Description détaillée de l'algorithme de déstockage de la réserve agricole de Serre-Ponçon et du débit réservé de la Durance – Commission Exécutive de la Durance et EDF

Kevin Daudin, François Charron, Gilles Belaud

▶ **To cite this version:**

Kevin Daudin, François Charron, Gilles Belaud. Description détaillée de l'algorithme de déstockage de la réserve agricole de Serre-Ponçon et du débit réservé de la Durance – Commission Exécutive de la Durance et EDF. Institut Agro Montpelier. 2024, 24 p. hal-04528687

HAL Id: hal-04528687
https://hal.inrae.fr/hal-04528687

Submitted on 1 Apr 2024

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.

Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Description détaillée de l'algorithme de déstockage de la réserve agricole de Serre-Ponçon et du débit réservé de la Durance – Commission Exécutive de la Durance et EDF

Kevin DAUDIN
François CHARRON
Gilles BELAUD

Novembre 2023

Auteurs : Kevin Daudin (Institut Agro Montpellier, G-EAU, ingénieur d'études), François Charron (Institut Agro Montpellier, directeur-adjoint domaine du Merle), Gilles Belaud (Institut Agro Montpellier, G-EAU)

Version : rapport final pour la Commission Exécutive Durance

Travail réalisée en partenariat avec :

Table des matières

Objet de l'étude ..... **Erreur ! Signet non défini.**
La Commission Exécutive Durance 4
Chaine Durance-Verdon 5
Principes de l'algorithme de déstockage 5
Résultats des calculs 6
Gestion de crise 8
Description spatiale et schématique 10
Description mathématique simplifiée 11
Analyse statistiques 12
Mesures pour l'algorithme 14
Principes de mesure utilisés 14
Capteurs utilisés 14
Modèles de calcul des débits 14
Procédure de lissage 16
Evolutions de l'algorithme (version 2019) 17
Débits réservés, écoulements visibles et salubrité 17
Prélèvements en moyenne Durance 17
Evaporation sur les retenues 17
Transferts d'eau en région PACA 18
Hydroélectricité 18
Canal de Provence 19
Tourisme 20
Aides à la compréhension 22
Algorithme 23
Termes utilisés 23
Système de mesure 23

Objet et cadre de l'étude

Dans le cadre de la mise en œuvre de la réglementation nationale sur l'augmentation du débit réservé, la DREAL, la DRAAF, EDF et la CED ont élaboré un protocole en vue de la répartir sur le concessionnaire de la Durance, EDF, propriétaire des prises d'eau sur la Basse Durance, et à la fois sur les gestionnaires de canaux alimentés par ces prises. A cette occasion, l'algorithme décrivant le calcul du déstockage de la réserve agricole du barrage de Serre-Ponçon a fait l'objet d'une révision. La CED souhaite que ses membres puissent s'approprier l'histoire de l'algorithme, sa logique, et puissent comprendre son application sur le contrôle de la réserve agricole ainsi que sur le calcul du débit naturel reconstitué de la Durance.

Dans ce cadre, la CED a missionné l'Institut Agro – par ses missions de diffusion vers la profession agricole attachée au legs du Domaine du Merle à Salon-de-Provence et son expertise scientifique en hydrologie et gestion de l'eau agricole – pour conduire un travail de vulgarisation vis-à-vis des membres de la CED. Le travail s'est déroulé principalement en 2022, avec des finitions et ajustements en 2023.

Les étapes de l'étude ont été :

1) identifier et analyser les composantes de l'algorithme

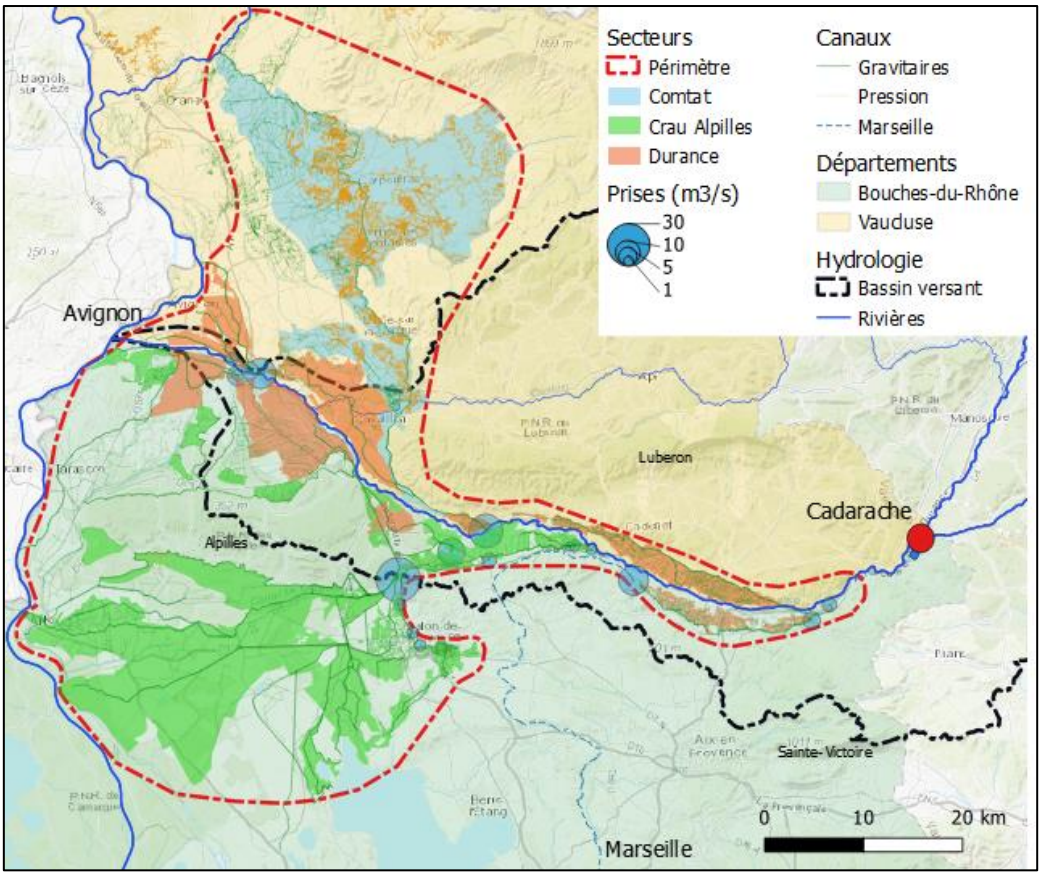
2) analyser les différentes données d'entrées

3) proposer des résumés et schémas simplifiés.

La méthode suivie s'est appuyée sur des réunions de travail avec les différents intervenants pré-identifiés par la CED, partenaires de cette étude, de manière collégiale lors de points d'étapes et lors de correspondances individuelles. Des choix ont été opérés à propos des schématisations proposées, notamment car il est difficile de proposer des représentations qui « parlent » à tous. Le présent rapport et la restitution finale fournissent une représentation issue des différentes itérations. Les supports fournis sont fournis sous forme éditable de façon à ce qu'elles puissent évoluer ou être ajustées en fonction des besoins des différents partenaires.

La Commission Exécutive Durance

La CED a été créée par la loi du 11 juillet 1907 afin de remédier aux conflits inhérents aux pénuries d'eau récurrentes sur la basse Durance ? (Préciser périmètre d'action) . Composée de représentants des canaux et de l'État (la DRAAF qui assure également l'animation et le secrétariat de la commission, la DDTM 13 et la DDT 84), elle assure la répartition des eaux de la Basse Durance, à l'aval du pont de Mirabeau, entre les quatorze prises historiques concédées sur les départements de Vaucluse et des Bouches-du-Rhône. Ces 14 prises historiques comprennent des canaux d'irrigation ancestraux et également le canal de Marseille qui a pour vocation d'alimenter la ville de Marseille en eau potable. Depuis l'aménagement hydroélectrique de l'axe Durance-Verdon des années 1950-1960, elle gère aussi, en collaboration avec EDF, la réserve agricole du barrage de Serre-Ponçon.



Périmètre de la CED (sources : BD Hydra ; fond de carte : ESRI)

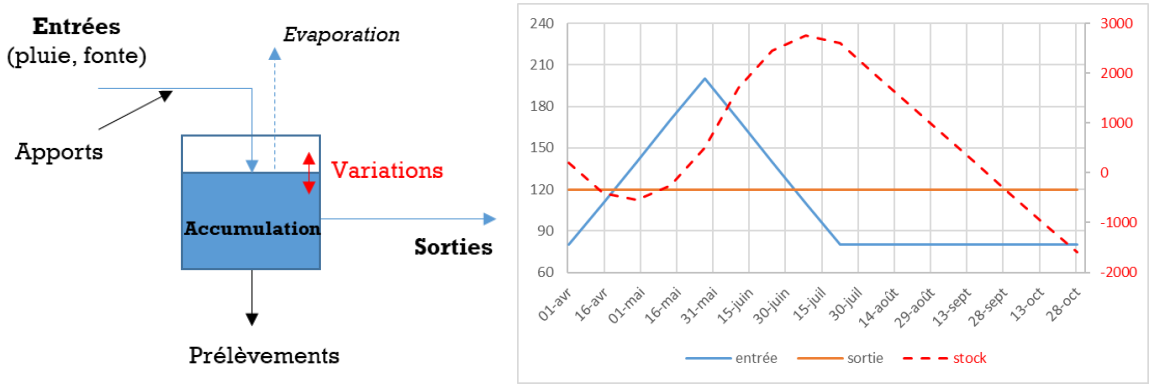
Chaine Durance-Verdon

Les aménagements de la chaine Durance-Verdon ont été réalisés à partir de la fin des années 1950 jusqu'au début des années 1970, avec une mise en service de Serre-Ponçon en 1960. La participation financière du Ministère de l'Agriculture (MA) à la construction de ces infrastructures s'est faite en contrepartie de la constitution d'une réserve de 200 millions de m^3 (Mm^3) mise à la disposition des usages de Basse-Durance : les modalités de calcul du déstockage sont définies dans une annexe de la convention de 1953 (MA-EDF, Durance) et précisées dans la convention de 1962 (MA-EDF, Verdon). La loi de 1955 définie les 3 missions de l'aménagement de la Durance : « Est déclarée d'utilité publique la construction […] des ouvrages destinés, d'une part, à la régularisation de la Durance par la construction d'un réservoir à Serre-Ponçon, d'autre part, à l'utilisation des eaux pour les irrigations par pompage ou par gravité et à l'aménagement de la force hydraulique pour la production d'énergie électrique. »

