



HAL
open science

Conduite réactive des systèmes dynamiques étendus à retards variables. Cas des réseaux hydrographiques

Eric Duviella

► **To cite this version:**

Eric Duviella. Conduite réactive des systèmes dynamiques étendus à retards variables. Cas des réseaux hydrographiques. Automatique / Robotique. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2005. Français. NNT: . tel-00010309

HAL Id: tel-00010309

<https://theses.hal.science/tel-00010309>

Submitted on 27 Sep 2005

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.

THÈSE

présentée pour obtenir
le grade de

Docteur de l'Institut National Polytechnique de
Toulouse

Spécialité SYSTEMES INDUSTRIELS

par

Eric Duviella
Ingénieur ENI Tarbes

*Conduite réactive des systèmes dynamiques étendus
à retards variables.
Cas des réseaux hydrographiques*

Soutenue le 17 juin 2005 devant la commission d'examen :

M ^{me}	Mireille BAYART	Professeur à Polytech'Lille	Rapporteurs
M.	Janan ZAYTOON	Professeur à l'Université de Reims Champagne-Ardennes	
M.	Philippe CHARBONNAUD	Professeur à l'ENIT	Examineurs
M ^{me}	Pascale CHIRON	Maître de Conférences à l'ENIT	
M.	Michel COMBACAU	Professeur à l'Université Paul Sabatier de Toulouse	
M.	Joseba QUEVEDO	Professeur à l'ESAI de l'UPC de Barcelone	
M.	Patrick HURAND	Directeur de l'Ingénierie à la CACG	Invité

Equipe d'accueil : Production Automatisée - Laboratoire Génie de Production - ENI de Tarbes

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués au sein de l'équipe Production Automatisée du Laboratoire Génie de Production de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes. Je remercie Monsieur Daniel Noyes, professeur à l'ENIT et directeur du LGP, de m'avoir accueilli au sein du LGP.

Je suis très honoré que Madame Mireille Bayart, professeur à Polytech'Lille, et Monsieur Janan Zaytoon, Professeur à l'Université de Reims Champagne-Ardennes, aient accepté la charge de rapporter sur mes travaux de recherche. Je remercie Monsieur Joseba Quevedo, Professeur à L'ESAI de l'Université Polytechnique de Catalogne, et Monsieur Michel Combacau, Professeur à l'Université Paul Sabatier de Toulouse, pour leur participation à mon jury de soutenance de thèse. Je remercie également Monsieur Patrick Hurand, Directeur de l'Ingénierie à la CACG, pour l'intérêt qu'il a su porter à mes travaux de recherche, pour son investissement, ainsi que pour sa présence à mon jury de thèse.

Je tiens à exprimer ma très profonde reconnaissance à mon directeur de thèse, Monsieur Philippe Charbonnaud, Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, pour avoir dirigé mes travaux de recherche. Je lui suis d'autant plus reconnaissant pour ses qualités et sa rigueur scientifiques, ainsi que pour ses qualités humaines. Je le remercie d'avoir participé à mes heures de travail.

Je suis très satisfait d'avoir été encadré, durant ces quatre années, par Madame Pascale Chiron, Maître de Conférences à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes. Je la remercie pour son investissement, sa disponibilité et son attention, pour ses relectures accompagnées de toutes les annotations et remarques faites tout au long des lignes de mon manuscrit, et finalement pour ses qualités humaines remarquables.

L'encadrement dont j'ai bénéficié durant ces quatre années de thèse a été très efficace grâce à la complémentarité de mes deux encadrants.

Mes remerciements vont également à l'encontre de Monsieur Francisco Carrillo et de Monsieur Frédéric Rotella, Professeurs à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, pour leur participation et le rôle joué dans l'avancée de mes travaux.

Je remercie toute ma famille, en particulier mes parents Michel et Maria-Rosario ainsi que mon frère Frank, pour leur soutien et leurs encouragements durant ces quatre années. Je remercie également Turnip, Yannick et Sebratine pour les bons moments passés avec eux, ainsi que pour leur soutien dans les moments difficiles. Merci à Cédrick, Vincent,

Raymond, Lotfi, Holitiana, François, Roberta, David, Soufiane, Smain, Jorge, Gabriel, ainsi que tous les membres de l'équipe de volley de Ger et le difficile Coach.

Et bien entendu, une pensée pour tous les gens de là-bas, et en particulier pour Léon, Gédéon, Antoine, Goubi, Fidèle. Je sais qu'ils sont très fiers du chemin parcouru.

Table des matières

Notations	9
Introduction	15
1 Conduite réactive des systèmes dynamiques étendus à retards variables	19
1.1 Introduction	19
1.2 Systèmes dynamiques étendus à retards variables	20
1.3 Cas des réseaux hydrographiques	23
1.4 Niveaux de conduite des réseaux hydrographiques	27
1.4.1 Gestion structurelle	28
1.4.2 Gestion des volumes	28
1.4.3 Gestion des débits	31
1.5 Problématique de la conduite réactive	34
1.6 Méthodes de commandes supervisées des Systèmes Dynamiques Hybrides .	37
1.7 Techniques de diagnostic	43
1.8 Conclusion	45
2 Supervision concourante et accommodation hybride de la commande	47
2.1 Introduction	47
2.2 Modèle conceptuel de stratégie de conduite réactive	49
2.3 Supervision concourante	51
2.4 Accommodation hybride de la commande	53
2.5 Transmission de commandes et protocole de communication	54
2.6 Conduite réactive pour la valorisation de la ressource en eau	55
2.7 Supervision concourante de l'état des ressources en eau	56
2.7.1 Synthèse du bloc de conditionnement	56
2.7.2 Synthèse du bloc de détection	57
2.7.3 Synthèse du bloc de diagnostic	60
2.8 Accommodation hybride de la commande pour un cours d'eau d'un seul bras	63
2.8.1 Synthèse du bloc de répartition de la ressource	63
2.8.2 Synthèse du bloc d'affectation	66

2.9	Accommodation de la commande pour des cours d'eau maillés	69
2.10	Formalisation hybride de la stratégie de conduite	74
2.11	Conclusion	75
3	Multimodélisation des réseaux hydrographiques	77
3.1	Introduction	77
3.2	Modélisation des systèmes hydrauliques à surface libre	78
3.3	Multimodélisation des systèmes hydrauliques à surface libre	81
3.4	Comparaison des algorithmes de multimodélisation	84
3.5	Multimodélisation d'une galerie à profil circulaire	89
3.6	Intérêt de la multimodélisation par rapport à une représentation aux dérivées partielles	94
3.7	Conclusion	97
4	Evaluation de la stratégie de conduite réactive	99
4.1	Introduction	99
4.2	Indicateurs de performance de la stratégie de conduite	100
4.3	Cas de gestion du réseau Neste	101
4.4	Multimodélisation du canal de la Neste	102
4.5	Conditionnement	105
4.6	Réglage des seuils de détection et de diagnostic	108
4.7	Implantation du simulateur	114
4.8	Evaluation de la stratégie de conduite réactive du canal de la Neste	117
4.9	Cas d'un réseau intégrant un confluent et un défluent	127
4.10	Conclusion	134
	Conclusion	135
	Annexe 1 : Coefficients de célérité et de diffusion des profils étudiés	139
1.1	Expression du coefficient de célérité C	139
1.2	Expression du coefficient de diffusion D	140
1.3	Coefficient de célérité C pour différents profils	140
1.3.1	Profil rectangulaire	140
1.3.2	Profil trapézoïdal	141
1.3.3	Profil triangulaire	141
1.3.4	Profil circulaire	142
	Annexe 2 : Profils moyens des tronçons du canal de la Neste	143

Annexe 3 : Multimodélisation	147
3.1 Canal de la Neste	147
3.2 Réseau hydrographique intégrant un confluent et un défluent	148
Bibliographie	151

Notations

- a_i : paramètres de la fonction de transfert en continu $F(s)$,
 a_M : argument maximum par rapport à M_i des consignes calculées,
 \mathcal{A}_i : apports du bief i ,
 A_i : inclusion différentielle,
 \mathbf{A} : ensemble des inclusions différentielles A_i ,
 b_i : paramètres de la fonction de transfert en discret $F(z)$,
 B : largeur du fond d'un cours d'eau [m],
 B_r : largeur du fond d'un cours d'eau du profil r [m],
 B_t : largeur du fond d'un cours d'eau du tronçon t [m],
 \mathbf{B} : matrice de commande,
 Bat : nombre de consignes envoyées aux vannes,
 $c_i, \neg c_i$: états correspondant respectivement à une ressource constante et non constante dans le temps,
 $\dot{c}_{+i}, \dot{c}_{-i}$: états correspondant respectivement à une ressource évoluant rapidement et lentement dans le temps,
 \mathbf{C} : matrice de sortie,
 C : coefficient de célérité [m/s],
 C_e : coefficient de célérité pour le débit de linéarisation Q_e ,
 C_M : coefficient adimensionnel caractérisant le comportement d'un bief,
 $d(t)$: variable de décision,
 d_i : variable issue de l'automate de détection du point de mesure M_i ,
 dth_i : seuil de diagnostic au niveau du point de mesure M_i [m^3/s^2],
 D_e : coefficient de diffusion pour le débit de linéarisation Q_e ,
 D : coefficient de diffusion [m^2/s],
 D_{0i}, D_{1i} : états de l'automate de détection,
 e : état discret,
 e_i : état discret de la ressource au point de mesure M_i ,
 e_{0i} : état de repos de l'automate de diagnostic,
 e_{+i}, e_{-i} : états correspondant respectivement à une ressource en excès et en manque,
 E : l'ensemble des états,
 Er_{\max} : pourcentage d'erreur maximale sur les plages de validité des multimodèles,

$f_{i,k}$: fonction de coût,
 \mathcal{F} : fonction non linéaire,
 $F(s)$: fonction de transfert de bief,
 \mathbf{F} : ensemble des champs de vecteurs,
 $F_0(s)$: fonction de transfert de bief nominale linéarisée,
 F_{\min} : débit minimum atteint en bout de canal [l/s],
 F_{\max} : débit maximum atteint en bout de canal [l/s],
 g : l'accélération de la pesanteur [m/s^2],
 G_j : $j^{\text{ième}}$ vanne,
 h : hauteur d'eau dans le canal [m],
 h_{M_i} : hauteur d'eau au point de mesure M_i [m],
 H : horizon d'envoi des consignes,
 H_{0i}, H_{1i} : hypothèses du test de Wald pour le point de mesure M_i ,
 i : indice de point de mesure,
 i_B : indice du premier profil composant le tronçon B ,
 \mathbf{I} : matrice identité,
 j : indice de vanne,
 J : pente de frottement,
 jp_i : saut de détection du test de Wald,
 kT_e : instant courant,
 K_j : critère de sollicitation,
 \mathcal{K} : ensemble des caractéristiques des systèmes dynamiques étendus,
 l : indice de la vanne la moins sollicitée,
 L : largeur du miroir d'un cours d'eau [m],
 m : nombre de point de mesure,
 m_b : fruit des berges d'un cours d'eau,
 N_m : nombre de modèles,
 M_i : $i^{\text{ième}}$ point de mesure, ou limnimètre,
 n : nombre de vannes,
 n_d : nombre d'états discrets e pris en compte lors du diagnostic,
 n_e : nombre d'états discrets e appartenant à l'ensemble E ,
 n_i : première vanne à considérer en amont ou en aval du point de mesure M_i ,
 n_M : coefficient de Manning,
 N_b : nombre de cours d'eau aval après une disjonction,
 o_i : conditions de transitions entre états de l'automate de diagnostic,
 O : l'ensemble des conditions de transitions entre états,
 p : prélèvements,
 p_e : perturbation,
 \mathcal{P}_i : prélèvements du bief i ,

P : périmètre mouillée [m],
 P_j : $j^{\text{ième}}$ processus (rivière ou canal),
 PF_i : probabilités de fausse alarme du test de Wald,
 PL_i : probabilités de manque de détection du test de Wald,
 P_T : pas de temps de simulation du logiciel SIC,
 \mathbf{P}_i : ensemble des stations de pompage installées au niveau du bief i ,
 q : débit [l/s] ou [m^3/s],
 q_{id_r} : débit du centre du sous-domaine r [m^3/s],
 q_{inf_r} : débit de la borne inférieur du sous-domaine r [m^3/s],
 q_{jobj} : débit objectif de la $j^{\text{ième}}$ vanne [m^3/s],
 q_l : débit latéral par unité de longueur [m^3/s], $q_l > 0$, : apports, $q_l < 0$: pertes,
 q_{sup_r} : débit de la borne supérieur du sous-domaine r [m^3/s],
 $\mathbf{q}_{M_i}^k$: vecteur de répartition,
 Q : débit [m^3/s],
 Q_e : débit de linéarisation [m^3/s],
 $Q_{j,k}$: débit de tronçon [m^3/s],
 Q_{\max} : débit maximal d'un cours d'eau [m^3/s],
 Q_{\min} : débit minimal d'un cours d'eau [m^3/s],
 $Q_{M_i,k}$: débit du point de mesure M_i à l'instant k [m^3/s],
 Q_{M_iobj} : débit objectif du point de mesure M_i [m^3/s],
 $\dot{Q}_{M_i,k}$: dérivée première du débit correspondant à sa tendance,
 $\ddot{Q}_{M_i,k}$: dérivée seconde du débit correspondant à son allure,
 Q_{e_i} : débit d'entrée du bief i ,
 Q_{s_i} : débit de sortie du bief i ,
 \mathbf{Q} : consignes d'affectation,
 r : indice de somme,
 $r(t)$: résidus,
 R : rayon du profil circulaire d'un bief [m],
 R_h : rayon hydraulique [m],
 R_L : fonction de Lyapunov,
 R_W : horizon du test de Wald,
 \mathbf{R} : ensemble des retenues d'un système hydrographique,
 S : section mouillée [m^2],
 $S(E, I, O)$: structure des automates hybrides,
 \mathbf{S}_i : ensemble des cours d'eau issus du bief i ,
 t : temps [s],
 t_0 : instant initial [s],
 t_i : instants [s],
 th_i : seuil fixe de détection au niveau du point de mesure M_i [m^3/s],

T_c : période de commande des vannes [s],
 T_d : période de détection [s],
 $T_{M_i,j,k}$: temps de transfert entre le point de mesure M_i et la vanne j [s],
 \mathbf{T} : instants d'affectation,
 $u(t)$: entrée du système,
 $u^{(i)}(t)$: $i^{\text{ème}}$ dérivée de $u(t)$,
 u_i : ouverture de la vanne G_i [m],
 u_{obj} : objectif de gestion,
 $U_{i,k}$: variable utilisée pour le test de Wald,
 \mathbf{u} : vecteur d'accommodation,
 v : vitesse d'évolution des grandeurs continues [m/s],
 \bar{v} : vitesse moyenne d'évolution du débit [m/s],
 V : vitesse de l'écoulement [m/s],
 $V_{i,k}$: variable utilisée pour le test de Wald,
 V_m : volume manquant en bout de canal [m³],
 V_M : volume excédentaire en bout de canal [m³],
 V_T : volume résiduel en bout de canal [m³],
 w_{d_i} : proportion de débit alimentant le cours d'eau i après une disjonction,
 w_r : proportion de débit alimentant le cours d'eau aval r ,
 $W_{i,k}$: somme cumulée utilisée pour le test de Wald,
 x : variable d'espace orientée dans le sens de l'écoulement [m],
 x : variable continue,
 x_{idr} : variable du centre du sous-domaine r [m³/s],
 x_{inf_r} : variable de la borne inférieur du sous-domaine r [m³/s],
 x_{max} : variable continue maximale,
 x_{med} : variable continue du centre du sous-domine,
 x_{min} : variable continue minimale,
 x_{sup_r} : variable de la borne supérieur du sous-domaine r [m³/s],
 \dot{x} : dérivée de la variable continue x ,
 x_{M_i} : grandeur mesurée en M_i ,
 \tilde{x}_{M_i} : grandeur conditionnée en M_i ,
 $\tilde{\dot{x}}_{M_i}$: dérivée de \tilde{x}_{M_i} ,
 X : longueur du cours d'eau [m],
 X_r : longueur du profil r [m],
 $y(t)$: sortie du système,
 $y^{(i)}(t)$: $i^{\text{ème}}$ dérivée de $y(t)$,
 z : hauteur absolue de l'eau dans le bief [m],
 z_b : cote absolue du fond du cours d'eau [m],
 α : pente du cours d'eau [rad],

