation de tension sur la ressource.

La démarche aboutit enfin à des outils numériques simples et intuitifs, mobilisables à des fins opérationnelles comme support d'aide à la décision pour la mise en place de mesures d'anticipation et de régulation, et transposables à tout territoire méditerranéen.

Mots-clés : criticité, basses eaux, climat méditerranéen, modélisation probabiliste, indicateurs statistiques, kindénogramme

MODELING THE RISE TO A CRITICAL STATE OF THE LOW WATER SITUATION UNDER NATURAL AND ANTHROPOGENIC PRESSURES IN THE MEDITERRANEAN BASIN

Water and life are unequally distributed. This hinders the development of societies, and leads to situations of tension, whose intensity and frequency vary according to climatic conditions, population density and according therefore to demand. With the ongoing climate change and the rising water requirements (the stock dedicated to the natural environment), the level of tension is likely to rise, such as the frequency of very low water. The French Mediterranean territories are particularly concerned with the fragility of water resources during summertime (a little watered season, a strong tourist appeal, etc.). In addition, every modification in the climate regime (the decreasing of rainfall inputs, etc.) would necessarily affect more the small catchment with very local resources, such as rivers and living areas which don't benefit from the influence of major rivers (Rhône, Durance, etc.).

The reflection on water scarcity can therefore be focused on the structure of such a risk (sequence of steps, the impact of one factor on the others, etc.), and on the conditions that make the system reach an undesirable situation.

The approach adopted here suggests to decline this particular approach to low water. Three objectives are here stated: (1) identify and compile, within a specific database, the essential information to understand the phenomenon; (2) characterize the mean state of low water from local situations and through robust statistical descriptors; (3) determine the terms of its evolution to critical states.

The whole work leads first to the development of a probabilistic modeling, which is designed to be deployed in different spatial scales and in different times. The reflection is then extended to the methodological and technical arrangements that would allow the development of analytical indicators and synthetic indexes for assessing the resource level of tension.

The approach finally results in simple and intuitive digital tools, that can be mobilized for operational purposes such as decision-making support for the implementation of anticipatory measures and regulation, and that can transferable to any Mediterranean territory.

Keywords : criticity, low water, Mediterranean climate, probabilistic modeling, statistical indexes, kindenogram