Principes de l'algorithme de déstockage

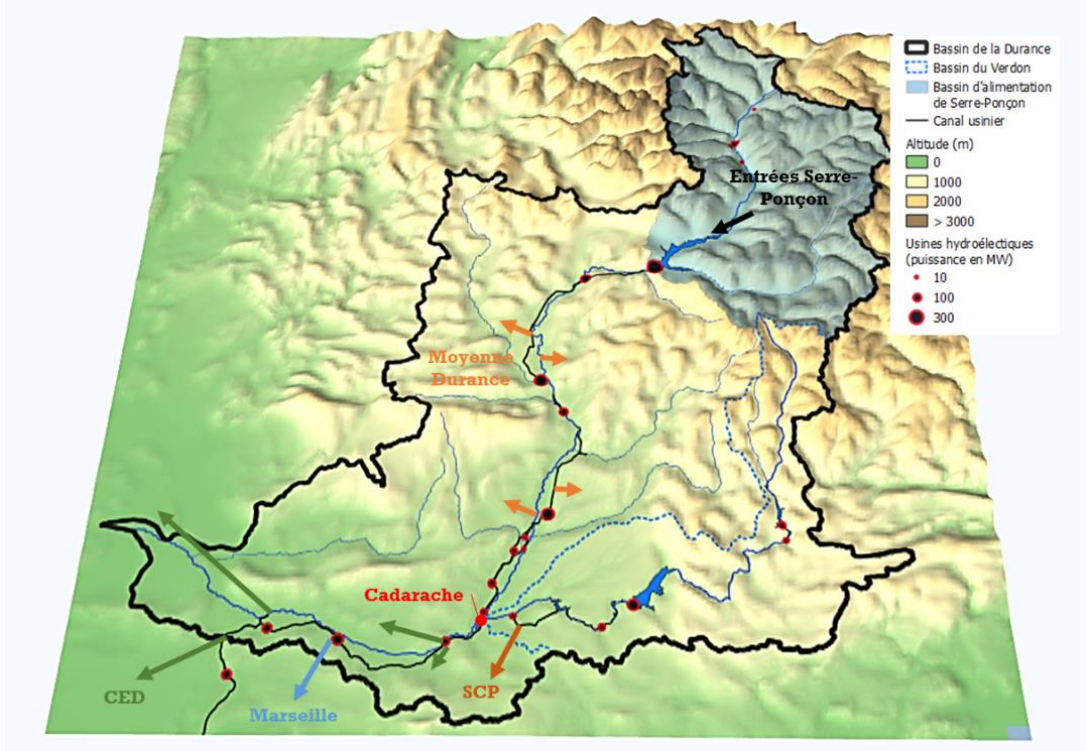
Les débits déstockés sont des débits délivrés pour satisfaire les prélèvements de la CED entre le 1er juillet et le 30 septembre, lorsque le débit de la Durance en aval de Cadarache n'est pas suffisant. Pour arbitrer la répartition des eaux entre les prises agricoles de Basse Durance en période de sècheresse, un outil de suivi du déstockage a été développé par EDF : l'algorithme de déstockage. Son objectif est de retranscrire par le calcul le cadre réglementaire de la concession et de fournir à la CED les moyens de gérer le plus finement possible l'utilisation de la réserve. Le mode de calcul des volumes déstockés pour l'agriculture a été progressivement enrichi au cours des dernières décennies. Non seulement le système hydraulique est de mieux en mieux représenté (entre 1986 et 2004), mais chaque étape du calcul a gagné en précision avec la prise en compte de plus en plus de phénomènes entre 2004 et 2019 (comme l'évaporation).

La **réserve agricole** peut être imaginée comme une quantité d'eau contenue dans un réservoir – bien qu'il ne s'agisse pas d'un réservoir réel. Le déstockage correspond sur le plan physique à la vidange de ce réservoir. Quels que soient l'origine et l'usage des entrées ou sorties, il est possible de schématiser ce processus comme suit (figure de gauche). La figure de droite permet d'expliciter le passage de débits (dotations en m^3/s) en volume (Mm^3) : tant que les entrées sont supérieures aux sorties (prélèvements), le stock dans le réservoir augmente ; il stagne lorsque les sorties correspondent exactement aux entrées et va ensuite baisser dès lors que les sorties seront supérieures aux entrées.



Bilan hydraulique sur un réservoir au fil de l'eau et exemple graphique de la relation entre stock et flux (1 entrée, 1 sortie)

L'algorithme retranscrit le fait qu'une partie de l'eau est réservée pour un usage principalement agricole en Basse Durance (à l'exception du canal de Marseille). Lorsque l'eau est appelée en aval par les canaux, elle est automatiquement déstockée en amont, et les réserves se vident. Pour s'assurer que le stock disponible suffira pour le reste de la saison, il faut se doter d'un outil de suivi de calcul de ce stock (l'algorithme) qui peut alors imposer une fermeture des vannes agricoles pour limiter le déstockage. L'algorithme évalue donc la différence entre la « ressource » (ou débit disponible à Cadarache) et les prélèvements (nets), lorsque ces derniers dépassent la ressource à Cadarache entre début juillet et fin septembre les débits déstockés sont imputés sur la réserve mobilisable de 200 Mm^3. Entre 1989 et 2018 le volume prélevé moyen est de 1150 Mm^3, avec un déstockage moyen de la réserve agricole de 90 Mm^3. Le déstockage physique de Serre-Ponçon sur la période estivale n'est pas exclusivement dû aux canaux de la CED : les prélèvements en moyenne Durance et le débit réservé interviennent dans le calcul, leur prise en compte a notamment fait l'objet d'échanges entre la CED et EDF au cours de la dernière décennie.



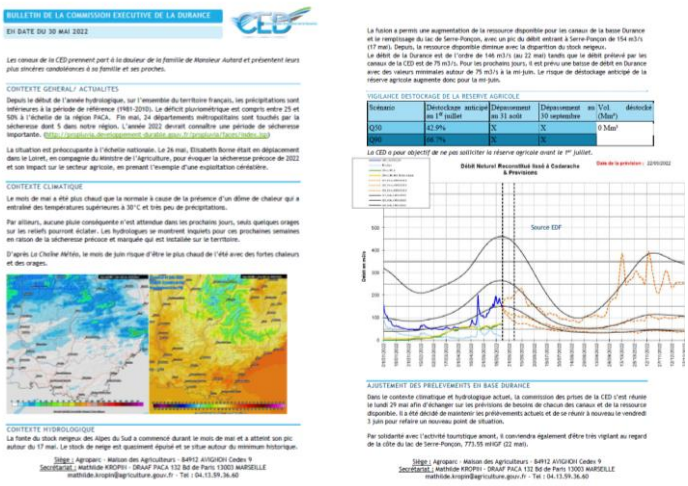
Entrées et sorties de la chaine Durance-Verdon (sources : BD Alti ; BD Topage)

Résultats des calculs

Les missions respectives de EDF et de la CED en font des partenaires privilégiés. Pour suivre les évolutions des paramètres qui interviennent dans la gestion de la réserve en cours de saison, les modalités d'échange d'informations mutuelles ont été formalisées dans des conventions (2006 puis 2016). Etant donné le mode de gestion prévisionnel de la retenue de Serre-Ponçon (besoin de visibilité sur les évolutions possibles), le partage d'information a été organisé de manière à pouvoir évoluer. Ainsi, en situation normale (ou « veille active ») les échanges sont rythmés par le cycle saisonnier alors qu'en situation de vigilance

(ou « veille renforcée ») les échanges sont plus fréquents. Enfin, en cas de risque de dépassement des 200 Mm^3 et d'épuisement de la réserve une cellule de crise est mise en place. D'une part la CED fournit un état à jour des indicateurs sur les prélèvements (via un superviseur en ligne récupérant les données de systèmes de mesure partagés avec EDF), d'autre part EDF fournit un fichier de sortie de l'algorithme (ensemble des variables à jour présentées sous forme graphique).

Plusieurs fiches d'information sont produites par la CED entre avril et octobre, selon la situation de quelques jours à deux mois d'intervalle. Combiné à une synthèse du contexte (situation climatique, actualités du réseau), les sorties de l'algorithme permettent de rapporter l'état de vigilance sur le déstockage de manière la plus objective possible.


BULLETIN DE LA COMMISSION EXECUTIVE DE LA DURANCE

EN DATE DU 30 MAI 2022

CONTEXTE GENERAL/ ACTUALITES

CONTEXTE CLIMATIQUE

CONTEXTE HYDROLOGIQUE

VIGILANCE DESTOCKAGE DE LA RESERVE AGRICOLE

Scenario	Destockage anticipé au 1er juillet	Dépassement au 31 août	Dépassement au 30 septembre	Vol. déstocké (Mm³)
Q50	42.9%	X	X	0 Mm³
Q90	64.7%	X	X	

Le CED a pour objectif de ne pas solliciter la réserve agricole avant le 1er juillet.

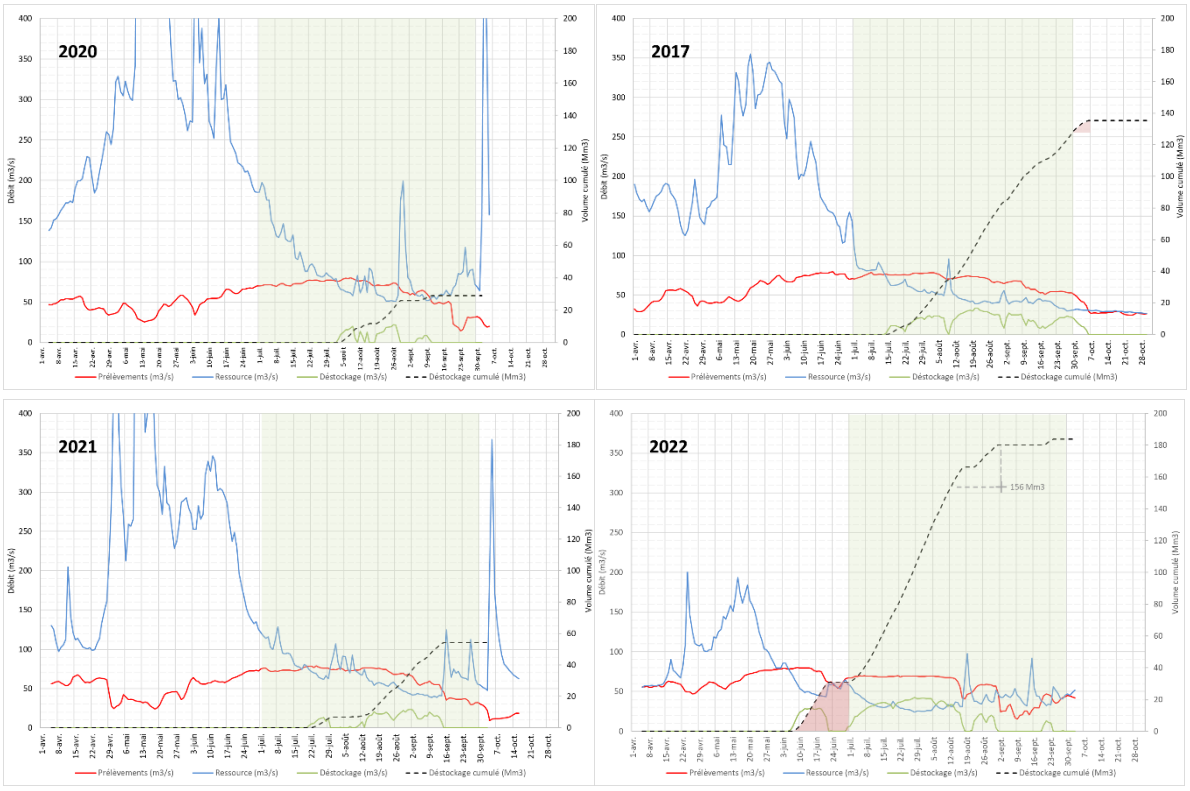
Débit Naturel Reconstitué Isnà à Cadarache & Prévisions

Source EDF

AJUSTEMENT DES PRELEVEMENTS EN BASE DURANCE

Exemple de fiche en cours de saison

Les sorties de l'algorithme sont des séries temporelles de débits, représentés sous forme graphique.