α_C, α_D : paramètres dynamiques de l'équation de Trouvat,
 α_{M_i} : matrice des débits d'accommodation,
 β_C, β_D : paramètres dynamiques de l'équation de Trouvat,
 γ : paramètre donnant le signe de l'écart de débit ΔQ_{M_i} ,
 η : événement discret de sortie du système,
 θ : angle au centre [*rad*],
 $\vartheta_i, \neg\vartheta_i$: conditions de transition de l'automate de détection,
 κ : multiple entier de la période d'échantillonnage Te ,
 λ_j : priorité positive associée à la vanne G_i ,
 μ_j : priorité négative associée à la vanne G_i ,
 ρ : masse volumique de l'eau [*Kg/m³*],
 σ_i : l'écart-type du débit mesuré au point M_i ,
 ς_i : condition sur la variable $\ddot{Q}_{M_i,k}$ pour la transition entre états de l'automate de diagnostic,
 τ : retard [*s*],
 τ_i : retard du tronçon i [*s*],
 τ_d : retard de détection [*s*],
 $\tau_{j,k}$: temps de transfert de tronçon [*s*],
 τ_{med} : temps de transfert moyen d'un tronçon [*s*],
 τ_{min} : temps de transfert minimum d'un tronçon [*s*],
 τ_{max} : temps de transfert maximum d'un tronçon [*s*],
 $\chi_{M_i,j}$: paramètre de sélection de priorités selon γ ,
 ψ_i : condition sur le signe de la variable $\Delta Q_{M_i,k}$ pour la transition entre états de l'automate de diagnostic,
 ω_i : condition sur la variable $\dot{Q}_{M_i,k}$ pour la transition entre états de l'automate de diagnostic,
 Γ_p : générateur d'événements physiques,
 Δq : pas de débit,
 ΔQ_{M_i} : écart de débit au niveau du point de mesure M_i ,
 $\Delta \tilde{x}_{M_i}$: écart de la ressource au point de mesure M_i ,
 Π_C : pourcentage d'erreur sur les coefficients de célérité,
 Π_x : pourcentage d'erreur sur la variable x ,
 Π_τ : pourcentage d'erreur sur les temps de transfert,
 Σ : événement discret,
 Σ_o : règle de gestion et d'arbitrage,
 Σ_p : événement physique,
 Σ_c : événement de contrôle,
 Σ_v : événements non controlables,
 Ω : plage de validité lors de la multimodélisation,

Introduction

Les systèmes dynamiques étendus à retards variables peuvent être définis comme des systèmes complexes, géographiquement répartis, caractérisés par des temps de transfert variables, ainsi que par des non linéarités importantes. Ils sont en général utilisés pour satisfaire la demande liée aux activités humaines nécessitant le transport de flux. La satisfaction de la demande suppose une disponibilité constante de la ressource en tout point du système tout en minimisant les coûts de distribution. Ces objectifs sont en partie atteints par la définition et l'utilisation de politiques de gestion. Cependant, les systèmes dynamiques étendus sont soumis à des perturbations qui peuvent tout aussi bien modifier l'acheminement des flux que la nature et le volume des demandes. Il est alors nécessaire de mettre en place des niveaux de gestion permettant de réagir plus rapidement en fonction de ces aléas.

Dans le cadre de cette thèse, nous proposons une stratégie de conduite réactive visant à la valorisation des ressources des systèmes étendus. Ce travail propose une approche par supervision et accommodation hybride de la commande dans le but de répondre aux impératifs de valorisation des ressources. La stratégie de supervision présentée permet le diagnostic de l'état de la ressource en différents points des réseaux étendus. La stratégie d'accommodation hybride de la commande a pour rôle la détermination des consignes à appliquer aux actionneurs équipant les réseaux étendus dans le but de stocker les ressources excédentaires dans les réserves.

Nous avons participé à deux projets franco-espagnols successifs relatifs d'une part à la gestion des réseaux hydrographiques et à leur contrôle optimal¹, et d'autre part à la gestion des réseaux hydrographiques en périodes critiques². Les problématiques identifiées dans le cadre de travail de ces projets ont fait l'objet d'applications dans ce mémoire. Le deuxième projet nous a permis de poursuivre notre travail sur ce domaine d'applications en considérant des situations de fonctionnement extrêmes.

Les réseaux hydrographiques sont des systèmes transportant gravitairement des quan-

¹GERHYCO (2001-2002) est un projet regroupant un consortium de laboratoires de recherche, d'entreprise et de centre de transfert technologique : le LGP de Tarbes, l'UPC de Barcelone, le LEA-SICA de Toulouse, la CETENASA de Pampelune et la CACG de Tarbes, auxquels différents partenaires industriels ont été associés. [http :www.enit.fr/lgp/pa/gerhyco](http://www.enit.fr/lgp/pa/gerhyco).

²GERHYCO II (2003-2004) regroupe le consortium du projet GERHYCO auquel s'est joint le CEMA-GREF de Montpellier.

tités d'eau, utilisés pour répondre à des besoins liés aux activités humaines. Ils sont majoritairement composés de conduites à surface libre, tels que les rivières et les canaux, et sont, de ce fait, caractérisés par des non linéarités et des temps de transfert importants. Les politiques de gestion des eaux en général utilisées pour satisfaire la demande des usagers ne conduisent pas à une valorisation complète des ressources.

Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres. Dans le premier chapitre, une classe des systèmes dynamiques étendus à retards variables est définie. Nous rappelons différentes méthodes de représentation des systèmes dynamiques, nécessitant la prise en compte des retards variables et non linéaires directement dépendant des entrées du systèmes. Dans la classe de systèmes dynamiques étendus ainsi définie, nous présentons les caractéristiques et les fonctions des réseaux hydrographiques. La gestion de l'eau est réalisée selon trois niveaux de conduite ; la gestion structurelle, la gestion des volumes et la gestion des débits. Les techniques de gestion des réseaux hydrographiques sont résumées. Elles conduisent à la satisfaction des objectifs de gestion grâce au rejet de certaines perturbations sans toutefois en permettre une valorisation. Afin de répondre à cet objectif, nous proposons une stratégie de conduite d'une plus grande réactivité, basée sur des techniques de diagnostic et des méthodes de commandes supervisées des systèmes dynamiques hybrides. Ces techniques visent à satisfaire les objectifs de gestion de manière réactive en tenant compte des changements de l'état des ressources.

Dans le second chapitre, une stratégie de conduite réactive est proposée pour répondre à la problématique de valorisation de la ressource. Elle est conceptualisée sous la forme d'une architecture modulaire, composée d'une partie supervision concourante et d'une partie accommodation hybride de la commande. La supervision concourante permet le conditionnement des grandeurs mesurées au niveau des capteurs, la détection des écarts entre les grandeurs mesurées et celles attendues, et finalement le diagnostic de l'état de la ressource. Les fonctions de détection et de diagnostic sont réalisées grâce à l'emploi d'automates hybrides et selon des techniques de caractérisation des signaux. L'accommodation hybride de la commande conduit à la répartition de la ressource selon l'état de la ressource diagnostiquée en accord avec les objectifs de gestion, ainsi que la prise en compte des contraintes liées à la dynamique des systèmes étendus. Finalement, les actions de compensation sont transmises aux actionneurs du systèmes sous forme de nouvelles consignes. Les fonctions de la supervision sont détaillées dans le cadre de la valorisation des ressources des réseaux hydrographiques. Les fonctions de l'accommodation hybride de la commande sont décrites dans le cadre des réseaux hydrographiques simples, puis étendues aux cas des cours d'eau maillés composés d'au moins un point de confluence ou d'un point de défluence. Finalement, une formalisation hybride de la stratégie de conduite réactive est proposée.

Une démarche de multimodélisation de la dynamique des systèmes hydrauliques à surface libre selon trois approches relatives au débit, au temps de transfert et au coefficient

de célérité, est introduite dans le troisième chapitre. Elle permet de fixer le nombre de modèles et leur domaine de validité en fonction d'une erreur tolérée sur ces paramètres caractéristiques de la dynamique des systèmes hydrauliques. Les modèles sont identifiés autour de points de fonctionnement à partir de la simplification du modèle de l'onde diffusante. Les trois approches de multimodélisation sont testées et comparées sur l'exemple d'un canal de profil trapézoïdal. Par la suite, une galerie à profil circulaire est étudiée et sa dynamique est modélisée par l'approche de multimodélisation selon le coefficient de célérité. Le banc de modèles obtenu associé à une fonction de sélection de modèles, est comparé par simulation à l'approche de modélisation par résolution des équations aux dérivées partielles de Saint-Venant. Les résultats obtenus permettent de juger de l'efficacité de la démarche de multimodélisation.

Le quatrième chapitre a pour objet l'évaluation de la stratégie de conduite réactive proposée. Des indicateurs de performance sont tout d'abord définis. La stratégie est mise en œuvre dans le cadre de la problématique de valorisation de la ressource du canal de la Neste dans le sud ouest de la France. L'approche de multimodélisation est utilisée afin de régler les fonctions composant la stratégie de conduite réactive. Nous proposons ensuite un simulateur couplant Matlab/Simulink dans lequel a été implanté la stratégie de conduite réactive, à un logiciel de simulation hydraulique reproduisant fidèlement la dynamique des systèmes hydrauliques à partir des données géométriques issues des systèmes réels. Le simulateur conçu permet l'évaluation par simulation de la stratégie de conduite réactive sur le modèle du canal de la Neste en considérant plusieurs scénarios de fonctionnement. Les résultats de simulation obtenus sont présentés. Finalement, la stratégie de conduite est testée par simulation sur un canal composé d'un confluent et d'un défluent. Cette exemple de réseau hydrographique permet de conclure sur la généralité de la stratégie de conduite réactive.

Chapitre 1

Conduite réactive des systèmes dynamiques étendus à retards variables

1.1 Introduction

Nous souhaitons dans ce chapitre introduire les systèmes faisant l'objet de notre étude. Un système peut être analysé comme un ensemble d'éléments agencés, lui conférant des propriétés particulières. Lorsqu'ils sont répartis sur des lieux distants entre eux, ceux-ci forment un système qualifié d'étendu. Qu'il s'agisse de systèmes d'information, d'infrastructures ou d'acteurs, les systèmes étendus ont la particularité de véhiculer des flux. Le transport des flux est dit statique ou dynamique selon que des échanges entre les différents éléments sont réalisés instantanément, ou non. Les réseaux de distribution d'eau potable, de gaz ou d'électricité sont des exemples des systèmes étendus statiques. Le transport des flux étant réalisé sous pression ou quasiment instantanément comme dans le cas des réseaux électriques, les relations entre les entrées et les sorties considérées ne sont pas dépendantes du temps. Par contre, dans le cas des systèmes dynamiques étendus, il est nécessaire de tenir compte des retards entre les entrées et les sorties du réseau. Ces retards sont généralement variables puisqu'ils sont directement dépendants de la valeur des entrées. Nous allons considérer dans ce travail une classe de systèmes dynamiques étendus à retards variables que nous définissons dans la première section.

Les réseaux hydrographiques sont des systèmes géographiquement répartis qui appartiennent à cette catégorie de systèmes. Ils sont composés de retenues, de cours d'eau, de canaux, de galeries, et équipés partiellement ou totalement de systèmes de mesure et de commande. Ils véhiculent des quantités d'eau d'amont en aval, gravitairement. Leurs particularités sont présentées dans la deuxième partie de ce chapitre.

Les réseaux hydrographiques sont utilisés afin de répondre aux besoins liés à l'activité

humaine. La mise en place d'une politique de l'eau structurée suivant différents niveaux de gestion contribue à la satisfaction de la demande à chaque instant et tout au long de l'année. Les différents niveaux de gestion généralement utilisés sont décrits dans la troisième section.

Dans un contexte de raréfaction de la ressource en eau, une gestion efficace conduisant à la valorisation des quantités d'eau est indispensable. Elle consiste en une répartition équitable des quantités d'eau disponibles et en un ré-acheminement des excédents d'eau vers les retenues aval pour y être stockés. Les méthodes de gestion actuelles ne permettent qu'en partie de répondre à ces objectifs. Cela nous amène à définir une problématique de conduite de systèmes dynamiques étendus satisfaisant ce type d'objectifs. Elle est présentée dans la quatrième section.

Nous souhaitons proposer une stratégie de conduite réactive. Une solution possible est basée sur les techniques de commande supervisée proposées pour le cas des systèmes dynamiques hybrides. La cinquième partie sert de cadre à un Etat de l'Art des méthodes de spécification de la conduite réactive de systèmes étendus.

Finalement dans la sixième partie, nous présentons des techniques de diagnostic permettant de détermination de l'état des ressources, en s'intéressant particulièrement aux techniques de caractérisation qualitative des signaux.

1.2 Systèmes dynamiques étendus à retards variables

L'objet de notre étude est lié au comportement des systèmes dynamiques étendus à retards variables. Nous allons rappeler les définitions et les notations utiles à la présentation de notre stratégie de conduite dans cette section.

Les systèmes considérés sont causaux, la relation entre l'entrée u et la sortie y est modélisée par :

$$y(t) = \mathcal{F}(\{u(t_0) : -\infty < t_0 \leq t\}, t), \quad (1.1)$$

où t_0 représente l'instant à partir duquel une réponse est présente en sortie et \mathcal{F} une fonction non linéaire de l'entrée. Lorsqu'un système est linéarisé autour d'un point de fonctionnement, la relation (1.1) devient :

$$y(t) = \int_{-\infty}^t h(t, t_0)u(t_0)dt_0, \quad (1.2)$$

où $h(t, t_0)$ est la réponse à l'impulsion $\delta(t - t_0)$ appliquée au système à l'instant t_0 .

Généralement, la dynamique des systèmes est régie par les lois fondamentales de la physique mises sous forme d'équations différentielles tenant compte de plusieurs variables indépendantes ainsi que de leurs dérivées successives. Pour le cas où l'entrée et la sortie

ne dépendent que de la variable t , une équation différentielle ordinaire (EDO) s'écrit :

$$y^{(n)}(t) + \sum_{i=0}^{n-1} a_i y^{(i)}(t) = \sum_{i=0}^m b_i u^{(i)}(t), \quad (1.3)$$

où $u^{(i)}(t)$ et $y^{(i)}(t)$ sont respectivement la $i^{\text{ème}}$ dérivée de $u(t)$ et la $i^{\text{ème}}$ dérivée de $y(t)$, a_i et b_i sont des coefficients constants avec $m \leq n$.