Exemples de résultats en fin de saison d'irrigation

Sur ces graphiques, l'axe vertical de gauche correspond aux débits journaliers (ressource en bleu, prélèvements en rouge, déstockage en vert). Normalement la période hivernale est telle que la ressource est abondante, du fait des précipitations et de la fonte des neiges au printemps. Les prélèvements sont généralement plus importants en été du fait des besoins agricoles. Lorsque la courbe rouge passe sous la courbe bleue, la réserve agricole est mobilisée (déstockage) – le débit correspondant est

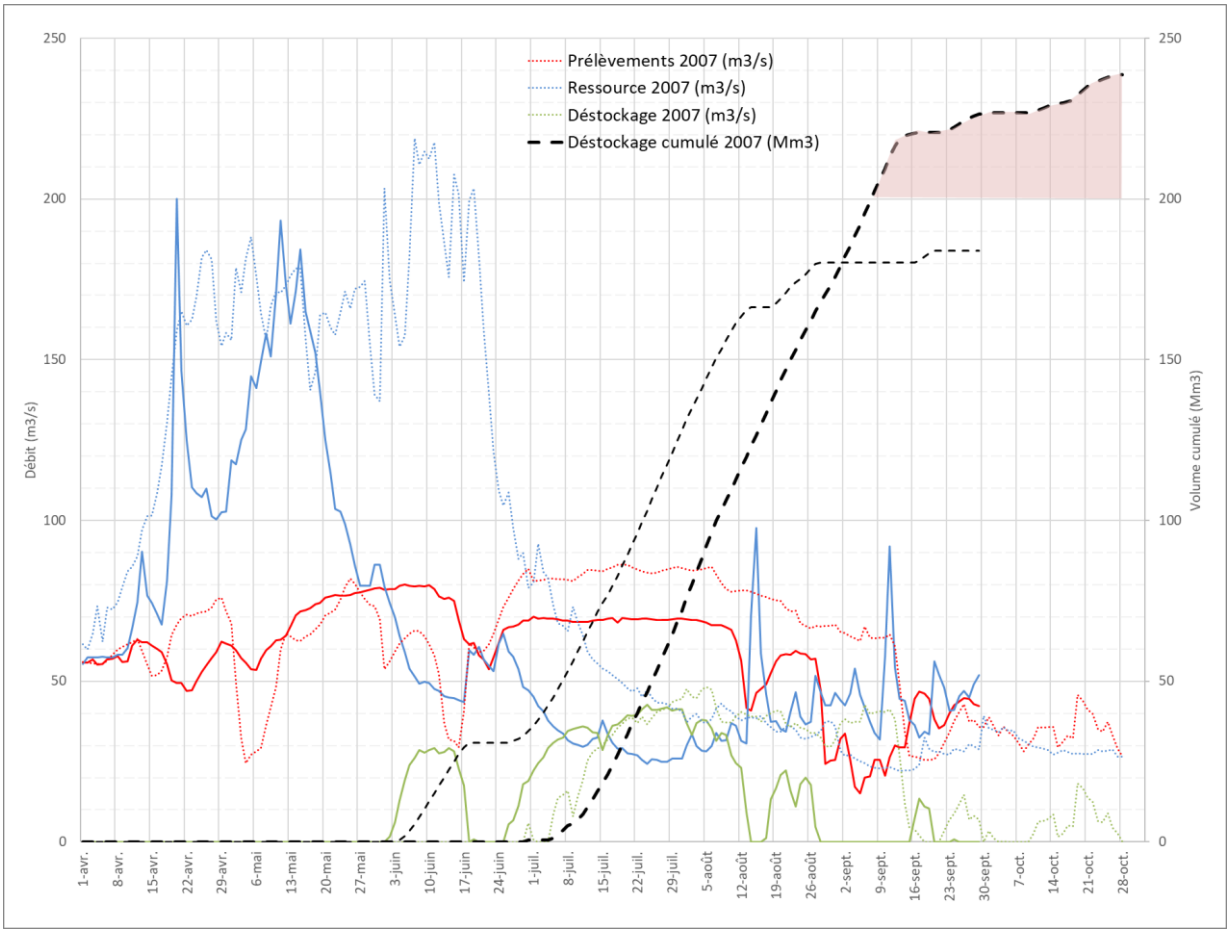
représenté par la courbe verte. L'axe vertical sur la droite permet de représenter sur la même figure le volume déstocké cumulé (courbe en pointillé noir). La période normale de déstockage est représentée par un fond vert.

Les échelles des graphiques sont identiques pour les 4 années représentées. On peut voir ainsi que l'année 2022 se caractérise par une faible ressource dès le printemps, conduisant à un déstockage anticipé de la réserve et la mise en place de restrictions (diminution de la courbe des prélèvements en juin). On observe aussi que la pente de la courbe déstockage est plus raide en 2022 comparé à 2017, du fait d'un déficit plus élevé entre la demande et la ressource.

Gestion de crise

Entre 2011 et 2013, la CED a mené un travail de concertation entre canaux et services de l'Etat (DRAAF, DDT(M)) sur la manière de formaliser des règles d'arbitrage en période de pénurie. Le protocole de gestion de crise, signé en décembre 2013, fournit des règles d'organisation interne selon la gravité de la situation. Dès que les indicateurs dépassent certains seuils de vigilance, la CED se réunit pour prise de décision (passer d'une situation à une autre). Les seuils de déclenchement, les modalités de restrictions et de suivi de la situation se basent sur les probabilités de ne pas respecter les contraintes de gestion de la CED (pas de déstockage avant le 1er juillet, ne pas dépasser 156 Mm^3 au 31 août et ne pas dépasser 200 Mm^3 le 30 septembre). Ces probabilités sont calculées à partir de l'extrapolation des courbes **ressource** et **prélèvements**. Lorsque des baisses de débit de prélèvement sont décidées, celles-ci sont ensuite réparties entre les canaux (volumes utilisés à la convenance de chacun sur la période considérée). Cette utilisation mutualisée de la réserve évolue à partir de son épuisement : en crise renforcée la répartition du débit restant en Durance donne une prévalence aux canaux ayant le moins consommé au regard de leurs dotations.

Scénarios : depuis 2007, EDF propose à la CED une perspective statistique sur les ressources et les prélèvements des années passées. Cela donne une idée de ce qu'il peut se passer dans les prochaines semaines. Ces extrapolations, ou projections dans le futur, prennent la forme d'enveloppes qui encadrent les prochaines valeurs que peuvent prendre la ressource d'une part, et les prélèvements d'autre part. Il est également possible de proposer un scénario sur les prélèvements, selon où l'on se projette par rapport à ces chroniques historiques. Cet outil statistique permet donc d'anticiper le déstockage entre la date à laquelle le calcul est fourni et la fin de la période d'irrigation.

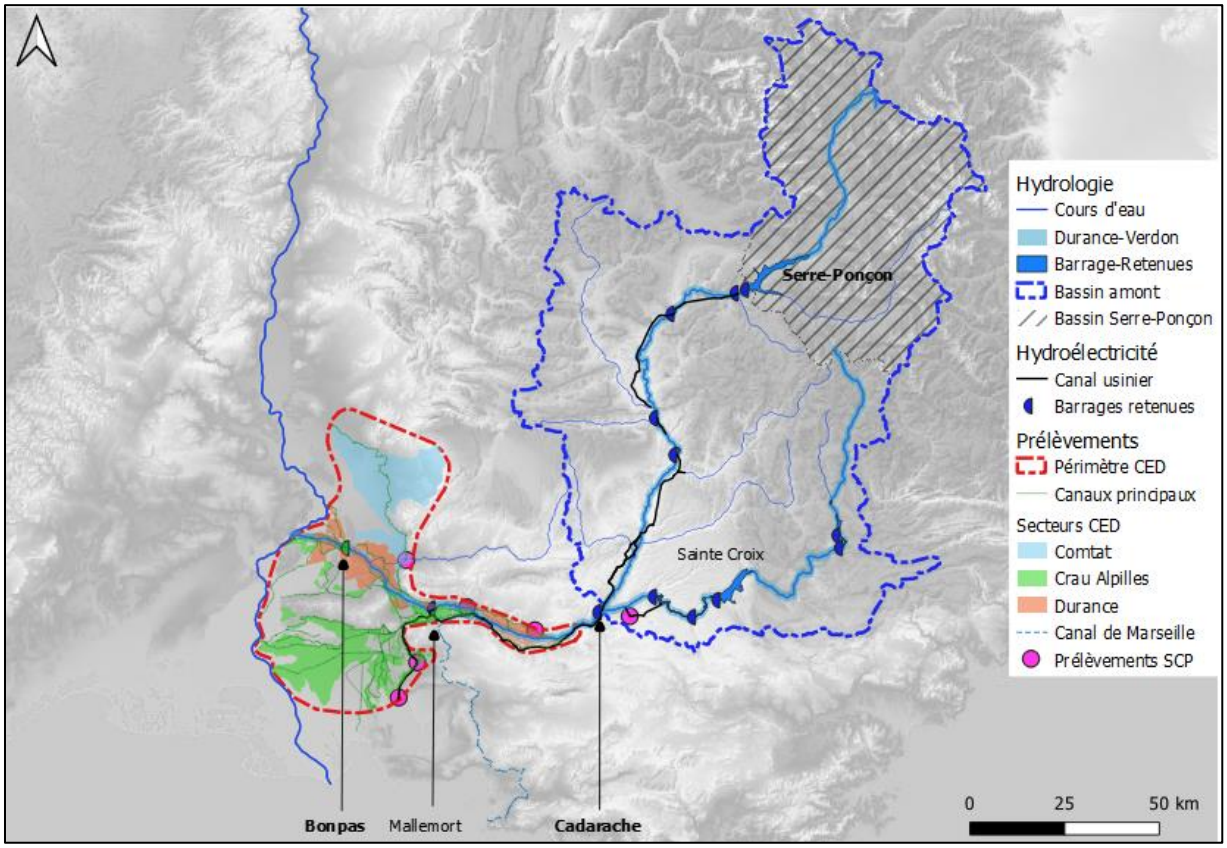


Comparaison du déstockage 2007 (couleurs transparentes et pointillés en gras) avec 2022 : avant et après mise en place du protocole de gestion de crise

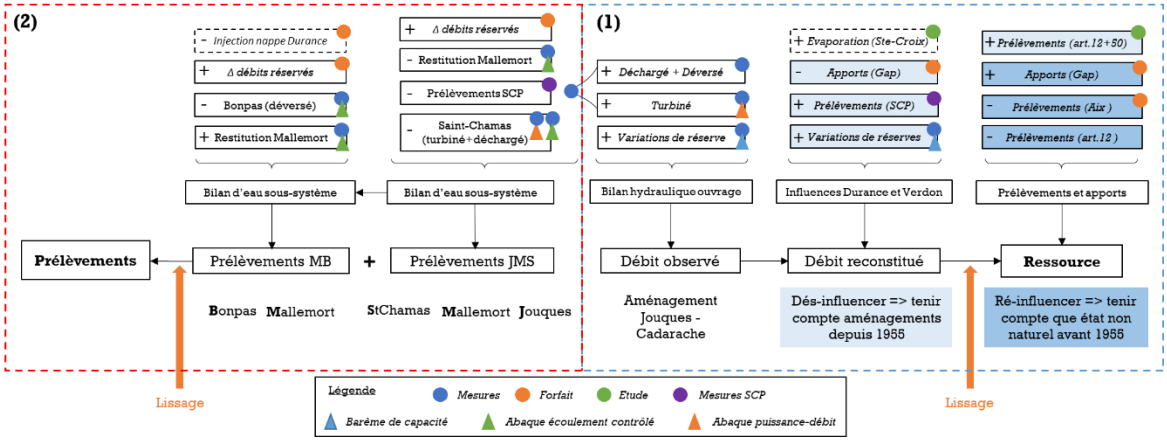
Ce graphique met en regard le déstockage de 2022 avec celui de 2007, autre année particulièrement sèche. On observe clairement l'effet de la mise en place du protocole de gestion de crise : non-dépassement de la réserve agricole en 2022 (239 Mm^3 en 2007), et présence de paliers sur la courbe de prélèvements cumulés de 2022 correspondant aux restrictions en juin et en septembre (excepté pour la mi-août où le palier n'est imputable qu'à une hydrologie plus favorable, c'est-à-dire où la ressource excède les prélèvements).

Description spatiale et schématique

L'algorithme de déstockage est la traduction des textes règlementaires en un calcul. Ce calcul consiste à faire un bilan des entrées et sorties de volumes d'eau sur une succession d'ouvrages hydrauliques. Chaque bilan consiste à analyser les flux de matière entrant et sortant, le calcul reposant sur des hypothèses simplificatrices et des chroniques de mesures. **Cadarache est le nœud central de l'algorithme.** Le calcul consiste à évaluer 1) **le débit disponible à Cadarache** (=ressource, courbe bleue) et 2) **les prélèvements agricoles en Basse Durance** (courbe rouge) : il y a déstockage lorsque les prélèvements (2) dépassent la ressource disponible (1). Le logigramme (Figure 2) se lit en partant du milieu. Sa lecture d'étape en étape, vers la droite (1) ou la gauche (2) permet de suivre en détail les étapes du calcul.



Zones d'approvisionnement et d'usages (BD Topo, BD Topage, BD Hydra)



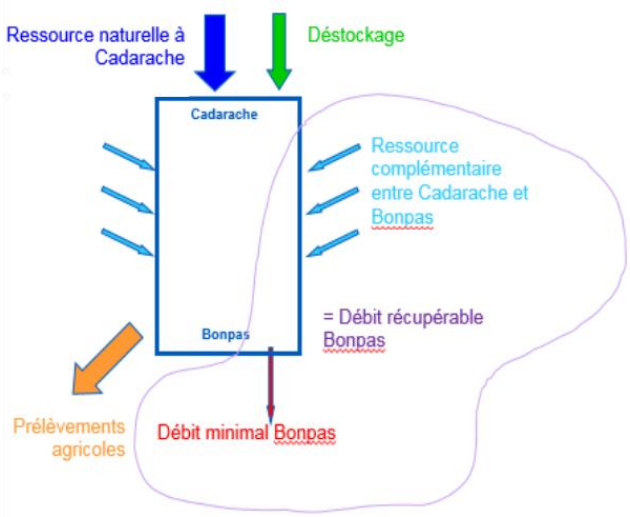
Logigramme des étapes de calcul et variables suivies pendant la saison d'irrigation

Pour le calcul de la ressource (1), l'algorithme consiste à calculer un débit tel qu'il aurait été sans la construction du barrage de Serre-Ponçon (débit reconstitué). Il utilise donc le débit réel mesuré, corrige ce débit avec les influences des ouvrages et prélèvements (ce qui est stocké dans les barrages, évaporé ou prélevé) et des apports (débit « dés-influencé »), puis calcule un débit théorique considéré comme « ressource » en ajoutant les influences de l'Homme sur la ressource déjà présentes en 1955 (« ré-influencer »). La difficulté de connaitre l'ensemble des prélèvements et des retours entre Cadarache et Bonpas rend le

calcul des prélèvements nets imputables à la CED (2) compliqué : l'algorithme procède donc par déduction à partir de bilans sur deux sous-systèmes.

Représentation graphique

L'algorithme de déstockage peut être schématisé selon le bilan global : Débit déstocké = Prélèvements – Ressource.



Schématisation de l'algorithme de déstockage par bilan entrée / sortie (source : NT EDF 2019)

Comme précisé dans l'annexe de la convention de 1953, pour tenir compte des éclusées des usines et de variations des apports glaciaires aux différents moments de la journée le calcul du déstockage se fait au pas de temps journalier : le débit instantané, noté par la suite Q en m^3/s, représente un débit moyen sur 24h. A noter également que les variations de hauteurs d'eau dans les différents réservoirs correspondent à des variations de volumes stockés (c'est-à-dire des flux) : ils représentent la différence entre deux mesures de hauteurs d'eau à un intervalle d'une journée.

Description mathématique simplifiée

L'algorithme de déstockage est la traduction en chiffres des textes règlementaires, notamment via des instructions conditionnelles (agrégation de règles de calcul variable selon la situation) et l'utilisation de l'équation de conservation du volume (sommes des entrées = sommes des sorties, sur un ou plusieurs ouvrages). Les calculs se basent principalement sur des mesures, des hypothèses simplificatrices et des valeurs forfaitaires. D'où l'importance de bien connaitre le fonctionnement de chaque ouvrage et de chaque système de mesure.

1) **Prélèvements Jouques Mallemort St Chamas**

$$Qprel_{JMS} = [Qturbiné + Qdéchargé]_{Jouques} + Qréservé(Cadarache - Mallemort) - Qrestitution_{Mallemort} - Qdérivé_{SCP} - [Qturbiné + Qdéchargé]_{StChamas}$$

2) **Prélèvements Mallemort Bonpas**

$$Qprel_{MB} = 0$$

$$si\ Qdéversé_{Mallemort} > 0$$

$$ou\ si\ Qrestitué\ vanne_{Mallemort} > 0$$

Sinon :

$$Qprel_{MB} = Qrestitution_{Mallemort} - [Qdéversé + Qréservé]_{Bonpas} - Qinjecté_{Nappe} + Qréservé_{Mallemort} - \max(0; -Qprel_{JMS}) + Qmin_{Bonpas}$$

3) **Lissage des prélèvements**

$$Prélèvements = [Qprel_{JMS} + Qprel_{MB}]_{lissé}$$

1) **Débit réel à Cadarache :**

$$Qréel = [Qvariation + Qréservé + Qdéversé]_{Cadarache} + [Qturbiné + Qdéchargé]_{Jouques}$$

2) **Débit Naturel Reconstitué (NR) à Cadarache :**

$$Q_{NR} = Qréel + Q_{Influences}\ (Durance + Verdon)$$

Avec : $Q_{Influences} =$

$$[\sum(Qvariation) - Qdérivé_{Gap} + Qévaporation_{Sainte-Croix}]_{Durance} + [\sum(Qvariation) + Qprélèvements_{SCP}]_{Verdon}$$

3) **Lissage du débit naturel reconstitué**

4) **Ressource à Cadarache au sens de la CED :**

$$Ressource = Q_{NR\ CED} = Q_{NR\ lissé} + Qprélèvements_{Art.50} + Qdérivé_{Gap} - Qprélèvements_{Aix}$$

Description mathématique de l'algorithme de déstockage (le code couleur est identique, à l'exception du bleu clair qui correspond aux débits mesurés – orange= forfait ; violet=mesures SCP ; vert=estimation théorique par étude)

Analyses statistiques

A partir des notes techniques de description de l'algorithme rédigées par EDF et d'exemples de fichiers de déstockage (2017, 2020, 2021, 2022), nous avons reproduit le fonctionnement de l'algorithme et effectué des analyses statistiques classiques. Il en ressort plusieurs enseignements.

Tout d'abord nous avons bien à reproduire les calculs des débits à Cadarache (erreurs relatives entre nos calculs et les valeurs d'EDF entre 0 et 4%, probablement liées à la valeur du débit dérivé à Gap (absent des fichiers EDF, supposé à 1 m3/s), nous reproduisons parfaitement les calculs pour les prélèvements JMS mais pour les prélèvements MB les erreurs sont comprises entre 4 et 32%. Cet écart est imputable à la traduction mathématique des conditions du calcul décrites dans les notes descriptives de l'algorithme (le fait qu'il y a différentes versions et que l'algorithme évolue peut également intervenir, par exemple pour la prise en compte du débit réservé à Bonpas), mais nous remarquons aussi que l'écart est particulièrement important pour certaines valeurs de la série, témoignant d'une opération manuelle. Par ailleurs, la procédure de lissage opérée sur certains termes du bilan (savoir-faire EDF-DTG, non transmise) n'étant pas reproductible, nous basons tous les graphiques présentés sur les valeurs des fichiers de déstockage fournis par EDF.

Capacité de reproduction de l'algorithme à partir des informations issues d'EDF (fichiers de déstockage et notes techniques)

Erreur relative (%)	2017	2020	2021	2022
Q_{NR}	0	0,42	0,46	1,97
$Q_{NR\ CED}$	1,31	0,53	0,65	3,78

$Qprel_{JMS}$	**0**	**0**	**0**	**0**
$Qprel_{MB}$	**26,54**	**15,93**	**32,26**	**4,61**

Ensuite, pour identifier les variables prépondérantes nous avons effectué une analyse de sensibilité à une variation (facteur par facteur) des séries de données d'entrées. Nous choisissons une variation de -10% sur chacune des variables (première colonne du tableau ci-dessous). La valeur de 10% a été fixée de manière forfaitaire et ne correspond à aucune réalité physique. Ainsi, ce tableau montre l'importance stratégique de telle ou telle variable sur le calcul, ce qui au final influencera la précision attendue des systèmes de mesure. En d'autres termes, une variable ayant une forte influence devrait être mesurée avec une faible incertitude.

Nous constatons une sensibilité importante de l'algorithme aux valeurs débit turbiné à Jouques (déjà identifié dans une note EDF), et dans une moindre mesure de la valeur des influences sur la Durance. En effet, les étendues de ces séries de données sont les plus importantes (ces termes varient le plus) pour le calcul de la ressource. Pour le calcul des prélèvements, le débit en aval de l'ouvrage de Bonpas a une influence non négligeable, et dans une moindre mesure le débit restitué à la vanne agricole de Mallemort.

Analyse de sensibilité de l'algorithme (valeurs en % calculées sur la base de la moyenne des médianes des jeux de données)

Variation de -10% de	**Sur** Q_{NR}	**Sur** $Q_{NR\ CED}$	**Sur** $Qprel_{JMS}$	**Sur** $Qprel_{MB}$	**Etendue de la série (max-min)**
$Qvariation$ **Cadarache**	0,01				47,0
$Qturbiné$ **Jouques**	**10,03**				**208,6**
$Qdéchargé$ **Jouques**	0,03				64,8
$Q_{Influences}$ **Durance**	**3,29**				**363,9**
$Q_{Influences}$ **Verdon**	0,82				121,8
$Qprélèvements_{Art.50}$		0,27			2,6
$Qdérivé$ **Boutre**		0,00			8,3
$Qrestitué\ vanne$ **Mallemort**			**1,30**		**153,8**
$Qdérivé_{SCP}$			0,17		1,4
$Qturbiné$ **StChamas**			0,05		127,2
$Qdéversé + Qréservé$ **Bonpas**				**6.58**	**264.5**

Mesures pour l'algorithme

Principes de mesure utilisés

Pour appliquer l'algorithme de déstockage, tout un ensemble de séries de données (ou chroniques) sont nécessaires : les mesures sont réalisées par EDF pour la ressource naturelle reconstituée (1) et pour le prélèvement global des canaux (2). L'acquisition et la centralisation des données ainsi que la mise en œuvre de l'algorithme sont pris en charge par EDF.

Données mesurées pour l'algorithme de déstockage

Type	Application	Mesures	Conversion en débit
Variation de réserve	Cadarache, Serre-Ponçon, Espinasse, La Saulce, St Lazare, Escale, Castillon, Chaudanne, Ste Croix, Quison, Gréoux	Cote amont du barrage	Barèmes de capacité (niveau-volume) via relevé bathymétrique
Turbiné	Jouques, St Chamas	Hauteur d'eau qui arrive à la turbine	Consigne de puissance et abaque puissance-débit
Déchargé	Jouques, St Chamas	Hauteur d'eau et hauteur d'ouverture de vanne	Codeur de position et abaque de débit
Déversé	Bonpas	Hauteur d'eau sur le seuil	Abaque de débit
Restitué	Mallemort	Hauteurs d'eau (amont et aval de la vanne point triple) et position des vérins de la vanne	Codeur de position et abaque de débitance
Prélevé	5 points SCP entre Cadarache et Bonpas	Débitmètre	-

Capteurs utilisés

Plusieurs technologies de capteurs sont mises en place pour mesurer les niveaux d'eau (au moins 1 mesure / jour toujours à la même heure), comme des sondes de pression (immergées) ou des mesures directes du niveau de la surface (radar, flotteur). Ces informations sont ensuite converties en débits soit directement (abaque, débit instantané), soit par la différence entre deux mesures (débit journalier).

Les capteurs de hauteur d'eau fournissent généralement les valeurs avec une résolution au millimètre, mais l'incertitude est généralement autour de ±0,5 cm (les garanties techniques sont quantifiées en pourcentage – typiquement 0,1% – de la gamme de mesure). Cette incertitude n'est généralement pas pénalisante au regard des variations physiques de la hauteur d'eau liées au vent, à la turbulence des écoulements (suivant la configuration de ces écoulements), aux ondes de surface résultant d'autres perturbations possibles.