L'EDO (1.3) peut être écrite sous forme d'état :

$$\begin{cases} \dot{x} = \mathbf{A}x + \mathbf{B}u, \\ y = \mathbf{C}x. \end{cases} \quad (1.4)$$

où \mathbf{A} , \mathbf{B} et \mathbf{C} sont respectivement les matrices d'état, de commande et de sortie de dimensions appropriées. Déterminer les trajectoires $x(t)$ solutions de (1.4) nécessite la connaissance des conditions initiales.

Pour le cas de plusieurs variables indépendantes et de leurs dérivées, une équation aux dérivées partielles (EDP) peut être établie. Une EDP dont les entrées et sorties sont dépendantes de deux variables x et t s'exprime par :

$$\frac{\partial y^{(n)}(x, t)}{\partial^{(n)}t} + \frac{\partial y^{(n)}(x, t)}{\partial^{(n)}x} + \sum_{i=0}^{n-1} a_i \frac{\partial y^{(i)}(x, t)}{\partial^{(i)}t} + \sum_{i=0}^{n-1} c_i \frac{\partial y^{(i)}(x, t)}{\partial^{(i)}x} = \frac{\sum_{i=0}^m b_i \frac{\partial u^{(i)}(x, t)}{\partial^{(i)}t} + \sum_{i=0}^m d_i \frac{\partial u^{(i)}(x, t)}{\partial^{(i)}x}}{\partial^{(i)}x}, \quad (1.5)$$

où a_i , b_i , c_i et d_i sont des coefficients constants, $\frac{\partial y^{(i)}(x, t)}{\partial^{(i)}t}$ et $\frac{\partial y^{(i)}(x, t)}{\partial^{(i)}x}$, $\frac{\partial u^{(i)}(x, t)}{\partial^{(i)}t}$ et $\frac{\partial u^{(i)}(x, t)}{\partial^{(i)}x}$ sont respectivement les $i^{\text{ème}}$ dérivées de $y(x, t)$ et de $u(x, t)$ par rapport à t et à x .

La résolution de 1.5 suppose, lorsqu'elle ne peut pas être réalisée analytiquement, le recours à un schéma de discrétisation numérique ainsi que la définition de conditions initiales et de conditions limites. Lorsque l'on souhaite travailler sur une plage restreinte de fonctionnement, il est possible de modéliser la dynamique des systèmes grâce à une linéarisation autour d'un point de fonctionnement.

Les systèmes dynamiques étendus sont caractérisés par des retards dus aux distances importantes à parcourir par rapport à la vitesse du flux les parcourant. Dans une première approche, ils peuvent être représentés par un modèle linéaire à retard constant donné par (1.6) lorsque le retard est en entrée ou par (1.7) lorsqu'il est exprimé en sortie [Palmor, 1996].

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \mathbf{A}x(t) + \mathbf{B}u(t - \tau), \\ y(t) = \mathbf{C}x(t), \end{cases} \quad (1.6)$$

où τ représente le retard, et les matrices \mathbf{A} , \mathbf{B} et \mathbf{C} sont constantes et indépendantes du temps.

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \mathbf{A}x(t) + \mathbf{B}u(t), \\ y(t) = \mathbf{C}x(t - \tau). \end{cases} \quad (1.7)$$

La fonction de transfert identifiée à partir des équations d'état (1.6) ou (1.7) est donnée par :

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = F(s) = F_0(s)e^{-\tau s}, \quad (1.8)$$

où s est la variable de Laplace et $F_0(s) = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B}$. Dans la pratique, lorsque la totalité du domaine d'évolution des systèmes est considérée, leur dynamique doit être modélisée selon plusieurs modes de fonctionnement. Ces systèmes sont alors à paramètres variables.

Une deuxième approche [Kamen, 1996] nous permet de représenter les systèmes dynamiques linéaires à paramètres $a_i(t)$ et $b_i(t)$ dépendant du temps de dimension finie lorsqu'il existe une relation entre l'entrée $u(t)$ et la sortie $y(t)$ décrite par :

$$y^{(n)}(t) + \sum_{i=0}^{n-1} a_i(t)y^{(i)}(t) = \sum_{i=0}^m b_i(t)u^{(i)}(t), \quad (1.9)$$

où $a_i(t)$ et $b_i(t)$ sont des coefficients dépendant du temps t , $m \leq n$, $y^{(i)}(t)$ et $u^{(i)}(t)$ sont respectivement la $i^{\text{ème}}$ dérivée de $y(t)$ et de $u(t)$.

La représentation d'état d'un système dynamique linéaire à paramètres dépendant du temps est ensuite obtenue (1.10) à partir de la relation (1.9).

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \mathbf{A}(t)x(t) + \mathbf{B}(t)u(t), \\ y(t) = \mathbf{C}x(t), \end{cases} \quad (1.10)$$

où la matrice de sortie \mathbf{C} est constante et les matrices $\mathbf{A}(t)$, $\mathbf{B}(t)$ sont dépendantes du temps et représentées par :

$$\mathbf{A}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -\alpha_0(t) \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & -\alpha_1(t) \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & -\alpha_2(t) \\ \dots & & & \dots & & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -\alpha_{n-2}(t) \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -\alpha_{n-1}(t) \end{bmatrix}, \quad (1.11)$$

$$\mathbf{B}(t) = \begin{bmatrix} \beta_0(t) \\ \beta_1(t) \\ \beta_2(t) \\ \dots \\ \beta_{n-2}(t) \\ \beta_{n-1}(t) \end{bmatrix}, \quad (1.12)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1.13)$$

où $\alpha_i(t)$ est fonction de $a_i(t)$ et de ses dérivées, et $\beta_i(t)$ est fonction de $b_i(t)$ et de ses dérivées. La difficulté rencontrée lors de l'utilisation de cette représentation réside dans l'identification des paramètres $\alpha_i(t)$ et $\beta_i(t)$.

Une troisième approche peut être considérée [Bruzelius, 2004] dans le cas de la modélisation linéaire de plusieurs modes de fonctionnement pour lesquels les paramètres dépendent des états du système. La représentation d'état d'un tel système pour un retard τ donné est :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \mathbf{A}(x(t))x(t) + \mathbf{B}(x(t))u(t - \tau), \\ y(t) = \mathbf{C}(x(t))x(t), \end{cases} \quad (1.14)$$

où les matrices $\mathbf{A}(x(t))$, $\mathbf{B}(x(t))$ et $\mathbf{C}(x(t))$ sont dépendantes de l'état du système $x(t)$.

La modélisation (1.14) peut être généralisée par une représentation sous forme d'inclusions différentielles linéaires [Boyd *et al.*, 1994, Ghaoui & Niculescu, 2000] exprimées sous la forme :

$$\dot{x}(t) \in \mathbf{A}x(t), \quad (1.15)$$

où \mathbf{A} est fourni par une interpolation convexe (*Co*) d'un ensemble de matrices :

$$\mathbf{A} = \text{Co} \{ \mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \dots, \mathbf{A}_p \}. \quad (1.16)$$

telles que :

$$\mathbf{A} = \left\{ \sum_{i=1}^p \alpha_i \mathbf{A}_i : \alpha_i \geq 0, \sum_{i=1}^p \alpha_i = 1 \right\} \quad (1.17)$$

Les inclusions différentielles linéaires peuvent être représentées par un ensemble convexe de modèles linéaires à retard constant correspondant à chaque mode de fonctionnement i considéré. Les fonctions de transfert identifiées sont données par :

$$F_i(s) = F_{0_i}(s)e^{-\tau_i s}, \quad (1.18)$$

avec $F_{0_i}(s) = \mathbf{C}_i(s\mathbf{I} - \mathbf{A}_i)^{-1}\mathbf{B}_i$, où s est la variable de Laplace, et \mathbf{A}_i , \mathbf{B}_i et \mathbf{C}_i sont les matrices dépendant du mode de fonctionnement i considéré.

Nous retiendrons cette dernière modélisation des systèmes dynamiques étendus et nous nous intéressons au cadre d'application relatif aux réseaux hydrographiques.

1.3 Cas des réseaux hydrographiques

Cette section a pour objet la présentation des caractéristiques et des fonctions des réseaux hydrographiques, ainsi que de leurs différents modes de gestion. Les réseaux hydrographiques composés de rivières pouvant atteindre plusieurs centaines de kilomètres forment des réseaux gravitaires géographiquement répartis. Ils appartiennent à la classe

des systèmes dynamiques étendus non linéaires à retards variables. Pour faire face à l'accroissement de la population et de ses activités, les réseaux hydrographiques ont du être progressivement équipés et gérés. Au cours des siècles, des barrages et des retenues ont été construits pour accroître les ressources en eau, et des canaux et des galeries ont été aménagés afin de véhiculer l'eau aux endroits de consommation. Les barrages et les retenues sont implantés le plus en amont possible des réseaux afin de faciliter la gestion de la ressource. Les différents usages de l'eau sont répertoriés dans [Valiron, 1990]. L'eau est utilisée à des fins de dilution des effluents industriels, urbains, agricoles et naturels, de potentiel énergétique et de refroidissement pour l'industrie. L'eau est également indispensable à l'alimentation des cours d'eau, la navigation, le maintien de la vie animale et végétale, l'alimentation des hommes et des animaux, ainsi qu'à l'environnement par sa valeur écologique et récréative. Pour satisfaire efficacement les besoins, les réseaux hydrographiques ont également été équipés de réseaux d'actionneurs, de vannes, de capteurs, et de systèmes de mesure. La description et le fonctionnement des différents équipements des réseaux hydrographiques sont détaillés dans [Valiron, 1988]. Les actionneurs sont utilisés pour contrôler le stockage et l'acheminement des ressources en eau. Les capteurs sont utilisés afin d'évaluer les quantités et la qualité des ressources stockées ou véhiculées. Nous avons adopté une représentation graphique des réseaux hydrographiques réalisée à l'aide de graphes orientés et de noeuds [Parent, 1991]. La figure 1.1.a est une représentation d'une partie de la rivière Baïse affluent de la Garonne en Gascogne. La convention de représentation adoptée est illustrée sur la figure 1.1.b. Celle-ci permet de visualiser le sens des écoulements, les interactions entre cours d'eau et le positionnement des barrages, des capteurs et des actionneurs.

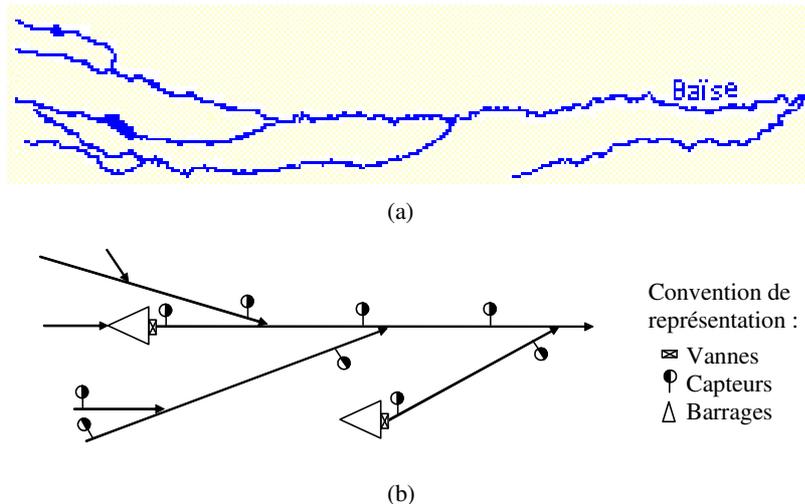


FIG. 1.1 – (a) Partie du réseau hydrographique de la Baïse en Gascogne affluent de la Garonne et (b) sa représentation graphique.

La description du fonctionnement des réseaux hydrographiques peut être réalisée de manière statique ou dynamique. Devant la complexité des configurations possibles, elle nécessite en premier lieu la décomposition des réseaux hydrographiques (figure 1.2.a) en systèmes hydrauliques (figure 1.2.b). Les systèmes hydrauliques considérés sont les rivières, les canaux et les galeries dont l'écoulement est à surface libre. Par la suite, les systèmes hydrauliques sont décomposés en biefs (figure 1.2.c). Un bief est une partie d'un système hydraulique située entre deux points de mesure, entre deux vannes, entre un point de mesure et une vanne ou entre une vanne et un point de mesure. Dans l'exemple présenté sur la figure 1.2, le réseau hydrographique est décomposé en cinq systèmes hydrauliques. Ces derniers sont ensuite décomposés en biefs. Les biefs considérés dans cet exemple sont délimités par des points de mesure.

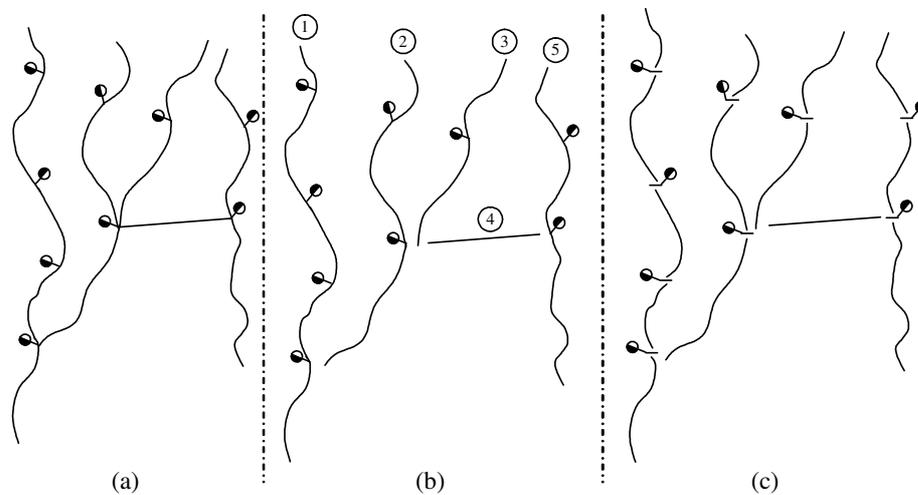


FIG. 1.2 – (a) Réseau hydrographique décomposé en (b) systèmes hydrauliques et en (c) biefs.

La description statique des biefs consiste à réaliser un bilan de matière au niveau de chaque bief i en considérant le débit d'entrée Q_{e_i} , débit de sortie Q_{s_i} , les apports \mathcal{A}_i et les prélèvements \mathcal{P}_i (figure 1.3 inspirée du modèle d'organisation des flux au niveau d'un nœud [Faye, 1999]). Le débit de sortie du bief i correspond au débit d'entrée du bief $i + 1$.

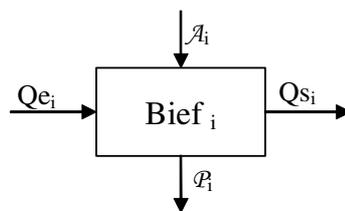


FIG. 1.3 – Modèle statique d'un bief.