La multiplication du nombre de mesures permet d'éliminer l'impact des erreurs aléatoires (comme les phénomènes ondulatoires ou la turbulence). En revanche, des biais systématiques peuvent intervenir soit à l'installation ou au remplacement de capteur, soit par dérive dans le temps.

La plupart des capteurs sont doublés pour vérifier la cohérence des mesures à distance (automate). Il est également possible d'effectuer des contrôles visuels via des échelles limnimétriques. Plusieurs exploitants se répartissent la gestion des ouvrages du système Durance-Verdon. Ils reçoivent les éventuelles alertes et peuvent comparer plusieurs mesures entre elles et opérer un basculement sur le capteur de secours. Chaque exploitant est également en charge des tournées mensuelles (contrôle cohérence) et de la maintenance annuelle (soit en interne en suivant les préconisations des constructeurs, soit sous-traitée).

Un certain nombre de stations de mesure sont équipées d'une série de cordes de vitesse. Le principe d'une corde de vitesse est de mesurer le temps de transit d'une onde acoustique dans l'eau, ce temps de transit étant allongé linéairement avec la vitesse du courant. Ce type de mesure est précis, mais ne donne la vitesse du courant que sur la ligne parcourue, alors que la vitesse peut décrire un profil est variable selon le vent, la présence de végétation ou la hauteur d'eau. Les points de prélèvement sont équipés d'une série de cordes de vitesse (jusqu'à 7), garantissant une très bonne description des profils d'écoulement. Le débit est obtenu ensuite par multiplication de la vitesse moyenne par la surface de l'écoulement obtenue par un capteur de niveau d'eau. L'incertitude résultante de l'ensemble est généralement faible (quelques pourcents).

Modèles de calcul des débits

Le passage des valeurs mesurées au débit nécessite un modèle qui peut être une simple table de conversion (par exemple à une hauteur mesurée correspond un débit) ou une relation un peu plus complexe faisant par exemple intervenir l'ouverture, voire deux mesures de hauteur et une mesure de position (vanne point triple de Mallemort).

Les lois simples hauteur-débit peuvent être obtenues à partir d'un modèle théorique (comme une loi d'écoulement sur un seuil rectangulaire). Ces lois incluent toujours au moins un coefficient qu'il est nécessaire de vérifier ou d'ajuster à partir de mesures in situ. Certaines structures peuvent présenter de légères dérives saisonnières, liées par exemple au développement de mousses

(bryophytes) sur les structures bétonnées. Moyennant ces ajustements, les incertitudes associées à une loi de seuil bien étalonnées sont faibles (typiquement moins de 5%), sous réserve que l'étalonnage soit vérifié dans tous les domaines de fonctionnement de la structure.

Avec les vannes se rajoute l'incertitude liée à l'ouverture de l'ouvrage. L'incertitude sur cette ouverture est liée à l'étalonnage du capteur de position (précision atteignable de quelques millimètres) par rapport à l'ouverture réelle, et à l'ouverture à laquelle se rapporte cette erreur. Pour les vannes peu ouvertes, l'erreur relative peut dépasser 5% (avec une composante systématique donc non corrigée avec un grand nombre de mesures), mais ces situations sont associées à des débits faibles donc avec un impact sans doute négligeable sur les bilans.

Le cas de la vanne point triple est très particulier. Cette vanne a été installée après la construction du canal pour la mise en œuvre de quotas d'eau et sédiments déversés vers l'étang de Berre. Compte tenu de la taille du canal EDF, la géométrie de la vanne ne suit aucun standard et l'établissement d'un modèle a dû faire l'objet d'une étude spécifique, avec une prestation réalisée par l'UMR G-eau pour EDF en 2012. Le modèle établi alors repose sur un calcul de la géométrie de l'écoulement sous la vanne (qui a un angle variable et une forme trapézoïdale) et l'écriture des lois de conservation de matière et d'énergie de l'écoulement au passage de la vanne. Au final, il est possible de calculer le débit à partir de la position des vérins permettant d'actionner la vanne et les seuils de surverse, des niveaux d'eau amont et aval. L'introduction de coefficients d'ajustement des lois théoriques a toutefois été nécessaire pour obtenir les valeurs mesurées. Si l'incertitude est grande pour certains régimes (grande ouverture notamment), on peut faire l'hypothèse que ces régimes sont relativement rares et que la vanne fonctionne la majeure partie du temps en tout ou rien. Ainsi, le débit restitué devrait être souvent soit nul, soit identique au débit issu de la station de turbinage de Mallemort.

Les abaques débit-hauteur-puissance sont basés sur le calcul de puissance hydraulique (celle-ci étant le produit de la différence de pression – ou charge hydraulique – avec le débit de turbinage) et le rendement de la turbine. Celui-ci est bien connu de l'exploitant pour les différents régimes de fonctionnement. Connaissant la puissance produite (mesurée), on retrouve ainsi le débit.

Les calculs de débit de stockage ou déstockage dans les réserves sont basés sur la connaissance de la géométrie de réservoirs, que l'on peut ramener à une courbe de volume en fonction de la hauteur. Une erreur de 1cm induit une erreur de volume en (m3) égal à 100 fois la surface du plan d'eau (en ha). Il faut toutefois signaler que même si une erreur relative peut être élevée entre 2 instants proches, l'erreur cumulée sur une période plus longue sera faible. Ainsi, dès lors qu'on allonge la période considérée, l'incertitude est diminuée et tend vers 0. L'incertitude liée aux flux évaporés est en comparaison plus élevée car les flux évaporés se cumulent, et ceux-ci dépendent de processus partiellement mesurés.

Côté canaux, la saison d'irrigation de 2007 avec dépassement de la réserve de 200 millions de m^3 a conduit à une contrepartie financière en faveur d'EDF significative (de l'ordre du million d'euros), motivant le lancement de l'équipement des canaux (débits entrants) et la centralisation des mesures. Ce processus s'est déroulé sur un mode coopératif, c'est-à-dire que chaque canal partage les valeurs de débits prélevés (28 capteurs non redondants dont les données sont assemblées dans une interface web, nommée « superviseur CED »), en parallèle d'une consolidation des équipements de mesure par EDF (19 capteurs à ce jour dont les données sont issues d'EDF). Les données des capteurs restants sont issues des canaux. On peut identifier plusieurs sources d'incertitudes sur l'ensemble de ces capteurs :

1) le contrôle des débits s'effectue principalement par des modules à masque, équipements qui garantissent un débit à ±5% autour d'un débit nominal dès lors que le niveau est assuré à sa valeur nominale. Si cette valeur de 5% peut paraitre faible, elle peut introduire un biais systématique – par exemple, si le niveau est durablement sur une valeur basse, le débit sera durablement plus faible que la valeur nominale ;
2) certains canaux disposent de systèmes automatisés (Canal de Marseille par exemple avec tout le matériel qui permet de faire fonctionner un canal gravitaire avec une gestion par l'aval : équipement des vannes et régulation dynamique) tandis que d'autres sont plus rudimentaires car non doublés, ou susceptibles de subir des dérives. Le superviseur fonctionne depuis 2011, mais il reste à ce jour du travail pour maintenir ce service et continuer à améliorer et garantir la précision des systèmes de mesure. Ce processus de fiabilisation des mesures des prélèvements par les canaux permettra de réviser la stratégie de calcul des prélèvements dans l'algorithme.

Il est essentiel que l'ensemble des parties prenantes aient confiance dans les mesures mises à disposition. On voit que pour tous les systèmes de mesure, des phases d'étalonnage sont nécessaires pour ajuster les paramètres ou les courbes de tarage hauteur-débit. On peut comprendre que certaines données de mesure soient stratégiques pour certains acteurs et non facilement diffusables. Nous pouvons en revanche recommander de mettre à disposition, entre les parties prenantes, les données issues des campagnes de calage ou vérification pour assurer la confiance et identifier les besoins en équipement complémentaire ou réétalonnage.

Liste complète des données mesurées pour l'algorithme de déstockage (l'ajout d'une colonne incertitude ne peut se faire qu'à condition d'informations supplémentaires sur les campagnes d'étalonnage)

Terme	Système de mesure (systématiquement doublé)	Opérateur	Variable associée
Variation de réserve Cadarache	Capteur radar (Vega) + bathymétrie 2008	CCH Ste Tulle	Cote retenue
Q turbiné Jouques	Sonde piézométrique (Vega) + consigne de puissance + abaque puissance-débit	CCH Ste Tulle	Débit
Q déchargé Jouques	Sonde piézométrique (Vega) + codeur de position déchargeur (1 par vanne)	CCH Ste Tulle	Volume
Variation de réserve Serre-Ponçon	Capteur bulle à bulle (Rittmeyer) + bathymétrie 2008	CCH Ste Tulle	Cote retenue
Variation de réserve d'Espinasse	Capteur bulle à bulle (Rittmeyer) + bathymétrie 2013	CCH Ste Tulle	Cote retenue
Variation de réserve de la Saulce	Capteur bulle à bulle (Rittmeyer) + bathymétrie 2014	CCH Ste Tulle	Cote retenue
Variation de réserve de St Lazare	Capteur bulle à bulle (Rittmeyer) + bathymétrie 2015-2017	CCH Ste Tulle	Cote retenue
Variation de réserve de L'Escale	Capteur radar (Vegapuls51) + bathymétrie 2012	CCH Ste Tulle	Cote retenue
Variation de réserve de Castillon	Capteur bulle à bulle (Rittmeyer) + bathymétrie 2012	GU Castillon	Cote retenue
Variation de réserve de Chaudanne	Capteur bulle à bulle (Rittmeyer) + bathymétrie 1993	GU Castillon	Cote retenue
Variation de réserve de Sainte Croix	Capteur bulle à bulle (Rittmeyer) + bathymétrie 2009	CCH Ste Tulle	Cote retenue
Variation de réserve de Quinson	Capteur bulle à bulle (Rittmeyer) + bathymétrie	CCH Ste Tulle	Cote retenue
Variation de réserve de Gréoux	Capteur flotteur (Rittmeyer) + bathymétrie	CCH Ste Tulle	Cote retenue
Q dérivé par SCP sur conduite forcée Vinon	Volume agricole SCP pompage (débitmètre)	GU Vinon	Débit
Q dérivé par SCP à Boutre	Volume agricole SCP Boutre (débitmètre)	GU Vinon	Débit
Q turbiné Saint Chamas	Sonde piézométrique (Vega) + consigne de puissance + abaque puissance-débit	CCH Ste Tulle	Débit
Q déchargé Saint Chamas	Roue crantée (Rittmeyer) + abaque (ouverture vanne-débit)	CCH Ste Tulle	Débit
Q déversé Saint Chamas	Sonde piézométrique (Vega) + abaque	CCH Ste Tulle	Débit
Restitution Mallemort	Capteur radar + codeur de position (Rittmeyer) + abaque écoulement contrôlé	GU Mallemort	Débit
Q déversé Bonpas	Sonde piézométrique (VegaWell71) + hauteur seuil + abaque	GU Mallemort	Débit
Q SCP Cadarache à Bonpas	Volumes agricoles (débitmètre x 5)	SCP	Débit

Procédure de lissage

Les chroniques de débits calculées par l'algorithme, ou signaux, sont marquées par un bruit de fond, c'est-à-dire des fluctuations non représentatives de la réalité. Ces incohérences, d'autant plus importantes que l'on se déplace vers l'aval, sont notamment dues à des imprécisions de mesure et à des reports de volumes d'un jour à l'autre (problème de basculement de plan d'eau dû au vent ou de délais de propagation liés à la mise en mouvement des eaux superficielles le long de la chaine). Afin de retrouver une certaine cohérence et d'avoir une meilleure lisibilité du signal, les valeurs brutes sont lissées à partir de témoins hydrologiques naturels comme indicateurs de tendance (la forme du signal témoin est la référence à suivre), tout en respectant les volumes mensuels de la chronique initiale (le volume du signal brut est conservé, sur une période allant de 1 à 3 mois). La méthode de lissage fait partie du savoir-faire d'EDF, son application mérite une attention particulière aux erreurs de mesures et à la validité des volumes mensuels comptabilisés. Cette méthode est applicable lorsque le témoin est représentatif (donc lorsque les apports intermédiaires entre témoin et aménagement ne sont pas significatifs).