La dynamique de chaque bief peut être modélisée de façon assez fine par les équations de Saint Venant [Chow *et al.* , 1988, Litrico & Georges, 1999a]. Ces équations forment un système d'EDP hyperboliques du premier ordre non-linéaire. Il est composé d'une équation de continuité et d'une équation dynamique (1.19), obtenues en considérant les hypothèses principales suivantes :

- l'écoulement est mono-dimensionnel,
- la pente du bief est faible ($\sin \alpha \approx \alpha$),
- la masse volumique de l'eau ρ est considérée comme constante,
- la répartition des pressions est hydrostatique,
- les effets de la viscosité interne sont négligeables devant les frottements externes.

$$\begin{cases} \frac{\partial S(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial Q(x,t)}{\partial x} = q_l, \\ \frac{\partial Q(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2(x,t)}{S(x,t)} \right) + gS \frac{\partial z(x,t)}{\partial x} + gSJ = kq_l V, \end{cases} \quad (1.19)$$

où t est le temps [s],

x la variable d'espace orientée dans le sens de l'écoulement [m],

S la section mouillée [m^2],

Q le débit à travers la section S [m^3/s],

q_l le débit latéral par unité de longueur [m^2/s], $q_l > 0$, : apports, $q_l < 0$: pertes,

g l'accélération de la pesanteur [m/s^2],

z la hauteur de l'eau [m] (la pente du bief étant faible, la hauteur d'eau peut être mesurée selon l'axe vertical),

J la pente de frottement,

V la vitesse de l'écoulement [m/s],

$k = 0$ si $q_l > 0$, et $k = 1$ si $q_l < 0$.

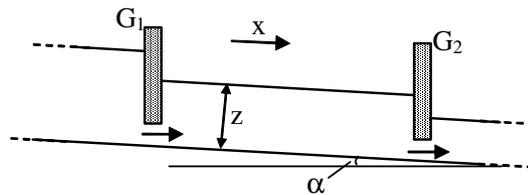


FIG. 1.4 – Bief de canal situé entre les vannes G_1 et G_2 .

La pente de frottement J peut être exprimée à partir de plusieurs formules empiriques [Kovacs, 1988]. En règle générale, la formule de Manning-Strickler donnée par la relation (1.20) est utilisée. La pente de frottement J est considérée comme étant égale à la pente du bief α lorsque la profondeur de l'écoulement est normale [Georges & Litrico, 2002] :

$$J = \frac{Q^2 n_M^2 P^{\frac{4}{3}}}{S^{\frac{10}{3}}}, \quad (1.20)$$

où n_M est le coefficient de Manning associé au type de cours d'eau considéré (rivière, canal) et à la nature du fond du cours d'eau. Le coefficient de Manning est l'inverse du coefficient de Strickler. Plus la surface des parois est lisse, plus le coefficient de Strickler est élevé (il est compris entre 50 et 96 pour un canal en béton). La détermination du coefficient de Strickler peut être réalisée à partir de la connaissance physique du cours d'eau ou par identification [Ooi *et al.*, 2003].

Compte-tenu de la dynamique non linéaire à retards variables, de la taille et de la multitude de configurations possibles des réseaux hydrographiques, ainsi que du nombre d'acteurs concernés, la gestion de la ressource en eau offre des problématiques variées. D'un point de vue du gestionnaire, celles-ci concernent le choix des horizons de gestion (horaire, journalier, hebdomadaire, bimensuel, annuel, inter-annuel), de l'importance des usages (définition de priorités entre usages), de l'implantation de nouvelles zones de stockage ou d'activités, etc. ; d'un point de vue scientifique, elles concernent l'étude du comportement des réseaux hydrauliques, la régulation de cours d'eau, la surveillance et la gestion des retenues, la conduite réactive, la gestion en périodes critiques, etc..

1.4 Niveaux de conduite des réseaux hydrographiques

La gestion des réseaux hydrographiques consiste à satisfaire l'ensemble des besoins à un coût minimum pour la collectivité, en limitant les concurrences entre les divers usages et en préservant l'environnement [Valiron, 1990]. Les objectifs et les contraintes de la gestion des réseaux hydrographiques sont définis dans [Faye, 1999]. Nous rappelons que la ressource doit être disponible en continu tant en quantité qu'en qualité. La satisfaction des usages nécessite une conduite des systèmes hydrographiques qui peut être décrite par trois niveaux de gestion principaux sur des horizons temporels différents, dont nous avons résumé les cycles sur la figure 1.5.

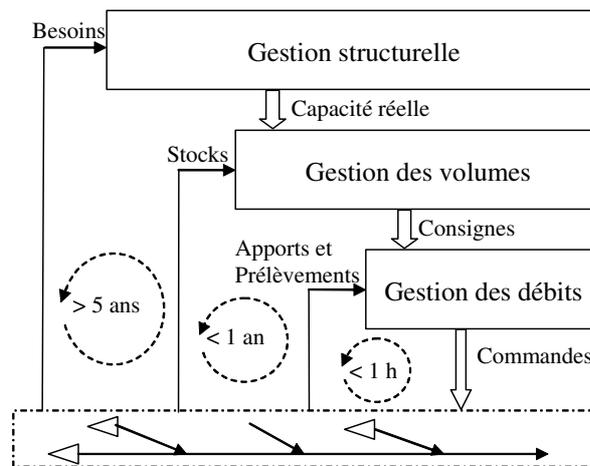


FIG. 1.5 – Niveaux de gestion des réseaux hydrographiques.

Les trois niveaux correspondent à une gestion structurelle, une gestion des volumes et une gestion des débits [Georges & Litrico, 2002, Hurand & Kosuth, 1993]. Pour chaque niveau, une politique, une tactique ou des objectifs opérationnels sont généralement définis.

1.4.1 Gestion structurelle

La gestion structurelle d'une durée supérieure à cinq ans consiste en une adaptation de l'offre globale par rapport à la demande totale. Cette mise en corrélation nécessite la détermination de la demande en eau et des capacités de stockage, ainsi que la prévision de leur évolution. Dans le cas où la demande est supérieure à l'offre, il est nécessaire de réguler la demande ou d'augmenter les capacités de stockage. Les actions à entreprendre sont définies par une politique de l'eau, appelée gestion globale des eaux [Valiron, 1990]. Les démarches qu'il est nécessaire d'entreprendre sont issues de décisions financières, socio-économiques et politiques. L'application de la politique de gestion définie est confiée à des sociétés publiques ou privées qui se doivent d'atteindre les objectifs généraux d'utilisation fixés, *i.e.* la mise en valeur et la protection quantitative et qualitative des ressources en eau.

1.4.2 Gestion des volumes

La gestion des volumes consiste à gérer annuellement voire inter-annuellement, la ressource en eau en accord avec la politique de l'eau définie. La satisfaction des usages doit être réalisée quelque soit la période de l'année, malgré les aléas climatiques et les fluctuations de la demande. L'incertitude liée à la demande est d'autant plus importante que les réseaux hydrographiques sont des systèmes étendus. Il convient donc de conserver suffisamment d'eau dans les zones de stockage pour répondre aux besoins futurs et faire face aux aléas, sans toutefois rationner les demandes. Les gestionnaires ont alors recours à des techniques de gestion prévisionnelle pour anticiper les demandes et les apports. Le type de demande et d'apport ainsi que les quantités d'eau correspondantes sont associés à chaque bassin versant, selon les saisons. Dans le sud ouest de la France, l'année est divisée en trois périodes. La période de remplissage se situe à la fin de l'hiver. Les retenues sont essentiellement remplies avec l'eau provenant de la fonte des neiges. La période d'irrigation correspond à l'été, et finalement la période de soutien d'étiage située en automne et au début de l'hiver, est celle durant laquelle les gestionnaires doivent essentiellement répondre aux besoins en eau potable et en salubrité. Un découpage plus fin de l'année en périodes spécifiques permet de tenir compte du caractère cyclique des demandes [Sawadogo, 1992].

La prévision de la demande d'une année sur l'autre peut être obtenue à partir d'études statistiques sur les historiques de données hydrauliques [Lamacq, 1997]. Des bases de données sont constituées et utilisées pour réaliser des traitements statistiques permettant de

caractériser l'année : année pluvieuse, année sèche, canicule, etc., et ainsi de prévoir la demande des usagers. Des gabarits de la demande en eau hebdomadaire, journalière ou horaire peuvent ainsi être déterminés à partir de fonctions d'optimisation [Sawadogo, 1992] ou de règles floues [Faye, 1999].

La réponse à la demande est ensuite réalisée hebdomadairement par la vidange de la ressource stockée dans les retenues. Les lâchers constants entre deux dates correspondent à une quantité d'eau en adéquation avec des courbes de vidange spécifiques à chaque retenue [Valiron, 1988]. Celles-ci sont déterminées à partir de l'historique des demandes et de l'estimation future de la demande. Des techniques pour l'élaboration des consignes des barrages en vue d'optimiser la gestion des systèmes de ressource en eau ont été proposées. Elles sont basées sur une démarche de modélisation des réservoirs associée à des méthodes de programmation dynamique stochastique [Parent, 1991], ou d'optimisation [Nandalal & Sakthivadivel, 2002].

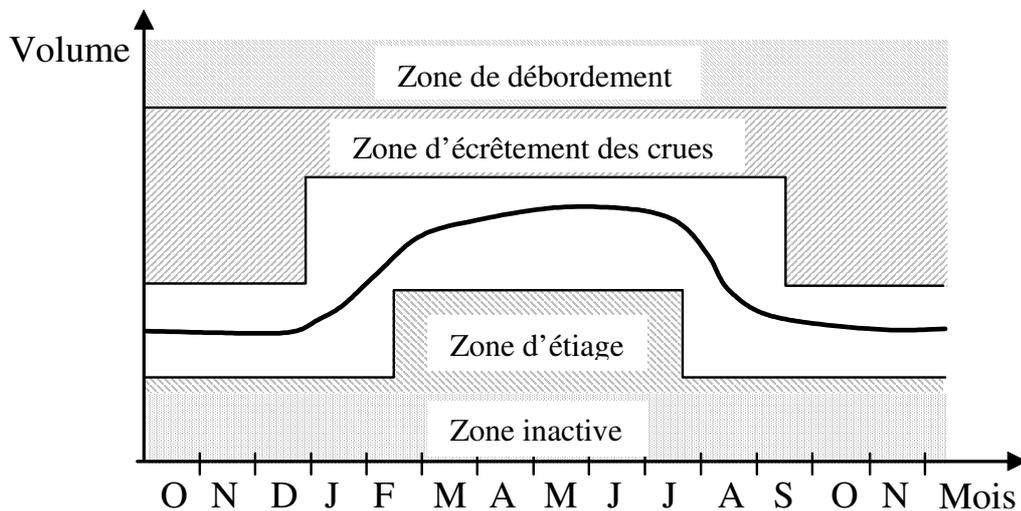


FIG. 1.6 – Courbe de remplissage-vidange d'une retenue d'après [Parent, 1991].

Le destockage d'une quantité d'eau permet, lorsque les ressources ne sont plus suffisantes pour répondre à une demande localisée, de satisfaire à court terme les usagers mais augmente le risque d'aggraver la situation. Il est alors nécessaire de répondre à la demande par des lâchers conjoints de plusieurs barrages de façon à conserver un réseau équilibré. Les techniques développées dans [Parent, 1991] permettent la détermination des consignes de plusieurs retenues interconnectées. Plus récemment, une méthode d'optimisation de la vidange de plusieurs réservoirs basée sur une technique de programmation dynamique a été proposée [Baliarsingh & Kumar, 2002]. Des méthodes d'équilibrage de la ressource d'un réseau hydrographique par délestage des retenues amont pour alimenter les retenues aval ont été mises au point dans [Hurand, 1994, Georges & Litrico, 2002]. Une

structure de gestion des volumes basée sur les règles de gestion de la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne a été proposée dans [Duviella, 2001]. Elle permet une harmonisation de la vidange de plusieurs barrages interconnectés.

Ces techniques d'élaboration de consignes de délestage ont l'avantage de pouvoir répondre de façon globale aux demandes. Elles sont cependant trop rigides car elles ne tiennent compte que difficilement des variations climatiques et de l'évolution de la demande d'une année sur l'autre. Une approche adaptative à caractère prédictif dans laquelle les courbes de vidange des barrages sont régulièrement recalées en fonction de l'état des ressources et de nouvelles estimations de la demande a été proposée dans [Faye, 1999]. La génération adaptative du nouveau plan de délestage est obtenue par résolution d'un problème d'optimisation.

Lorsque l'équilibrage de la ressource n'est plus possible, il est préférable d'imposer des restrictions sur les prélèvements de consommateurs au lieu de satisfaire la demande à court terme. Une restriction de prélèvements n'ayant pas le même impact en fonction de l'usage, il est nécessaire de définir des priorités. Le besoin le plus prioritaire est généralement la salubrité. Les priorités des autres besoins sont déterminées à partir des usages et de la quantité d'eau nécessaire à leur propre satisfaction en fonction des périodes de l'année. Cette attribution est réalisée selon les considérations spécifiques à chaque pays et à chaque région. Dans le sud de la France, l'eau potable et celle destinée à l'industrie sont prioritaires car elles constituent des besoins quantitativement peu importants par rapport aux usages pour l'irrigation [Georges & Litrico, 2002]. Par ailleurs, les gestionnaires ont la possibilité de recourir à des méthodes d'optimisation dont certaines sont basées sur la théorie des jeux [Raj & Kumar, 1999, Lund & Palmer, 1997], pour résoudre les conflits liés à l'importance des usages de l'eau. Pour les besoins de l'irrigation, S. Sawadogo [Sawadogo, 1992] a proposé une décomposition des besoins selon la rentabilité des cultures.

Selon la configuration des systèmes hydrographiques, les délestages de volumes d'eau suffisent à satisfaire de façon globale les besoins des consommateurs malgré la présence de perturbations p_e qui correspondent dans notre travail aux prélèvements et aux apports d'eau. Les prélèvements des consommateurs et les apports sont considérés comme étant un volume d'eau distribué sur une période, généralement hebdomadaire. Compte tenu de son horizon temporel, la gestion des volumes est caractérisée par une inertie importante. La réactivité de la gestion des volumes peut être améliorée grâce à une gestion des réseaux à plus court terme. Certains réseaux hydrographiques ont donc été équipés de systèmes de télétransmission [Valiron, 1988] offrant la possibilité de pouvoir commander les actionneurs à distance via un système de télécommunication. L'envoi de consignes et la réception de données sont régis par des protocoles de communication contraints par l'implantation des réseaux de télécommunication.

1.4.3 Gestion des débits

Une des garanties de satisfaction de la demande des usagers consiste à conserver les débits en sortie des réseaux hydrographiques proches de leur consigne en rejetant les perturbations. La détermination des consignes est réalisée, en général hebdomadairement au niveau du mode de gestion des volumes. Pour décrire les techniques de régulation utilisées pour la gestion des débits, il est nécessaire de distinguer deux catégories de systèmes hydrauliques utilisés pour le transport de l'eau : les canaux d'irrigation composés de sas successifs et les systèmes "barrage-rivière" ou canaux avec prises latérales. Les canaux d'irrigation composés de sas successifs (figure 1.7) sont des systèmes multivariables caractérisés par des biefs de petites et moyennes dimensions, en général inférieures à une dizaine de kilomètres. Compte tenu de la taille des biefs, la non linéarité et la variation des temps de transfert de ces systèmes hydrauliques sont réduites. La plupart des méthodes de modélisation et de régulation proposées dans la littérature pour la gestion des débits ont été développées et appliquées sur ce type de systèmes hydrauliques.

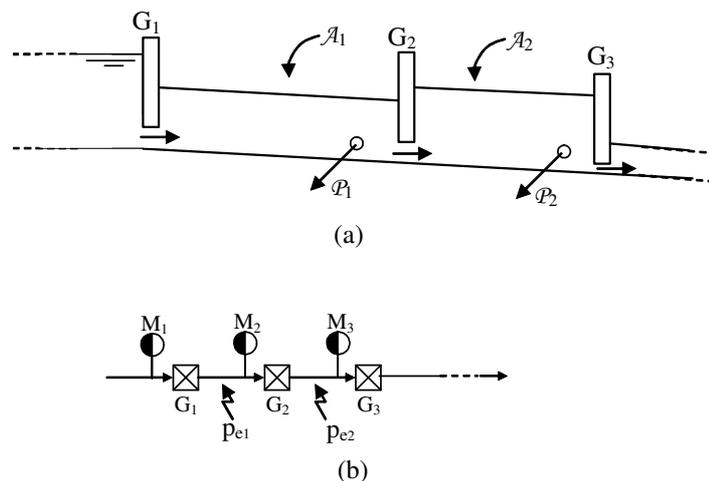


FIG. 1.7 – Canal composé de sas successifs (a) vue en coupe et (b) représentation graphique retenue.

Les systèmes "barrage-rivière" ou les canaux avec prises latérales (figure 1.8) sont, en général, multivariables à une entrée. Ils sont caractérisés par des biefs de grandes et très grandes dimensions pouvant atteindre plusieurs centaines de kilomètres. Ces systèmes sont soumis à une non linéarité et une variation des temps de transfert très importantes. De plus, compte tenu de leur taille, ils sont très exposés aux perturbations. Certaines méthodes de modélisation et de régulation développées pour les canaux d'irrigation composés de sas successifs ont été adaptées pour les systèmes "barrage-rivière" en tenant compte de contraintes supplémentaires liées à leur dynamique.

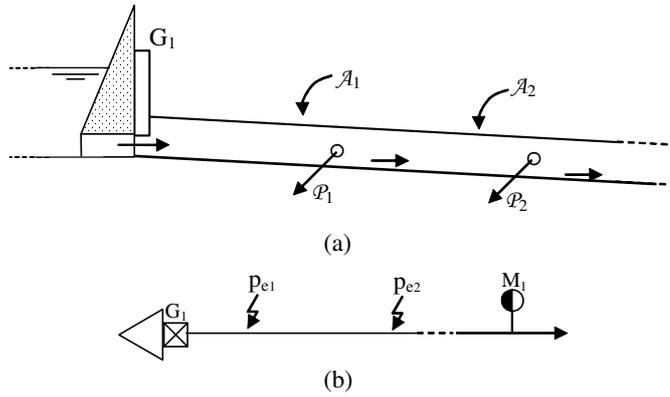


FIG. 1.8 – Système "barage-rivière" (a) vue en coupe et (b) représentation graphique retenue.

Un Etat de l'Art des approches de régulation a été réalisé par P. O. Malaterre et J.-P. Baume [Malaterre & Baume, 1998]. Les techniques de régulation pour les canaux d'irrigation composés de sas successifs ont été classées dans [Georges & Litrico, 2002, Malaterre *et al.*, 1998] selon trois critères relatifs au type de variables régulées (les niveaux d'eau, les débits ou les volumes), au type de régulation (boucle ouverte, boucle fermée ou une combinaison des deux) et au nombre de variables du système (monovariable, multivariable). En règle générale, les techniques de régulation sont conçues en considérant les systèmes hydrauliques comme des systèmes linéaires à retard constant (1.6). Cette approximation est faite lorsqu'un seul point de fonctionnement est considéré. Ainsi des techniques de régulation à partir de PID [I.Guenova *et al.*, 2004], de prédicteur de Smith [Deltour & Sanfilippo, 1998, Sawadogo, 1992], de placement de pôles [Kosuth, 1994], d'optimisation [Malaterre, 1994], de techniques d'inversion de modèle [Sawadogo, 1992], de régulation prédictive [Rutz *et al.*, 1998], de régulation adaptative [Sawadogo *et al.*, 2001], ont été proposées dans la littérature. Certaines de ces méthodes ont été utilisées pour la régulation de systèmes hydrauliques "barrage rivière" composés d'un seul bief (figure 1.9).

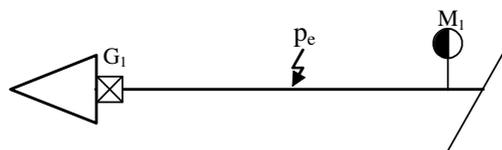


FIG. 1.9 – Système "barrage rivière" composé d'un seul bief.

Compte tenu de la taille de ces systèmes, les techniques de régulation ne permettent pas, en général, d'éviter les manques et les excès d'eau en bout de cours d'eau. De plus, elles entraînent des problèmes d'instabilité lorsque le point de fonctionnement du sys-

tème s'éloigne du point de fonctionnement utilisé pour la conception du régulateur. Pour pallier ces inconvénients, des approches de robustification par placement de pôles et par augmentation de la période d'échantillonnage [Kosuth, 1994], ainsi que par la prise en compte de modèles d'incertitudes [Litrico, 1999, Litrico & Georges, 1999b] ont été proposées. Elles conduisent à l'obtention de régulateurs stables sur l'ensemble du domaine de fonctionnement au détriment de leur réactivité. L'amélioration de la réactivité des régulateurs peut être obtenue par une augmentation du nombre de points de mesure. Leur implantation permet la décomposition des systèmes hydrauliques en biefs (figure 1.10).

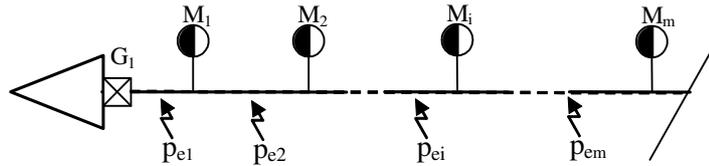


FIG. 1.10 – Système "barrage rivière" composé de plusieurs biefs.

Pour les réseaux hydrographiques équipés de plusieurs points de mesure, une technique de régulation prédictive a été proposée dans [Sawadogo, 1992]. Elle consiste à reconstituer les valeurs des débits d'entrée à partir des hydrogrammes de sortie grâce à des intervalles de prédiction. Cette technique de régulation conduit à de bons résultats lorsqu'il n'y a pas trop d'écart entre les prélèvements estimés et les prélèvements réels. Par ailleurs, des architectures de régulation ont été utilisées afin de prendre en compte les données issues des différents capteurs [Kosuth, 1994]. Elles sont implantées sous la forme de structures en cascade, et basées sur la méthode du modèle interne [Morari & Zafiriou, 1989]. L'obtention de régulateurs stables sur la totalité du domaine de fonctionnement des systèmes considérés nécessite la robustification des architectures de régulation. Une technique de synthèse de régulateurs robustes pour ce type d'architectures a été proposée dans [Litrico, 1999]. L'utilisation de ces architectures permet d'augmenter la réactivité de la régulation pour les perturbations en amont des systèmes hydrauliques, mais ne permet pas de l'améliorer de façon significative lorsque les perturbations se situent en aval.

Récemment, des techniques de régulation tenant compte de plusieurs modèles linéaires du type de la relation (1.14) ont été proposées. Ces techniques permettent de prendre en compte les non-linéarités caractéristiques des systèmes hydrauliques, par une sélection du régulateur correspondant au point de fonctionnement du système [Bolea *et al.*, 2004].

D'autres approches basées sur des techniques d'optimisation ont été proposées pour la gestion des débits [Faye, 1999, Elfawal-Mansour, 1999]. Le problème de commande optimale, basé sur des modèles entrée-sortie non linéaires, consiste à minimiser des critères tels que les coûts induits par les manœuvres des vannes ou les volumes d'eau perdus en aval. Les solutions du problème d'optimisation sont ensuite obtenues à l'aide de techniques

de programmation linéaire. Les problèmes de commande optimale peuvent également être adaptés de façon à pouvoir faire face à des situations particulières telles que l'occurrence d'une crue ou l'acheminement d'eau polluée [Faye, 1999]. Cependant, aucun système de supervision capable de détecter l'occurrence de phénomènes inattendus, de les diagnostiquer, et ainsi d'adapter les critères à optimiser n'a été conçu.

Les techniques de régulation proposées dans la littérature sont généralement conçues autour d'un point de fonctionnement, et lorsqu'elles sont robustifiées, elles sont moins sensibles aux variations de débit. Durant les périodes de manque, la satisfaction équitable des usages n'est pas garantie. Les usagers se situant le plus amont puisent dans les ressources disponibles au détriment de ceux situés en aval. Ils sont par conséquent plus avantagés et la répartition de la ressource devient inégale. Durant les périodes d'excès, les ressources contenues dans les réserves amont sont préservées, mais les quantités d'eau excédentaires se trouvant dans les cours d'eau ne sont pas valorisées. Ces difficultés proviennent essentiellement des temps de transfert importants caractéristiques des systèmes hydrographiques, ainsi que des incertitudes liées aux instants d'occurrence, aux durées et aux quantités demandées pour la satisfaction des usages.

Les techniques d'optimisation pour la gestion des débits des réseaux hydrographiques sont semblables aux méthodes utilisées pour la gestion des volumes avec un horizon de gestion beaucoup plus faible. Elles rationalisent l'usage de l'eau en évitant les gaspillages, en déterminant les consignes appropriées de lâchers de barrage. Leur rôle ne consiste pas à valoriser les excédents d'eau par leur acheminement vers les retenues aval, ni à répartir les manques équitablement. Ces techniques ne permettent que difficilement la prise en compte des événements inattendus et ne garantissent donc pas toujours l'application des règles de gestion en situation de crise. Afin de détecter et valoriser les excédents d'eau, il serait nécessaire de coupler les techniques d'optimisation à des techniques de supervision permettant de détecter les changements et de diagnostiquer l'état de la ressource, voire de proposer une stratégie de conduite réactive.

1.5 Problématique de la conduite réactive

Compte tenu des déséquilibres de la ressource en eau en certains endroits à certains moments, une recherche d'économie constante ainsi qu'une valorisation des excédents d'eau est devenue aujourd'hui indispensable. La conduite actuelle des réseaux hydrographiques même lorsqu'elle est organisée autour des trois niveaux de gestion présentés dans la section précédente, ne répond pas à cet impératif. Les méthodes et les solutions de gestion développées dans la littérature visent un objectif commun qui consiste à satisfaire les usages grâce à l'emploi des techniques de prévision, d'optimisation et de régulation. Elles sont conçues pour satisfaire des objectifs de gestion en rejetant les perturbations sans chercher à les valoriser. Notre étude se place résolument au niveau opérationnel avec pour

ambition la proposition d'une stratégie de conduite d'une plus grande réactivité.

Nous nous intéressons à la satisfaction des besoins de manière réactive en tenant compte des variations dues aux apports et aux prélèvements. Il convient de garantir une répartition équitable entre usagers de la ressource disponible et d'acheminer les excédents d'eau vers des lieux de stockage existants. La garantie d'une répartition équitable de la ressource et d'une valorisation des excédents d'eau requiert dans un premier temps une supervision en temps réel des systèmes hydrographiques. La mise en place d'une supervision dépend de la capacité à détecter et diagnostiquer les effets des événements perturbateurs. Celle-ci doit permettre au gestionnaire de connaître à chaque instant l'état de la ressource disponible. Dans un deuxième temps, une stratégie d'accommodation de la commande doit être proposée. Celle-ci doit être conçue à partir de l'expertise de façon à adopter les procédures et les actions de compensation nécessaires à l'atteinte des objectifs de gestion. Elle doit tenir compte des règles d'arbitrage, des caractéristiques des systèmes étendus, et des contraintes de fonctionnement. La répartition équitable de la ressource entre usagers est particulièrement intéressante pour les réseaux hydrographiques équipés de capteurs intermédiaires (figure 1.10).

La valorisation des excédents d'eau n'a de sens que sur des réseaux hydrographiques équipés de vannes ou prises alimentant des réserves situées en aval. La figure 1.11 représente le cas de m points de mesure en série avec la possibilité de répartir les excédents ou les manques d'eau sur les n prises. Les ressources excédentaires peuvent ainsi être acheminées vers des retenues aval pour y être stockées.

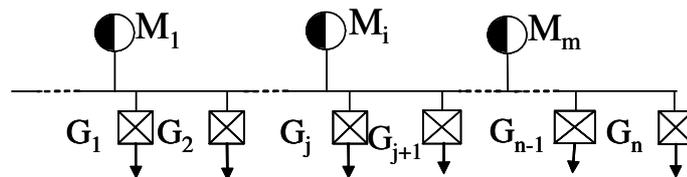


FIG. 1.11 – Cours d'eau équipé de capteurs et de vannes pouvant alimenter des réserves.

La valorisation de la ressource en eau est particulièrement intéressante sur les systèmes hydrauliques ayant une configuration minimum. L'analyse de tels réseaux peut être entreprise à partir de processus élémentaire (P_k) équipé d'un capteur et d'un ou plusieurs actionneurs automatisés (figure 1.12). Dans ce cas, la ressource mesurée au niveau du point de mesure (M_1) peut être répartie sur les actionneurs (G_j) régulés localement en ouverture-fermeture.

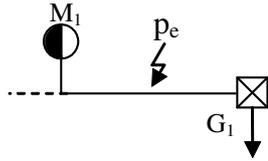


FIG. 1.12 – Processus élémentaire (P_1) comprenant un point de mesure M_1 , un actionneur G_1 et soumis à des perturbations p_e .

Les réseaux étudiés se composent de plusieurs processus élémentaires en série et en parallèle comme représentés sur la figure 1.13.

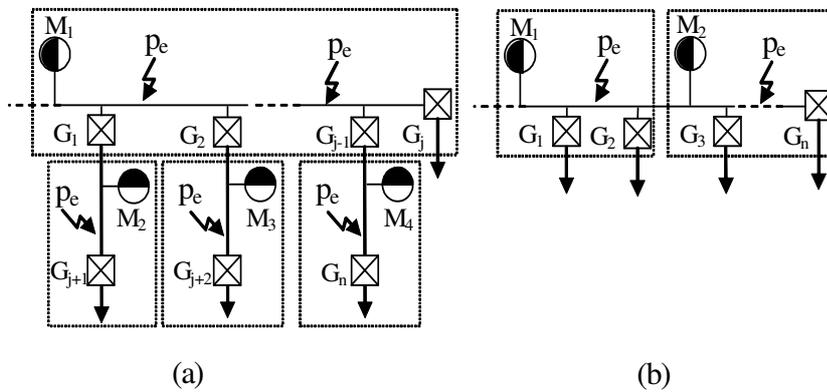


FIG. 1.13 – Réseaux de processus élémentaires (a) en parallèle et (b) en série.

Cette représentation permet de décrire toutes les configurations possibles de réseaux. Un exemple de réseaux avec confluent et défluent est représenté sur la figure 1.14.

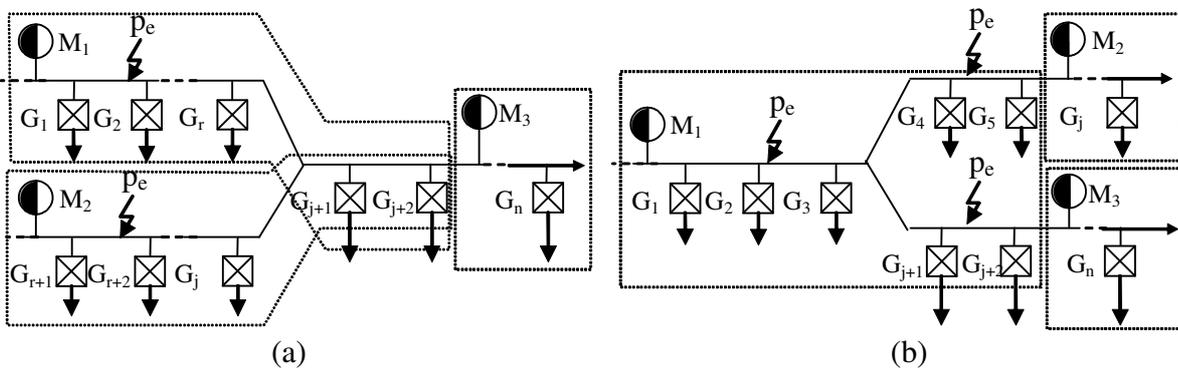


FIG. 1.14 – Réseaux décomposés en processus élémentaires (a) avec confluent et (b) avec défluent.