Evolutions de l'algorithme (version 2019)

Débits réservés, écoulements visibles et salubrité

Depuis les aménagements sur le système Durance-Verdon, les débits observés correspondent aux débits réservés, c'est-à-dire que la majeure partie des écoulements est dérivée vers le canal usinier. Ce débit (juridiquement à la charge de l'exploitant) est à distinguer du débit de salubrité (à charge des prises) introduit dans la convention de 1953. Le débit de salubrité, intervenant pour déterminer le débit récupérable à Bonpas à des fins d'irrigation hors réserve, a initialement été fixé à 2 m3/s (jamais intégré dans l'algorithme). Il est défini comme le débit minimum pour garantir un état sanitaire (absence de marécage ou vasière, en lien avec la santé et l'hygiène). D'après le code de l'environnement, le débit réservé est le débit minimum biologique permettant d'assurer la permanence de la vie, la circulation et la reproduction des espèces vivantes. L'augmentation progressive des seuils minimaux à respecter (de 1/80ème du débit moyen annuel avant 1998 à 1/20ème après 2014) a conduit à différentes interrogations sur les implications en matière d'utilisation de la réserve. En pratique, augmenter le débit réservé induit la sollicitation de la retenue de Serre-Ponçon et, selon son imputation une baisse du volume disponible pour alimenter les canaux. Après des divergences d'interprétation des textes règlementaires entre EDF et la CED suite à la NT EDF « multi-usages » de 2013, une lecture partagée a été trouvé en 2016. Le débit réservé à Bonpas et sa prise en compte dans l'algorithme ont été précisés dans le protocole d'accord 2022. Il y est fait la distinction entre les valeurs règlementaires et la réduction appliquée sur le débit récupérable par les canaux à Bonpas (4,7 m3/s du 1er juillet au 15 août et 2 m3/s le reste de la période de calcul).

Prélèvements en moyenne Durance

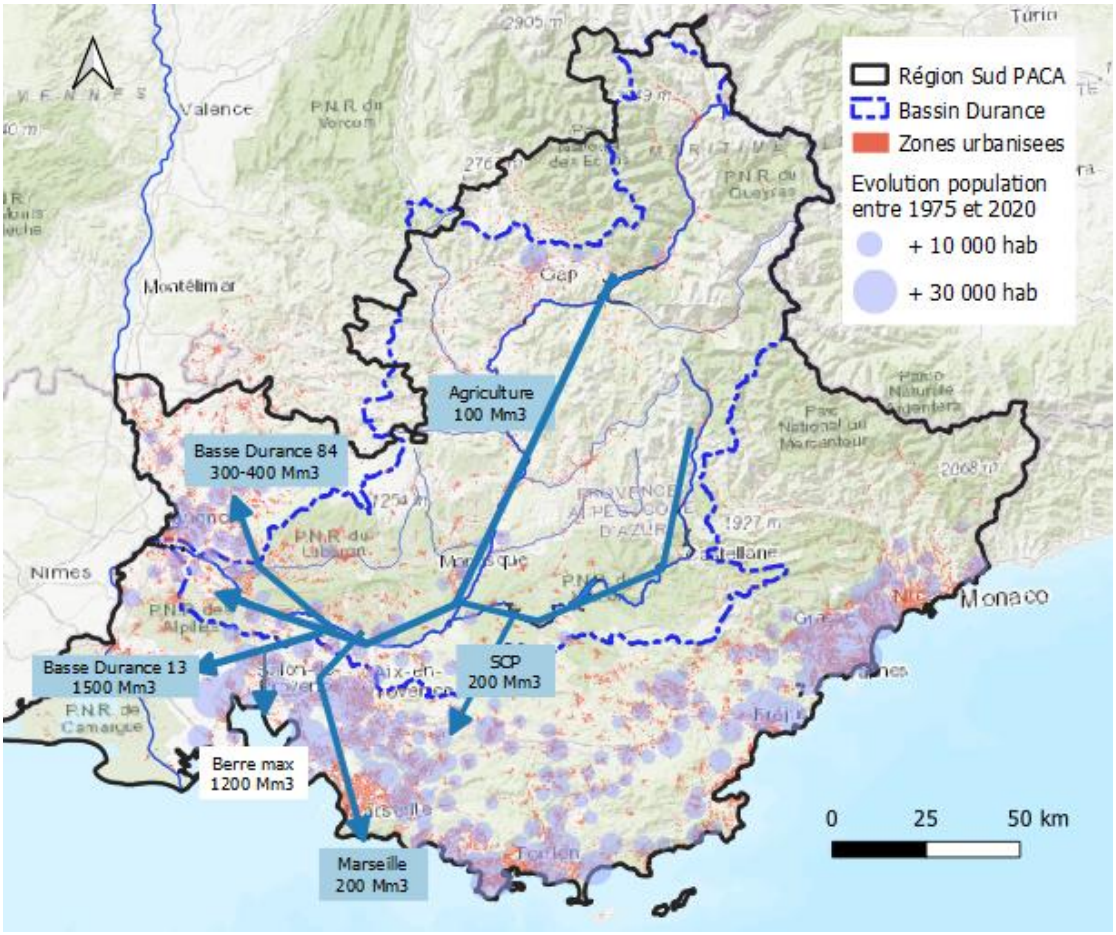
Entre Serre-Ponçon et Cadarache, les prélèvements agricoles sont différenciés selon qu'ils aient été autorisé avant ou après la construction des ouvrages par EDF (1955). Les premiers, au titre de l'article 12 du cahier des charges de la concession, ne sont pas intégrés dans le calcul de la ressource naturelle. Les seconds, au titre de l'article 50 du cahier des charges (approuvés et plafonnés par décret en 1959), sont totalement à la charge du concessionnaire. En pratique, il est difficile de différencier les prélèvements effectivement réalisés dont les droits sont antérieurs à 1955. EDF a dans un premier temps considéré une proportion théorique (basée sur des dotations des canaux) puis une modélisation hydro-climatique a été effectuée dans les années 2000 (prévisions opérationnelles de débits en différents points du bassin) et utilisée pour estimer les prélèvements « article 50 » (calé sur le rapport précédent). Des valeurs mensuelles moyennes ont alors été introduites dans l'algorithme (débits bruités au pas de temps journalier). L'évaluation a été revue en 2015 suite à une étude réalisée par un bureau d'études pour le compte de la DREAL. Cet état des lieux a permis d'identifier les prélèvements (amont Cadarache) et de les répartir par usage, de recenser les dispositifs de mesure et de compiler les bases de données existantes. Au total, plus de 400 prélèvements qui relèvent de l'article 50 ont été caractérisés (avec vérification terrain). Pour estimer les volumes mensuels prélevés par bénéficiaires d'autorisation article 50, il est également tenu compte valeurs forfaitaires correspondant à la Haute Durance (100 L/s), au Verdon (200 L/s) ainsi que les débits des conventions à titre onéreux (100 L/s). Au final, les prélèvements article 50 (autorisés après 1955) interviennent dans le calcul du déstockage dans le sens qu'ils ne sont pas imputables à la CED (volumes pris dans la tranche EDF, non garantis par la réserve agricole de Serre-Ponçon). A noter néanmoins que le fait de moyenner les prélèvements peut conduire à un préjudice pour la CED lors des années sèches.

Evaporation sur les retenues

L'évaporation physique au-dessus des surfaces d'eau libre est un phénomène par lequel l'eau sous forme liquide se transforme en vapeur. Ce processus dépend essentiellement de facteurs météorologiques (apport de chaleur et capacité de l'air à stocker la vapeur) et physiques (géométrie du plan d'eau et caractéristiques physiques de l'eau). Pour une quantification opérationnelle, il est communément admis que la formule empirique de Penman donne une approximation réaliste de ce phénomène de transfert simultané de chaleur et de matière. Attention la diversité des paramètres climatologiques représentés requiert une grande prudence dans l'utilisation de cette formule : les paramètres de cette formule doivent être recalés selon la situation géographique. De plus des chroniques de données météorologiques fiables doivent être disponibles (vitesse du vent, température et humidité). Une fois l'évaporation calculée (on parle de « lame d'eau évaporée », exprimée en mm ou L/m²), elle est convertie en débit à partir de relations surface-cote de la retenue. A titre indicatif, la lame d'eau moyenne annuelle évaporée à Sainte-Croix est autour de 1000 mm, 2/3 desquels s'évaporent l'été (soit environ 12 Mm3). La prise en compte de ce phénomène dans l'algorithme se fait de manière forfaitaire (moyenne mensuelle) et se limite à la retenue de Sainte-Croix. La justification de ne pas tenir compte de Serre-Ponçon tient à des arguments d'ordre historico-pratique : l'évaporation de Sainte-Croix est explicitement mentionnée dans une convention datant de 1961, et la participation de cette retenue aux usages agricoles de la Basse Durance est très faible.

Transferts d'eau en région PACA

Le déstockage de la réserve agricole de Serre-Ponçon est un élément parmi d'autres au sein des mécanismes de régulation et de gestion sectoriels de l'eau qui traverse la chaine Durance-Verdon, et plus largement le territoire délimité par la région PACA. Le système technique mis en place entre les années 50 et 70 permet d'introduire des variations artificielles des écoulements pour satisfaire différents besoins. La maitrise des écoulements se fait par ajustement permanent des paramètres du bilan hydraulique global. Mais depuis les années 2000, la montée en puissance de nouveaux enjeux ne simplifie pas la synchronisation des flux d'eau avec la production d'énergie par les écoulements. Il s'agit notamment d'usages environnementaux avec l'augmentation progressive du débit réservé (demande en eau écologique des cours d'eau), et d'usages ludiques avec le nautisme sur les lacs de retenue (gestion des cotes estivales des réserves).



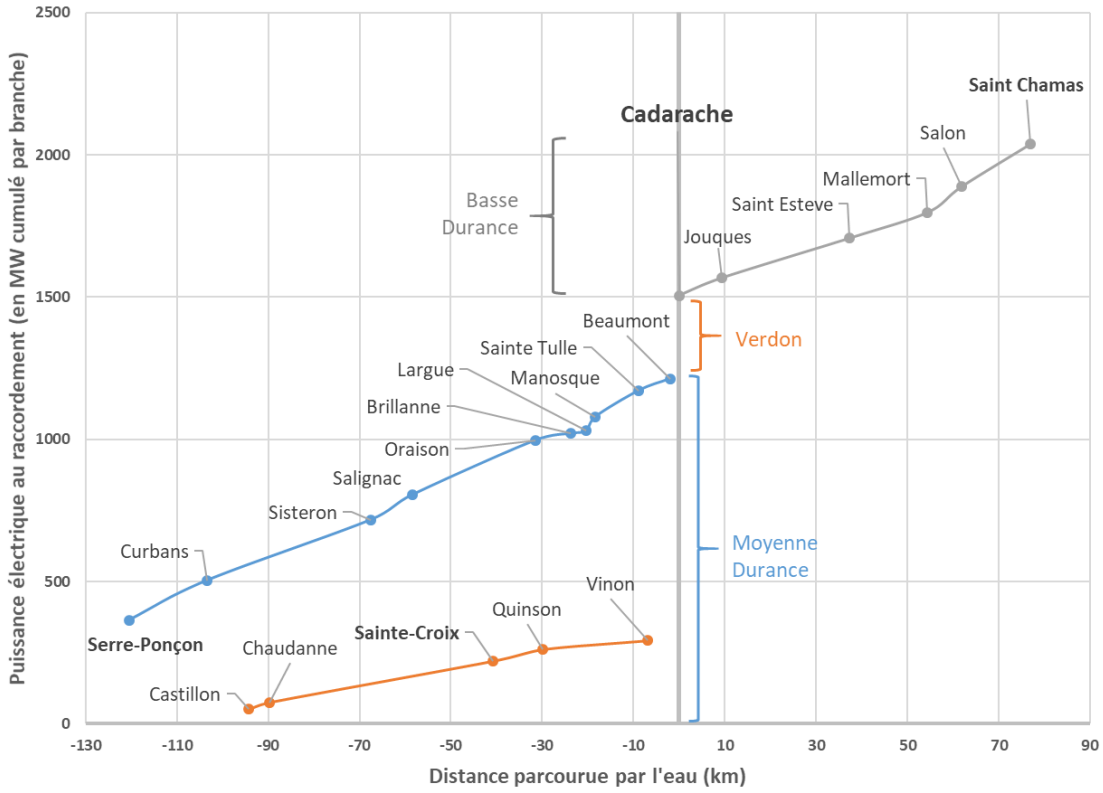
Grands transferts d'eau (SMAVD) et usages domestiques (OSO, INSEE)