Les techniques de régulation des débits présentées précédemment conduisent au rejet de certaines perturbations sans toutefois en permettre une valorisation. C'est pourquoi, nous proposons une stratégie de conduite réactive basée sur les travaux liés aux méthodes de commande supervisée des Systèmes Dynamiques Hybrides (SDH).

1.6 Méthodes de commandes supervisées des Systèmes Dynamiques Hybrides

Habituellement, les systèmes dynamiques sont abordés par les approches issues des systèmes continus ou des systèmes à événements discrets (SED). Les systèmes continus sont caractérisés par une évolution continue de leurs variables ou états en fonction du temps. Ces variables peuvent prendre une infinité de valeurs à l'intérieur d'un domaine souvent borné. Les représentations de la dynamique des systèmes continus ont été présentées dans la première section. Les SED sont composés d'un nombre fini d'états représentant les modes de fonctionnement des systèmes. L'évolution d'un état discret à un autre est régi par l'occurrence d'un ou d'une suite d'événements. L'instant d'occurrence d'un événement étant inconnu, le temps continu n'est pas pris en référence pour les SED. La dynamique des SED est donc définie par des paires composées des états e et des événements Σ . Elle est modélisée sous la forme d'automates à états finis, de réseaux de Petri ou de grafctet.

Une troisième approche, celle des SDH permet de spécifier des comportements où l'état continu inter-agit avec l'état discret et réciproquement. Les SDH sont caractérisés par des dynamiques continues propres à chaque état discret composant le système, de telle sorte que l'occurrence d'un événement discret Σ provoque un changement d'état discret e mais également une modification de la dynamique continue du système, $\dot{x} = f(e, x)$. La figure 1.15 illustre une modélisation d'un SDH d'après [Tittus, 1995].

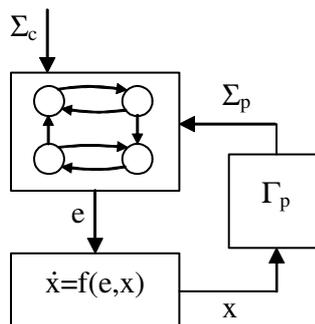


FIG. 1.15 – Modélisation d'un SDH d'après [Tittus, 1995].

Une proposition de classification des phénomènes physiques considérés comme hybrides en quatre catégories a été réalisée dans [Branicky, 1995]. Il s'agit de commutations

autonomes caractérisées par un changement de champ de vecteur $f(e, x)$, de sauts autonomes où la variable d'état x change de façon discontinue, de commutations et de sauts contrôlés où, respectivement, le champ de vecteur $f(e, x)$ et la variable d'état x changent de façon discontinue en réponse à une entrée de commande. La détermination de l'état discret du processus e est réalisée en tenant compte des événements de contrôle du processus Σ_c et des événements physiques du processus Σ_p issus du générateur d'événement Γ_p .

Différentes approches de modélisations des SDH permettant la prise en compte des dynamiques continues et discrètes du système sont décrites dans [Antsaklis *et al.* , 1998, Zaytoon, 2001, Chombart, 1997, Nerode & Kohn, 1993, Schaft & Schumacher, 2000]. L'approche événementielle consiste en une modélisation événementielle des dynamiques continues. L'intérêt de cette approche réside dans le fait que les SDH sont modélisés uniquement par des SED. Il est alors possible d'utiliser les méthodes d'analyse développées pour les SED. Cependant, des difficultés peuvent apparaître lors de la partition de l'espace d'état continu. A contrario, l'approche continue consiste en une modélisation continue des dynamiques discrètes. Les dynamiques discrètes sont approximées par des équations différentielles. Cette approche permet la modélisation d'une grande partie des phénomènes hybrides. Bien qu'elle présente l'avantage de pouvoir utiliser par la suite les méthodes d'analyse développées pour les systèmes continus, elle n'est pas, compte tenu de sa généralité, toujours bien adaptée et elle est parfois trop complexe pour la modélisation de certains SDH. L'approche mixte est composée d'un système continu à contrôler et d'un contrôleur discret.

Les SDH peuvent être modélisés par des automates hybrides définis par la structure $S(E, \mathbf{F}, O)$ avec E l'ensemble des états discrets, \mathbf{F} l'ensemble des champs de vecteurs attribuant à chaque état e un champ de vecteur F_e et O l'ensemble des conditions de transitions entre états. L'automate hybride est alors composé de différents états correspondant aux états discrets e du système et d'arcs représentant les transitions existantes entre places suivant les conditions o de O . A chaque état est associée un champ de vecteurs appartenant à \mathbf{F} . La figure 1.16 illustre le cas d'un automate hybride composé de deux états, avec x la variable continue, f_{e_1} et f_{e_2} des champs de vecteur, o_0 , o_1 et o_2 trois conditions de transition appartenant à O .

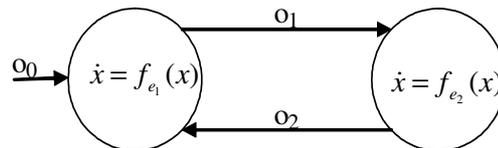


FIG. 1.16 – Automate hybride à deux états discrets.

S. Pettersson propose [Pettersson, 1999] de modéliser les SDH par un schéma double

blocs représenté sur la figure 1.17. La sortie continue du processus y est une fonction de la variable d'état continue x , de l'état du système e et des perturbations en entrée p_e . Les états discrets du système e dépendent des entrées continues u du système, des perturbations p_e , des événements de contrôle du processus Σ_c , et des événements non contrôlables Σ_v . les événements discrets de sortie du système sont représentés par η .

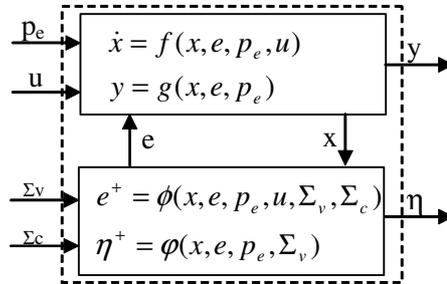


FIG. 1.17 – Modélisation d'un SDH d'après [Pettersson, 1999].

Des méthodes de commande supervisée des SDH ont été développées et présentées dans la littérature. Celles-ci, initiées par la théorie sur la supervision des SED par Ramadge et Wonham [Ramadge & Wonham, 1987], consistent à déterminer les lois de commande à appliquer à un processus pour atteindre des objectifs de fonctionnement. La commande est générée par un superviseur en fonction des événements issus du processus. La figure 1.18 schématise le principe des méthodes de commande supervisée des SDH. Le générateur d'événements a pour rôle la génération et l'envoi d'un événement $\Sigma_p[n]$ au superviseur quand il se produit, à l'instant n . L'événement est déterminé à partir de l'évolution des variables d'état continues $x(t)$. Le superviseur reçoit une information concernant l'occurrence d'un événement, et restitue, en conséquence, les commandes symboliques $\Sigma_c[n]$. Celles-ci sont ensuite appliquées au processus par l'intermédiaire de l'actionneur, $u_p(t)$.

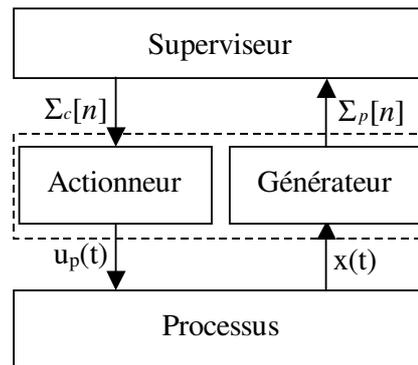


FIG. 1.18 – Supervision d'un SDH.

M. Tittus propose dans [Tittus, 1995] une architecture permettant la supervision des

SDH (figure 1.19). Les événements de contrôle du processus Σ_c sont déterminés en fonction des événements d'entrée Σ_s correspondant aux ordres envoyés au processus, et des variables d'état continu x du système (figure 1.19).

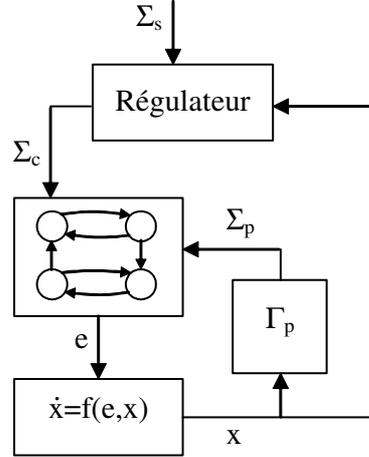


FIG. 1.19 – Régulation des SDH d'après [Tittus, 1995].

Le processus hybride en boucle ouverte PHBO et le superviseur associé SH sont représentés par des schémas double blocs couplés [Pettersson, 1999] selon la structure présentée figure 1.20. Le régulateur permet d'envoyer les commandes au processus en tenant compte des instructions de conduite et des mesures réalisées. Le processus PHBO, soumis à des perturbations continues p_e et des événements non contrôlables Σ_v , est commandé par les variables d'état continu u_p et des événements de contrôle Σ_c provenant du superviseur SH.

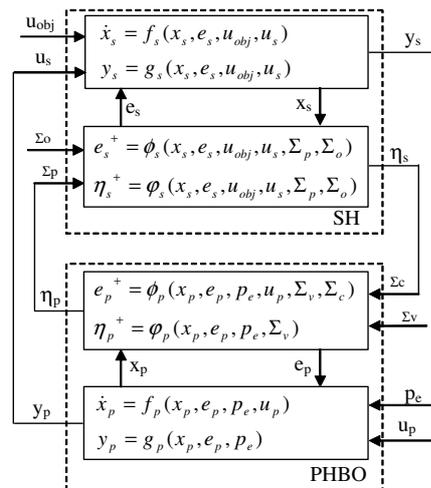


FIG. 1.20 – Régulation en boucle fermée d'un SDH d'après [Pettersson, 1999].

Le superviseur SH a pour rôle la détermination des commandes à appliquer au processus en fonction de son évolution décrite par les variables u_s et Σ_p , et selon les objectifs de gestion définis par les variables u_{obj} et Σ_o .

Le générateur d'événements est basé sur des techniques de surveillance qui consistent à élaborer et à mettre à disposition des informations structurées sur la situation du système observé. Les indicateurs de surveillance reposent sur des méthodes d'analyse temporelle du signal (calculs de moyenne, variance, etc.), d'analyse fréquentielle (analyse du spectre, etc.) et à base de modèle. Les méthodes de détection à base de modèle consistent à partir d'un modèle du processus à générer des résidus $r(t)$ (figure 1.21).

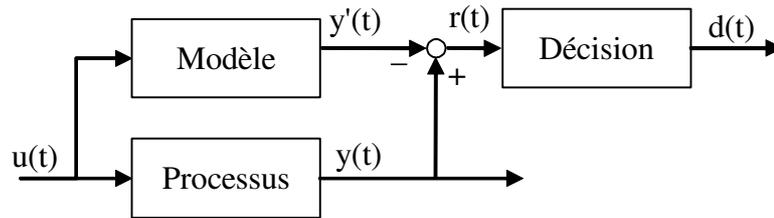


FIG. 1.21 – Structure conceptuelle de détection basée sur la génération de résidus.

Dans le cadre des SDH, les techniques utilisées consistent à détecter tout écart par rapport aux trajectoires optimales des variables d'état continu et des variables d'état discret. La détection d'une anomalie sur une variable d'état continu est réalisée lorsque celle-ci dépasse un certain seuil, et sur une variable discrète lorsque l'occurrence d'un événement inattendu se produit, ou lorsqu'un événement attendu ne se produit pas [Hennet, 1997].

Différentes structures de détection basée sur la génération de résidus ont été proposées dans la littérature. Nous avons choisi de les illustrer sur l'exemple de la figure 1.22. L'estimation en ligne du mode de fonctionnement des systèmes dynamiques hybride est réalisée grâce à l'emploi de réseaux de Petri [Peleties & Decarlo, 1993, Zhao *et al.*, 2001]. L'occurrence d'un dysfonctionnement est détecté en comparant les grandeurs mesurées à celles attendues en tenant compte des commandes envoyées au processus. Le diagnostic de l'état du processus est ensuite réalisé à l'aide d'un arbre logique. Cette approche, adaptée aux systèmes dynamiques hybrides, présente l'avantage de détecter les anomalies dues aux variables continues et à l'occurrence d'événements perturbateurs.

Une technique de supervision des SDH à l'aide de relations de redondance analytique a récemment été proposée [Cocquempot *et al.*, 2003, Cocquempot *et al.*, 2004]. La détection de défauts est réalisée grâce à la génération de résidus entre les variables d'entrée et de sortie mesurées et les relations de redondance analytique déterminées à partir des entrées et des sorties ainsi que de leurs dérivées, indépendamment de l'état du système. Le diagnostic des défaillances est réalisé à partir de résidus structurés spécifiques à chaque défaut.

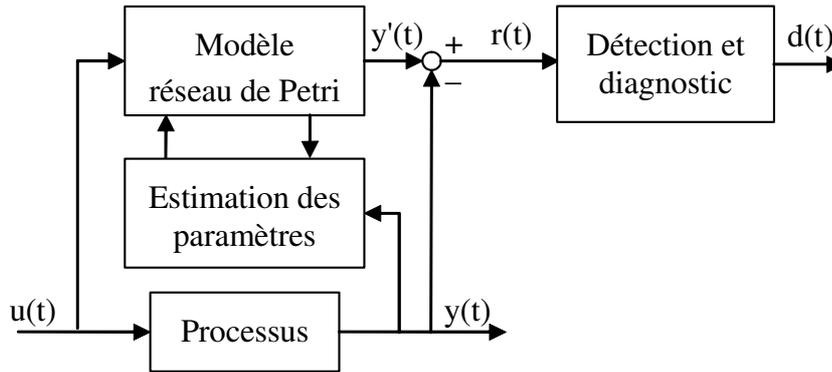


FIG. 1.22 – Méthode de diagnostic basée sur une modélisation par réseaux de Petri d’après [Zhao *et al.* , 2001].

Des techniques permettant l’estimation des états grâce à l’utilisation d’un multi-observateur ont été récemment proposées [Akhenak *et al.* , 2004, Hocine *et al.* , 2004]. Ces différentes approches requièrent une modélisation des systèmes dynamiques par un ensemble de modèles décrivant les modes de bon fonctionnement et les modes de défaillance. Les performances des méthodes de détection s’expriment à travers différents critères qui sont la sensibilité à l’amplitude du défaut, le retard de détection, la robustesse vis à vis de bruits et d’erreurs de modélisation. La fonction de détection doit minimiser les fausses alarmes en évitant les manques de détection.

Les techniques de supervision des SDH basées sur une modélisation du fonctionnement des SDH ont été utilisées pour la régulation des processus batch, et les lois de commande étudiées dans [Champagnat *et al.* , 1998, Engell *et al.* , 2001, Tittus, 1995]. Elles conduisent à de bons résultats lorsque tous les modes de fonctionnement nominal et de défaillance sont clairement définis, c’est à dire que les modes de fonctionnement dégradés sont très distincts du mode de fonctionnement nominal. Dans le cas contraire, le diagnostic de l’état d’un système à partir de symptômes est difficilement réalisable. Pour lever cette difficulté, M. W. Hofbaur et B. C. Williams ont proposé dans [Hofbaur & Williams, 2002b] une méthode de diagnostic des systèmes dynamiques hybrides à partir d’automates hybrides probabilisés (PHA). Chaque constituant du système hybride est modélisé sous la forme d’un automate hybride probabilisé. Les transitions entre états de ces automates ne correspondent pas à des conditions déterministes mais à des conditions avec des probabilités de franchissement. Cette modélisation par automates est couplée à un estimateur hybride dont le rôle est de diagnostiquer l’état du système dynamique hybride. L’estimation hybride des variables d’état continu est réalisée grâce à l’utilisation d’un filtre de Kalman, et celle des états du système grâce à l’utilisation d’un observateur hybride markovien. Cette approche a été étendue aux cas où les modes de fonctionnement des systèmes dynamiques ne sont pas préalablement définis [Hofbaur & Williams, 2002a].

Plus récemment, une approche de supervision par automates hybrides probabilisés concourants a été proposée [Funiak *et al.* , 2004, Hofbaur & Williams, 2004]. Un automate hybride probabilisé concourant (cPHA) est composé d'un nombre fini de PHA. Cette méthode permet la prise en compte simultanée de différents constituants des systèmes dynamiques ainsi que de leurs interactions. Les variables d'entrée-sortie de chaque PHA composant les cPHA sont ensuite partagées de façon à décrire le comportement des cPHA.

L'adaptation des méthodes de commande supervisée à la problématique de conduite réactive des systèmes hydrographiques n'a pas été envisagée dans le cadre de notre travail compte tenu des difficultés qui résident d'une part dans la modélisation hybride des systèmes hydrauliques et d'autre part dans la formalisation hybride des actions de compensation nécessaires à la valorisation de la ressource. Nous souhaitons développer une stratégie de conduite réactive qui s'appuie sur une représentation hybride de la commande réactive, sans toutefois être contraint de proposer une modélisation hybride de la dynamique des réseaux hydrographiques. Il est alors nécessaire de s'intéresser aux techniques de supervision des systèmes dynamiques et plus principalement à celles de diagnostic.

1.7 Techniques de diagnostic

Nous avons vu que le principe de supervision des systèmes dynamiques s'articule autour de la détection d'erreurs, et du diagnostic des défauts. Lorsqu'une erreur est détectée, il est nécessaire de diagnostiquer le défaut de façon à pouvoir employer les actions de compensation préconisées. Le diagnostic automatisé constitue, depuis une vingtaine d'années, un thème de recherche important en Intelligence Artificielle. Le diagnostic est défini comme une opération de classification permettant de caractériser les défauts par type et par degré de sévérité. Il fait appel à des techniques de reconnaissance de forme, à des systèmes experts basés sur des méthodes de logique floue, de réseaux de neurones, d'arbres logiques, de graphes causaux, de réseaux de Petri, et d'automates hybrides. Le principe de conception des systèmes de diagnostic basés sur les modèles est présenté dans [Hamscher *et al.* , 1992]. J. Brunet *et al.* décrit dans [Brunet *et al.* , 1990] le principe de diagnostic de systèmes dynamiques réalisé à partir de systèmes experts. Les systèmes experts sont composés d'une base de connaissance regroupant toutes les règles permettant de diagnostiquer l'état d'un processus à partir de la génération de résidus. Ces derniers sont calculés à partir des données mesurées et des données attendues. Chaque résidu doit être conçu pour être sensible à un sous-ensemble de fautes tout en restant insensible aux fautes restantes. Ainsi, une information sur l'état du système peut être obtenue en fonction de la valeur des résidus. Plus récemment, une technique de génération automatique d'une base de connaissance composant les systèmes experts a été proposée [Barkai, 1999]. Elle utilise la technique d'analyse FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) afin de déterminer les

causes et les effets d'erreurs sur le fonctionnement de processus. Une base de connaissance regroupant les symptômes significatifs, leurs causes et leurs conséquences est automatiquement générée. Le diagnostic de l'état d'un processus est réalisé par le parcours d'un arbre logique de diagnostic. Une technique de diagnostic des systèmes dynamiques à partir de la modélisation des erreurs possibles sous forme de graphes causaux est proposée dans [Mosterman & Biswas, 1999]. Des algorithmes basés sur des règles permettent ensuite de diagnostiquer les fautes et ainsi de déterminer l'état du système dynamique. Le diagnostic par modélisations floue et neuronale a été proposé dans [Uppal *et al.* , 2002]. Les modèles flous et neuronaux utilisés dans cette approche combinent des connaissances numériques et symboliques du processus. Cette méthode présente ainsi l'avantage d'être moins sensible aux erreurs de modélisation que les techniques de diagnostic à base de modèles, et d'être moins sensible aux changements de paramètres et aux bruits de mesure. Une technique similaire a été utilisée pour le diagnostic de systèmes pneumatiques d'une ligne de production dans [Xuanyin *et al.* , 2001]. Des travaux sur la caractérisation des signaux pour la supervision ont été proposés dans [Colomer *et al.* , 1997]. Ils consistent à décrire qualitativement les signaux par leurs valeurs, leurs pentes et leurs allures en considérant les dérivées d'ordre 1 et 2 [Trave-Massuyès *et al.* , 1997]. La tendance des signaux est décrite par des représentations triangulaires ou trapézoïdales entre deux instants t_1 et t_2 , instants déterminés par le changement de signe de la dérivée seconde (figure 1.23).

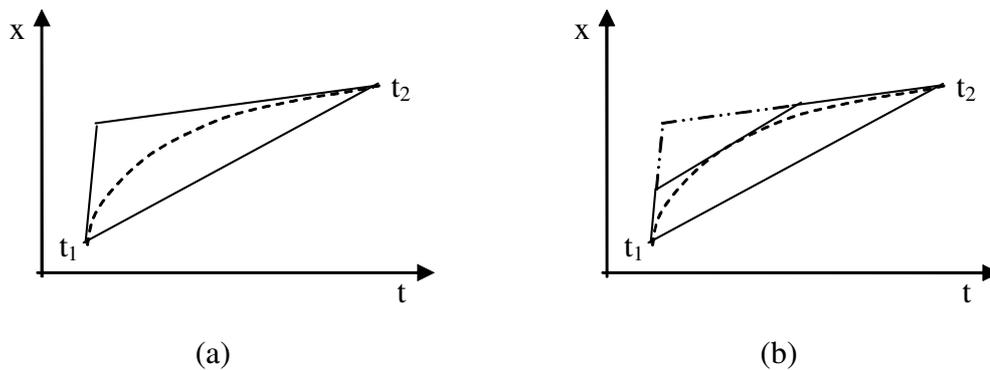


FIG. 1.23 – Description de la tendance d'un signal par (a) une représentation triangulaire et (b) une représentation trapézoïdale d'après [Colomer *et al.* , 1997].

Ces représentations permettent ensuite de caractériser qualitativement les signaux (croissance, oscillations, etc.). La caractérisation quantitative des signaux consiste, dans un premier temps, à approximer la courbure du signal entre deux instants à l'aide d'une fonction polynomiale, puis à déterminer l'équation de la droite entre ces deux instants, et enfin à calculer l'aire entre la courbe et la droite obtenues. Ces informations permettent de déduire l'accroissement des grandeurs et l'amplitude des oscillations.

Toutes les techniques de diagnostic présentées sont dédiées et spécifiques aux processus

supervisés. De plus, l'emploi des techniques de classification requiert en général un filtrage préalable des signaux de façon à éliminer le bruit. Une technique d'estimation du signe de la dérivée d'un signal bruité est proposée dans [Barford *et al.*, 1999].

Nous proposons au chapitre suivant une stratégie de conduite réactive basée sur les techniques de diagnostic présentées dans cette section. Cette stratégie s'appuie sur une représentation hybride de la commande réactive.

1.8 Conclusion

Nous avons tout d'abord défini une classe de systèmes dynamiques étendus à retards variables, pouvant être modélisés par des techniques basées sur les inclusions différentielles linéaires. Puis, nous nous sommes intéressés aux réseaux hydrographiques qui sont généralement modélisés à partir des équations aux dérivées partielles de Saint Venant. Les réseaux hydrographiques véhiculent des quantités d'eau pour satisfaire les usages liés à l'activité humaine. Une politique de l'eau est généralement définie afin de répondre à la demande tout en conservant suffisamment de ressources en stock pour prévenir les demandes futures. Les politiques de l'eau s'articulent autour de trois niveaux de gestion principaux qui sont la gestion structurelle, la gestion des volumes et la gestion de débits. Les différentes techniques utilisées pour ces différents niveaux ont été détaillées dans ce chapitre. Un réseau est dit équilibré lorsque la quantité totale de ressources stockées permet de répondre à la demande globale. Les techniques de gestion prévisionnelle des stocks et des demandes peuvent alors être utilisées pour la gestion des volumes. Finalement, la gestion des débits est réalisée à partir de techniques de régulation ou de méthodes d'optimisation. Les premières consistent à conserver les débits des cours d'eau proches des objectifs de gestion en rejetant les perturbations, les secondes à déterminer les consignes de lâcher d'eau à court terme. Nous avons discuté de leurs limites lorsqu'il s'agit de valoriser les ressources en eau.

Dans le chapitre suivant, nous proposons d'adopter une stratégie de conduite réactive. Cette dernière est conçue dans le but de valoriser la ressource des systèmes dynamiques étendus par une répartition équitable des manques et un ré-acheminement des excédents. Elle est basée sur des techniques de supervision des systèmes dynamiques hybrides et des techniques de diagnostic par caractérisation des signaux. La stratégie de conduite réactive est présentée, puis détaillée dans le cadre d'application des réseaux hydrographiques équipés de prises alimentant des cours d'eau annexes.

Chapitre 2

Supervision concourante et accommodation hybride de la commande

2.1 Introduction

Nous considérons dans ce chapitre les réseaux étendus dont les capacités de stockage des ressources sont suffisantes pour répondre à la demande sur un horizon important, de l'ordre d'une année. Les techniques et les règles utilisées pour la gestion à moyen terme des ressources ainsi que les contraintes liées au fonctionnement des réseaux étendus, sont regroupées dans un module de Génération des Contraintes et Objectifs de Gestion (GCOG) (figure 2.1). Le lien existant entre le centre de gestion, les points de mesure (M_i) et les actionneurs (G_j) est souvent réalisé par un réseau de communication téléphonique commuté représenté par la double ligne.

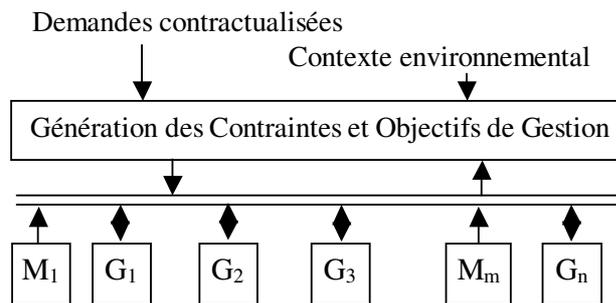


FIG. 2.1 – Modèle conceptuel de la gestion à moyen terme des systèmes étendus.

Les valeurs objectifs sont générées sur un horizon correspondant en général à une semaine. Elles représentent les consignes à envoyer en tout point du réseau selon un protocole. Elles respectent les priorités issues des règles d'arbitrage, tout en étant conformes

à la politique de gestion établie. Les priorités sont déterminées en fonction de la structure des réseaux étendus à partir des informations concernant les demandes exprimées et les aléas climatiques. Les composants pris en compte dans la représentation des réseaux étendus sont les actionneurs G_j et les capteurs M_i .

Nous proposons dans ce chapitre une stratégie de conduite réactive pour la valorisation des ressources des systèmes étendus à retards variables. Elle a pour but l'application de manière réactive des procédures et des actions de compensation nécessaires à la satisfaction des objectifs de gestion lors de l'occurrence de phénomènes inattendus. La stratégie de conduite réactive basée sur la supervision concourante et l'accommodation hybride de la commande est détaillée dans la première partie de ce chapitre.

La supervision de la ressource réalisée au niveau de chaque capteur suppose un conditionnement des mesures, une détection d'un écart entre les grandeurs mesurées et celles attendues, et finalement, un diagnostic de l'état de la ressource. Les techniques utilisées pour la supervision sont détaillées dans la deuxième partie.

La connaissance de l'état de la ressource en différents endroits des réseaux étendus permet de déterminer les actions de compensation et ainsi de répondre le plus efficacement possible aux objectifs de gestion. Les actions de compensation s'articulent autour de deux concepts qui sont la répartition et l'affectation de la ressource. La répartition consiste à déterminer les commandes à appliquer aux actionneurs de façon à valoriser les ressources. L'affectation permet la prise en compte des caractéristiques des systèmes dynamiques étendus. Les fonctions composant l'accommodation hybride des commandes sont présentées dans la troisième partie.

Dans la quatrième partie, les problèmes de transmission des commandes aux actionneurs télégerés sont abordés. La transmission est réalisée en général suivant des protocoles de communication. Des conflits de consignation qui peuvent alors apparaître doivent être résolus par l'emploi de règles d'arbitrage.

Le concept de stratégie de conduite réactive proposé est utilisé pour la valorisation des ressources en eau des réseaux hydrographiques. L'architecture de conduite adaptée à la problématique de gestion des ressources en eau est détaillée dans la cinquième partie.

Dans la sixième partie, les fonctions de détection et de diagnostic de l'état de la ressource sont présentées. Elles sont réalisées grâce à l'emploi d'automates à états. Nous proposons différentes méthodes de conditionnement des signaux, de détection des erreurs et de diagnostic de l'état de la ressource en eau. Celles-ci sont par la suite comparées.

Les fonctions utilisées pour l'accommodation hybride de la commande sont basées sur des règles de répartition de la ressource. Celles-ci permettent de tenir compte des règles de priorité définies par les gestionnaire de manière à acheminer les excédents d'eau vers des réserves situées en aval, et de répondre équitablement aux besoins des consommateurs. L'affectation de la ressource consiste à tenir compte de la dynamique lente caractéristique des systèmes hydrauliques par la détermination des temps de transfert. Les règles de

répartition et d'affectation de la ressource sont présentées dans la septième partie pour le cas d'un cours d'eau composé d'un seul bras.

Dans la huitième partie, les règles de répartition sont adaptées aux cas de confluence et de défluence. Grâce à la proposition de règles adaptées à chaque composant élémentaire des réseaux hydrographiques, la stratégie de conduite peut alors être utilisée dans un cadre générique.

Finalement, dans la neuvième partie, une formalisation hybride de la stratégie de conduite est proposée. Elle est basée sur les travaux réalisés sur les automates hybrides probabilisés concourants présentés au chapitre 1.

2.2 Modèle conceptuel de stratégie de conduite réactive

Nous proposons de répondre aux problématiques de gestion des réseaux étendus identifiées au premier chapitre par la définition d'une stratégie de conduite réactive permettant l'application des règles de gestion en tenant compte de l'état courant du système.