L'eau est valorisée de nombreuses fois au cours de son cheminement à travers le bassin versant, et même au-delà (transferts hors bassin). On retient généralement les ordres de grandeurs suivants : 6,5 TWh/an d'énergie produite (soit environ 2,9 millions d'habitants), 80 000 hectares de terres agricoles irrigués, 3 millions d'habitants desservis en eau domestique (sur 5 millions au dernier recensement). Malgré l'interconnexion des réseaux de canaux (CED, SCP) via le canal usinier qui permet de nombreux échanges d'eau, l'évolution du régime hydrologique du fait du changement climatique laisse entrevoir de nombreuses difficultés à l'échelle de la région. On observe ces dernières années une baisse globale des apports annuels, et il faut s'attendre au maintien de cette tendance avec une réduction des précipitations neigeuses et du stock de neige, et une onde de fonte avancée avec un maximum de débit plus précoce. Ces changements vont fortement modifier la dynamique de remplissage des retenues et impacter l'ensemble des usages de l'eau sur le bassin, y compris l'agriculture en Basse-Durance dont l'approvisionnement en eau n'est plus complètement sécurisé. En témoigne les restrictions et fermeture de prise qui ont eu lieu au cours de la saison d'irrigation 2022.

Hydroélectricité

La technologie hydroélectrique permet de fabriquer de l'électricité par la force hydraulique. C'est un moyen de production rapidement mobilisable : l'eau stockée dans les retenues représente un stockage d'énergie pour satisfaire les consommations de pointe. La production d'énergie hydroélectrique entre dans le double contexte politique de transition énergétique et de gestion intégrée des eaux : majoritairement sollicitée pendant les vagues de froid, elle est soumise aux variations de débits saisonnières et interannuelles.

La chaine Durance-Verdon (14 barrages, 22 usines) est conçu pour qu'un même mètre cube d'eau soit plusieurs fois turbiné avant un autre usage. Ce système technique, connecté par un canal de 185 km reliant Serre-Ponçon à l'étang de Berre, introduit des variations artificielles des flux d'eau pour satisfaire notamment les besoins d'optimisation du système énergétique. La technique dites des éclusées synchrones (usines réparties en 3 files indépendantes) donne une grande réactivité et de la souplesse en exploitation. La gestion coordonnée des retenues et centrales comme un seul aménagement se fait de manière prévisionnelle (anticipation des apports et des sollicitations).



Energie produite par les flux d'eau, distance amont-aval de Cadarache

Les actions de déstockage visent à optimiser le placement de l'eau selon l'intérêt à turbiner du jour (prix de l'énergie, aléas météorologiques et techniques), les prévisions d'apport en eau et de demande en énergie, et les contraintes locales. La gestion des ouvrages est optimisée pour répondre aux demandes en eau domestique et agricole (droits d'eau), pour satisfaire les débits réservés et les cotes de compatibilité touristique des retenues. La satisfaction de ces demandes aval sont considérées prioritaires, au détriment de la production d'énergie en hiver.

L'énergie hydraulique produite par la chaine représente plus du tiers de la capacité de production régionale (en puissance raccordée). Avec la réduction des apports en amont, cette production a tendance à baissé, et la gestion se fait de plus en plus prudente afin de favoriser le remplissage des retenues (production limitée aux prélèvements en eau et au débit réservé). En 2022, la production a par exemple été réduite de plus de 50%.

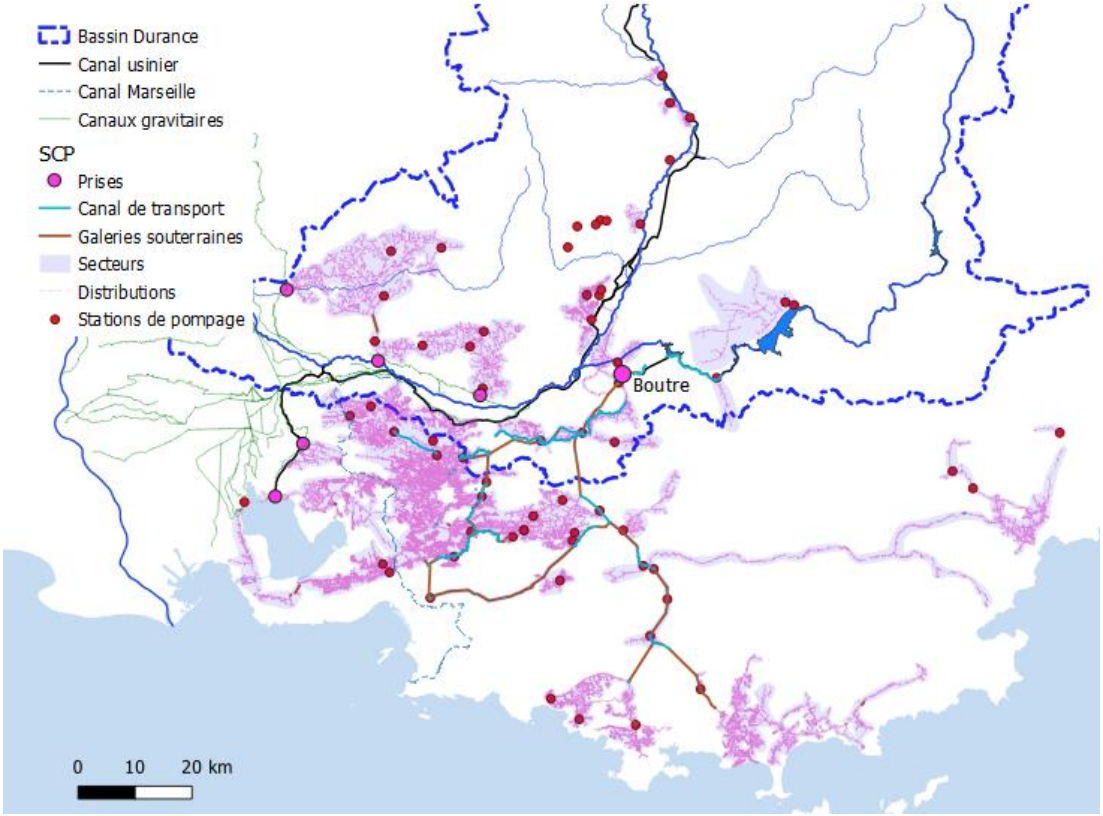
Malgré les nombreux bénéfices des transferts d'eau permis par la chaine Durance-Verdon, les impacts ne sont pas négligeables sur l'ensemble du linéaire : les prélèvements sont restitués mais après de longs tronçons court-circuités, le transport des sédiments est empêché et les milieux aquatiques sont discontinus. C'est dans l'étang de Berre, exutoire du système, que l'équilibre a été le plus bouleversé à cause d'apports massifs d'eau douce bouleversant l'équilibre de l'écosystème lagunaire. Cet enjeu a cristallisé les débats au début des années 2000, avec mise en place d'un quota et création d'un point triple à Mallemort ouvrant la possibilité de restituer les eaux en Durance.

Canal de Provence

Dès le 19ème siècle, les eaux du Verdon ont été transféré vers la ville d'Aix-en-Provence pour les usages domestiques. Au cours de la phase d'aménagement de la Durance, un canal a été construit entre 1964 et 1986 en remplacement du canal d'Aix mis hors service. La dotation du canal d'Aix (loi de 1923) a été transféré aux ouvrages du canal de Provence à partir de la prise de Boutre, dimensionnée sur la base des droits d'eau. Ce nouveau canal, d'une longueur de plus de 200 km, permet de diminuer la longueur du parcours grâce à 140 km de galeries souterraines, et de bénéficier d'une pression naturelle plus élevée aux points de distribution sur le littoral (prise à 340 m d'altitude). Dès sa construction, ce canal et l'ensemble des ouvrages et canalisations hydrauliques, est exploité par la Société du Canal de Provence (SCP). La SCP est une société d'aménagement à l'échelle

territoriale, avec un statut particulier de société commerciale avec des missions de service public en concertation avec les collectivités locales. En capacité de conduire la politique de travaux hydraulique, la SCP s'appuie sur une concession octroyée par l'Etat (aujourd'hui la Région) pour sécuriser l'alimentation en eau de différents usages.

Aujourd'hui, le réseau hydraulique maille le territoire régional (4500 km de canalisations d'adduction et distribution) et transfert l'eau du Verdon dans les Bouches-du-Rhône et le Var, permettant de subvenir aux besoins en eau domestique, industrielle et agricole (plus de 2 millions d'habitants et 70 000 hectares de terres agricoles potentiellement concernées). La SCP a mis au point un système de régulation qui gère automatiquement le Canal de Provence, permettant de ne transporter à chaque instant que l'exacte quantité d'eau appelée par les clients : la ressource n'est sollicitée qu'à hauteur des besoins à satisfaire à partir d'informations transmises par de capteurs et de prévisions de consommations.



Emprise du Canal de Provence en région PACA (sources : SCP, BD Hydra)

Le fonctionnement en gravitaire du canal permet de suivre la pente naturelle jusqu'au littoral tout en produisant de l'énergie grâce à 6 petites usines hydroélectriques. Cette production n'est pas négligeable car elle permet de couvrir près de la moitié de la consommation d'énergie de la SCP (hors systèmes de mise en pression au champ, type aspersion ou localisé), notamment par les 70 postes de pompages pour remonter l'eau et atteindre certains territoires.

L'algorithme de déstockage de la réserve agricole de Serre-Ponçon tient compte des débits prélevés par la SCP à Boutre dans le calcul de la ressource disponible à Cadarache, dans la limite de la dotation. De plus, les débits prélevés entre Cadarache et Saint-Chamas par la SCP, que ce soit sur le canal usinier ou un canal d'irrigation gravitaire, sont pris en compte et retranché au calcul des prélèvements imputables à la CED. Des données du type moyennes journalières de débits sont disponibles sur chacun de ces points de prélèvements.

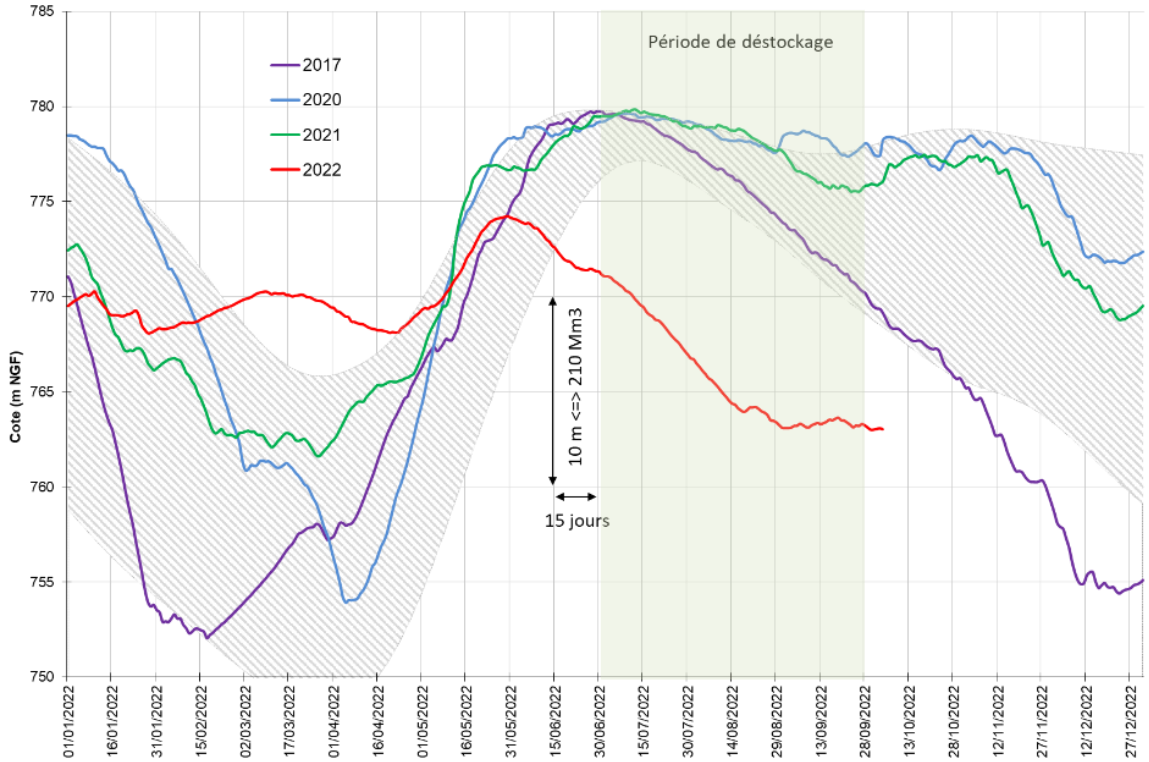
En région Sud PACA, 20% de la surface agricole utile est irriguée représente 70% de la valeur agricole produite. Le dernier recensement agricole (2020) montre une augmentation des surfaces irriguées depuis 2010, avec 160 000 hectares irrigable et 125 900 hectares effectivement irrigués par 8700 exploitations. Depuis les années 1980, les prélèvements d'eau pour l'irrigation sont globalement en baisse (de 2 000 Mm3 à 1 300 Mm3 en 2010).

Tourisme

Les demandes des professionnels du tourisme entre en concurrence avec les prélèvements agricoles. En 2022 par exemple la dégradation des conditions d'exploitation touristique du lac s'est manifesté par une perte de capacité portuaire significative malgré les mesures d'urgence (débarcadères légers), avec des pertes économiques importantes.

Ce graphique montre le niveau de l'eau dans la retenue de Serre-Ponçon sur les 4 années calendaires précédentes. Les 3 mois de la période de déstockage règlementaire sont représenté en fond vert, la zone en fond hachuré correspond à l'enveloppe la

plus probable d'après les chroniques des années précédentes. Ces cotes sont issues de la gestion des flux d'eau par EDF, leurs évolutions ne reflètent donc pas le déstockage de la réserve agricole. L'année 2022 (courbe en rouge) est remarquablement sèche avec un décrochage significatif par rapport aux autres années à partir de mi-mai, malgré une gestion particulièrement prudente d'EDF pendant l'hiver (maintien d'une cote haute).



Evolution de la cote de la retenue Serre-Ponçon

Ce graphique montre le niveau de l'eau dans la retenue de Serre-Ponçon sur les 4 années calendaires précédentes. Les 3 mois de la période de déstockage règlementaire sont représenté en fond vert, la zone en fond hachuré correspond à l'enveloppe la plus probable d'après les chroniques des années précédentes. Ces cotes sont issues de la gestion des flux d'eau par EDF, leurs évolutions ne reflètent donc pas le déstockage de la réserve agricole. L'année 2022 (courbe en rouge) est remarquablement sèche avec un décrochage significatif par rapport aux autres années à partir de mi-mai, malgré une gestion particulièrement prudente d'EDF pendant l'hiver (maintien d'une cote haute).

Bien plus localisée, la problématique de l'eau ludique n'émerge qu'à la fin des années 1990. Les principales retenues du bassin, les lacs de Serre-Ponçon et de Sainte-Croix participent pour une part significative du développement des territoires amont. De plus, les paysages contrastés, avec zones de montagne et secteurs de gorges escarpées offrent de nombreux atouts pour le secteur touristique. Les retombées économiques de cette forte attractivité sont loin d'être négligeables : le lac de Serre-Ponçon a en effet un rôle majeur dans l'économie des Hautes-Alpes (40% de l'activité touristique estivale).

En 1997 est créé le syndicat mixte d'aménagement de Serre-Ponçon (SMADESEP), en charge de la gestion des berges et donc du développement nautique et touristique du lac. En collaboration les préfectures, le SMADESEP a pour objectif la conservation de l'attractivité des plans d'eau et le maintien de la fonctionnalité des équipements nautiques. Le souci majeur du secteur est notamment la garantie d'une cote minimale du plan d'eau en été, peu compatible avec les besoins agricoles concomitants. En effet, il existe une relation directe entre le déstockage de la réserve agricole de Serre-Ponçon entre le 1er juillet et le 30 septembre et variation estivale du niveau du lac.

Une convention d'objectif a été établie entre EDF et le SMADESEP en 2015. D'une part EDF s'engage à intégrer dans sa gestion prévisionnelle un objectif de cote de « compatibilité touristique » sur la retenue de Serre-Ponçon, favorable au développement des activités nautiques, touristiques et sportives (soit une cote supérieur ou égale à 775 m NGF). D'autre part, le SMADESEP s'engage à étudier, mettre en œuvre et rendre compte des dispositions pour rendre accessible le plan d'eau sur une plage de marnage étendue. Cependant, le fait est que la cote demeure largement conditionnée par les apports naturels et que ceux-ci sont en baisse significative ces dernières années.

Conclusion

L'algorithme de déstockage est la traduction en chiffres de textes règlementaires anciens. Nous avons tenté de décrypter son fonctionnement et de restituer cette connaissance de façon la plus intelligible possible. Dans le contexte actuel de tension croissante sur la ressource, ce rapport propose un guide pour comprendre ce qu'est un algorithme de déstockage, ce que fait l'algorithme développé par EDF pour le calcul de la réserve agricole restante en cours de saison (fonctionnement, principales variables, mesures et incertitudes), et propose un petit tour d'horizon des principaux usagers de l'eau en région PACA.

Dans le contexte de l'année 2022, nous notons que l'algorithme ne considère pas de relation entre la ressource physique réellement disponible à Serre-Ponçon et la possibilité d'usage d'un volume d'eau en période estivale. De plus, l'anticipation des situations de crise est primordiale dans le cadre de la répartition, à la fois spatiale et temporelle, des restrictions au niveau de la Basse Durance, initiée en 2007 et largement appuyée par 2022. Les textes règlementaires et leur déclinaison opérationnelle dans l'algorithme ne permettent en effet qu'un fonctionnement a posteriori, d'où l'utilité pour les usagers de disposer de fichiers de déstockage fiables à une fréquence adaptée au rythme de l'évolution de la situation. Mais les calculs ne sont pas instantanés et le fonctionnement de l'algorithme n'est pas complètement automatisable (validation des chroniques mesurées et procédure de lissage) : les échanges à propos de l'état de la réserve agricole ont donc toujours un léger temps de retard.

Aides à la compréhension

Algorithme

Enoncé d'une séquence d'actions primitives (ou ensemble de règles opératoires) permettant de résoudre un problème au moyen d'un nombre fini d'opérations de calcul élémentaire. Ce processus de transformation de la connaissance de l'humain sur un problème en instructions mathématiques exécutées par l'ordinateur, nécessite de définir clairement le problème, chercher une méthode de résolution, déterminer la séquence d'instructions et tester.

- Donnée : valeur introduite par utilisateur pendant l'instruction du programme
- Constante : valeur fixe utilisée par le programme
- Variable : information identifiée par un nom et pouvant prendre différentes valeurs au cours du déroulement de l'algorithme (par exemple les niveaux de remplissage, les débits, le stock d'eau dans la réserve agricole)
- Identificateur : nom donné à un élément du programme
- Entrées / Sorties : échanges d'information entre mémoire (variable, constante) et périphériques (écran, clavier), entrées sont des éléments de base transformés ou utilisés dans la production des résultats (= données de sortie). Les données d'entrée peuvent être des mesures, des consignes ou des valeurs estimées
- Fichier : collection d'informations stockée sur un support physique, permet de conserver durablement l'information
- Organisation séquentielle : toutes les informations sont rangées de façon linéaire les unes à suites des autres

Termes utilisés

- Abaque : tableau ou graphique permettant d'opérer rapidement différents calculs numériques – par exemple, pour un seuil, l'abaque de débit du seuil donne le débit pour une cote donnée.
- Décharge : eau qui transite par le canal mais n'est pas turbinée (par ex. en cas de groupe indisponible)
- Déverse : eau qui n'est pas accumulée dans la retenue en période de crue
- Erreur de mesure : écart entre une valeur mesurée et une valeur de référence (considérée vraie)
- Incertitude : intervalle autour de la valeur mesurée dans lequel est supposée appartenir la valeur vraie de la grandeur
- Paramètre : coefficient (qui ne peut être mesuré directement) permettant d'ajuster une mesure ou un résultat de modèle
- Signal bruité : signal modifié par la présence de perturbations

Système de mesure

Un système de mesure est composé d'un ensemble de capteurs (1) et d'une organisation capable de compiler et de mettre en forme les informations recueillies (2).

(1) Les variables à suivre pour la mise en œuvre de l'algorithme ont été définies à partir des bilans hydrauliques (le maillage spatial dépend des aménagements de la chaine Durance-Verdon). Des capteurs permettant de fournir des mesures fiables de ces grandeurs d'intérêt (cf. Tableau 1) ont été mis en place par EDF dans le cadre de sa gestion des flux d'eau : les mesures ne sont pas uniquement dédiées à l'algorithme. Le maillage temporel d'intérêt pour l'algorithme est la journée : tous les capteurs fournissent à minima une valeur par jour.

(2) Les étapes de récolte traitement et partage des données font parties de toute activité métrologique. Des protocoles sont mis en place pour (i) récupérer les mesures depuis le capteur vers un centre de gestion local (en charge de sa maintenance), et (ii) centraliser les chroniques de données pour effectuer des traitements (validation des chroniques et calculs, dont lissage).

L'accessibilité de cette suite d'opérations permet de discuter de la fiabilité des capteurs (sensibilité, stabilité), de la représentativité du maillage (fréquence et répartition) et des contraintes opérationnelles (maintenance).

Documents consultés

EDF Service de la Production Hydraulique, Mode de calcul du déstockage de la réserve agricole de Serre-Ponçon, 1986

NT EDF-DTG, Convention Exécutive Durance Description de l'algorithme de déstockage de la réserve agricole de Serre-Ponçon, 2004, A. Belleville

NT EDF-DTG, Description de l'algorithme de déstockage de la réserve agricole de Serre-Ponçon, Mise à jour 2014, M. Bourqui

NT EDF-DTG, Description de l'algorithme de déstockage de la réserve agricole de Serre-Ponçon, Mise à jour 2019, M. Bourqui

Bulletins de situation CED 2022 : https://www.irrigation-ced-durance.fr/informations/actualites-de-l-eau/92-actualites-de-l-eau/ced/232-bulletin-de-la-ced

Textes règlementaires : https://www.irrigation-ced-durance.fr/ced/reglementation-et-documents

Protocole de gestion de crise CED 2013

Convention de partage d'information EDF-CED 2016

Protocole d'accord EDF-CED 2021

Nombreuses notes, comptes rendus et support de présentation fournis par les différents partenaires, dont différents schémas de synthèse du système Durance et un fichier de contrôle des données de l'algorithme de déstockage