La stratégie de conduite réactive proposée est conceptualisée sous la forme du modèle présenté sur la figure 2.2. Les règles de l'expert sont capitalisées au niveau du module GCOG. Les objectifs de gestion sont ensuite utilisés afin de déterminer les consignes à appliquer aux actionneurs (G_j) équipant les systèmes étendus. Les actionneurs des processus sont régulés localement en ouverture-fermeture.

L'implantation d'une conduite réactive suppose, dans un premier temps, la connaissance de l'état de la ressource en différents points des réseaux de façon à savoir si les objectifs de gestion sont atteints ou non. L'implantation d'un module de Supervision Concourante (SC) permet à partir des mesures issues des capteurs (M_i) implantés sur les réseaux, de générer une information structurée sur la situation des systèmes, c'est à dire sur l'état de la ressource, et ainsi de connaître l'état de satisfaction des objectifs définis.

Dans un deuxième temps, lorsque les objectifs de gestion ne sont pas atteints, il est nécessaire de proposer des méthodes permettant d'accommoder les consignes envoyées aux actionneurs des processus. Ces méthodes sont définies dans le but de répondre le plus efficacement possible aux objectifs de gestion. Le module d'Accommodation Hybride de la Commande (AHC) regroupe toutes les méthodes d'accommodation des consignes. Les modules SC et AHC implantés entre le module GCOG et le niveau bas représentant le système dynamique étendu sont utilisés pour répondre aux objectifs de gestion en tenant compte de l'état courant du système. En règle générale, les réseaux étendus sont équipés de plusieurs capteurs (M_i).

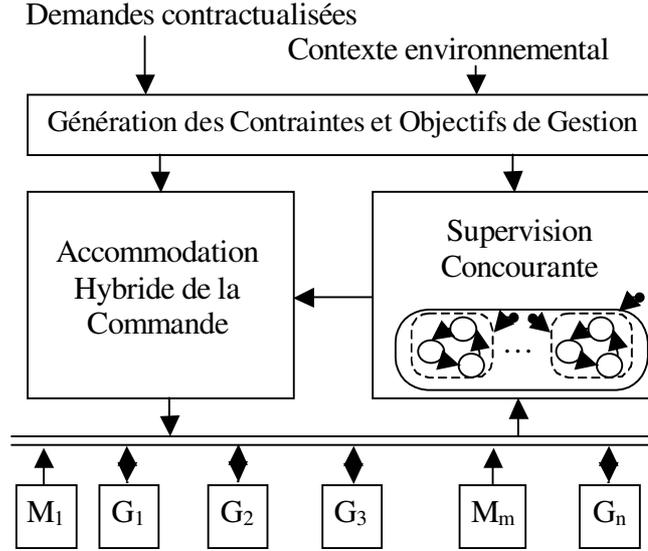


FIG. 2.2 – Modèle conceptuel de la stratégie de supervision concurrente et d’accommodation hybride de la commande.

La prise en compte simultanée des informations issues de tous les capteurs lors du diagnostic de l’état de la ressource devient très vite complexe. En effet, le nombre d’états n_d considéré pour définir l’état d’un système dynamique étendu est calculé à partir du nombre d’états discrets n_e pris en compte pour chaque capteur, et du nombre de capteurs utilisés m , selon la relation (2.1).

$$n_d = (n_e)^m. \quad (2.1)$$

Supposons que l’état de la ressource au niveau du capteur M_i soit défini par deux états E_i et \bar{E}_i ($n_e = 2$), où E_i correspond à l’état où la mesure de la ressource correspond à celle attendue. La supervision de l’état de la ressource au niveau de deux capteurs M_1 et M_2 ($m = 2$) conduit à la prise en compte de 4 états, et celle de trois capteurs M_1 , M_2 et M_3 ($m = 3$) à la prise en compte de 8 états.

Nous avons proposé de réaliser la supervision de l’état de la ressource de manière concurrente au niveau de chaque capteur M_i (figure 2.3). Cette solution est possible lorsque les capteurs sont indépendants entre eux. Dans ce cas, la supervision est réalisée en même temps pour chaque capteur [Duviella *et al.*, 2004].

Le nombre d’états n_d est calculé à partir du nombre d’états discrets n_e et du nombre de capteurs utilisés m , selon la relation (2.2).

$$n_d = m.n_e. \quad (2.2)$$

A partir de la détermination de l’état de la ressource, l’accommodation hybride de la commande est réalisée sur les actionneurs du système en aval de chaque capteur M_i de façon indépendante. Le caractère hybride de l’accommodation de la commande vient de la prise en compte de l’état du système dans la génération de nouvelles commandes.

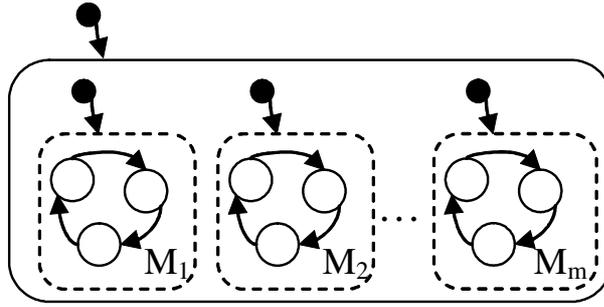


FIG. 2.3 – Supervision concourante de l'état des ressources.

2.3 Supervision concourante

Le principe de supervision décrit dans [Brunet *et al.*, 1990], repose sur des méthodes de conditionnement des données, de détection et de diagnostic. Nous avons choisi d'implanter le module de supervision selon les trois blocs représentés sur la figure 2.4. Il reçoit en entrée les données mesurées x_{M_i} et les objectifs de gestion u_{obj} fixés par les gestionnaires. Le principe de chaque bloc est détaillé par la suite pour un seul capteur M_i .

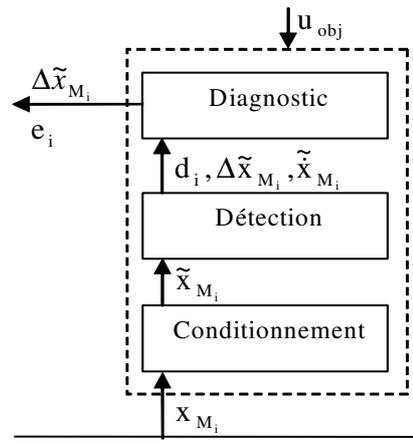


FIG. 2.4 – Composantes du module de supervision concourante.

Le bloc de conditionnement permet l'acquisition des données qui constitue une fonction primordiale de la supervision concourante. Il conduit à la sélection, le conditionnement et le pré-traitement des grandeurs significatives du fonctionnement du processus à la période de détection T_d . Cette dernière est généralement fixée lors de la mise en place des régulateurs avec une granularité suffisamment fine pour pouvoir suivre la dynamique des systèmes. Le bloc de conditionnement reçoit en entrée les données brutes x_{M_i} mesurées par les capteurs à chaque instant kT_d . Des méthodes d'estimation et de filtrage sont ensuite

utilisées afin de disposer de données fiables. Le bloc de conditionnement fournit en sortie les données conditionnées \tilde{x}_{M_i} .

La détection des perturbations repose sur les techniques de surveillance des systèmes dynamiques présentées au chapitre précédent. Dans notre approche, nous souhaitons détecter l'occurrence des écarts de la ressource $\Delta\tilde{x}_{M_i}$ par rapport aux objectifs de gestion u_{obj} . Les objectifs de gestion issus du module de GCOG sont fixés de façon globale pour l'ensemble du réseau hydrographique considéré et plus localement au niveau de chaque capteurs M_i . La détection des écarts de débits $\Delta\tilde{x}_{M_i}$ est réalisée grâce à des techniques d'analyse temporelle des signaux ou de génération de résidus à partir des données conditionnées \tilde{x}_{M_i} et des objectifs de gestion u_{obj} . La détection des écarts est réalisée grâce à l'emploi d'automates à états concourants. Le bloc de détection fournit l'écart $\Delta\tilde{x}_{M_i}$, la grandeur $\tilde{\dot{x}}_{M_i}$ correspondant à la dérivée de \tilde{x}_{M_i} , et une variable de décision d_i renseignant sur l'occurrence d'un écart sur la ressource.

Au chapitre précédent, nous avons vu également, que les techniques de supervision développées dans la littérature sont généralement basées sur la génération de résidus entre les grandeurs mesurées et les grandeurs attendues issues de modèles. Dans notre cas, la génération de résidus est effectuée en considérant les données conditionnées \tilde{x}_{M_i} et les grandeurs attendues u_{obj} déterminées par une méthode implantée dans le module GCOG. Un dysfonctionnement est dans un premier temps détecté lorsque le résidu dépasse un certain seuil, puis diagnostiqué à l'aide de modèles de fautes. Ces méthodes supposent donc une connaissance préalable des dysfonctionnements possibles des systèmes dynamiques. Nous considérons que le fonctionnement d'un système dynamique peut être décrit selon différents modes, un mode normal de fonctionnement et plusieurs modes de fonctionnement dégradés. Nous ne nous préoccupons pas des défaillances sur les équipements des systèmes. Les modes de fonctionnement dégradés sont pris en compte selon la nature des systèmes et les avantages que leur considération pourraient apporter dans la valorisation des ressources.

Nous supposons également que les systèmes dynamiques considérés sont équipés de réseaux télégérés de capteurs (M_i) et d'actionneurs (G_j) automatisés et régulés localement. Les réseaux télégérés permettent en effet la récupération des mesures et l'envoi des consignes à distance.

La description du fonctionnement d'un processus nécessite donc la prise en compte de différents modes de fonctionnement correspondant aux états de la ressource e_i au niveau de chaque capteur M_i . Les informations relatives à l'état des processus sont extraites des mesures issues des réseaux de capteurs. Nous avons choisi de réaliser le diagnostic de l'état des ressources à l'aide d'automates à états concourants. De manière générale, le bloc de diagnostic permet de générer l'état de la ressource e_i , ainsi que l'écart entre les valeurs attendues et les valeurs mesurées $\Delta\tilde{x}_{M_i}$.

2.4 Accommodation hybride de la commande

L'état diagnostiqué e_i provenant du module SC nous renseigne sur la satisfaction des objectifs de gestion. La détermination de nouvelles commandes, le cas échéant, est réalisée au niveau du module AHC, à partir de règles de gestion et d'arbitrage Σ_o sélectionnées en fonction de l'état de la ressource e_i . L'accommodation des commandes envoyées aux actionneurs du système nécessite également la connaissance des écarts $\Delta\tilde{x}_{M_i}$ et des consignes de gestion u_{obj} , *i.e.* les consignes appliquées aux actionneurs. La variable $\Delta\tilde{x}_{M_i}$ est issue du module SC. Les consignes u_{obj} , les règles de gestion Σ_o ainsi que les caractéristiques \mathcal{K} des systèmes dynamiques étendus proviennent du module de GCOG.

Le module AHC est constitué de deux blocs (figure 2.5) représentant les fonctions de répartition de la ressource et d'affectation.

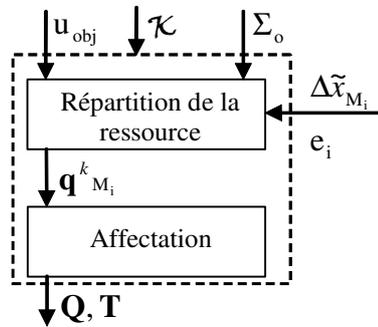


FIG. 2.5 – Blocs composant le module d'accommodation hybride de la commande.

Lorsque le diagnostic indique un état e_i différent de l'état de satisfaction des objectifs e_{0i} , une accommodation de la commande est réalisée en tenant compte des règles Σ_o . Le bloc de répartition de la ressource fournit le vecteur de répartition $\mathbf{q}_{M_i}^k$ de toutes les nouvelles consignes à appliquer aux actionneurs.

Le bloc Affectation permet de tenir compte des caractéristiques \mathcal{K} des systèmes étendus, telles que les temps de transfert ou les non linéarités. Le bloc Affectation produit le vecteur de consignes d'affectation \mathbf{Q} regroupant les vecteurs de répartition $\mathbf{q}_{M_i}^k$ et un vecteur d'instant d'affectation \mathbf{T} prenant en compte toutes les spécificités du système, telles que les temps de transfert. Le vecteur de consignes d'affectation \mathbf{Q} et le vecteur d'instant d'affectation \mathbf{T} étant déterminés, les nouvelles consignes peuvent être transmises aux actionneurs du système.

2.5 Transmission de commandes et protocole de communication

La transmission des consignes aux actionneurs du système est réalisée au niveau du bloc de transmission à partir du vecteur de consignes d'affectation \mathbf{Q} et du vecteur d'instant d'affectation \mathbf{T} issus de l'accommodation hybride de la commande (figure 2.6).

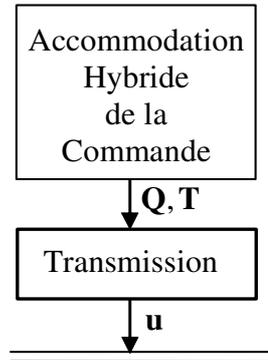


FIG. 2.6 – Bloc de transmission des consignes aux actionneurs du système.

De par la structure des systèmes dynamiques étendus, la répartition de la ressource réalisée à partir de différents capteurs, peut conduire à la reconsignation d'actionneurs identiques, aux mêmes instants. Les redondances de consignation apparaissent lors de la prise en compte du vecteur de consignes d'affectation \mathbf{Q} et du vecteur des instants d'affectation \mathbf{T} . Lorsqu'il y a redondance de consignation, il est nécessaire de sélectionner une consigne par actionneur et par instant d'envoi de commande. Différentes méthodes de sélection des consignes, telles que les règles d'arbitrage ou des règles empiriques, peuvent être employées [Jain *et al.*, 2002, Tatikonda & Mitter, 2004]. En règle générale, les consignes les plus récemment déterminées sont privilégiées, car elles sont issues des décisions tenant compte de l'état actualisé de la ressource. Après résolution des conflits d'affectation, un vecteur d'accommodation de la commande \mathbf{u} est obtenu à partir des vecteurs \mathbf{Q} et \mathbf{T} . La résolution des conflits d'affectation conduit à l'attribution d'une seule consigne par actionneur et par instant d'envoi de commande.

L'envoi des commandes aux actionneurs doit tenir compte des protocoles du réseau de télécommunication utilisé. Lorsque les protocoles de communication ne permettent pas la consignation de tous les actionneurs en même temps, il est alors nécessaire de résoudre des problématiques de commande sous contraintes de communication. Les techniques proposées dans la littérature [Hristu, 1999, Hristu-Varsakelis & Brockett, 2002, Jain *et al.*, 2002, Rehbinder & Sanfridson, 2003, Tatikonda & Mitter, 2004] consistent à recourir à des règles de priorités afin de déterminer les séquences optimales de communication. Nous n'avons pas considéré dans notre approche de contrainte au niveau du protocole

de communication. Les consignes sont supposées être envoyées de façon simultanée sur tous les actionneurs du système à la période de commande T_c multiple de la période de détection T_d . Ainsi, la supervision est réalisée à l'intérieur d'un horizon de commande.

La conduite réactive par supervision concourante et accommodation hybride de la commande décrite est une stratégie générique de conduite des processus dynamiques étendus. Elle peut être utilisée dans le cadre d'application des systèmes hydrographiques dans le but de valoriser la ressource en eau.

2.6 Conduite réactive pour la valorisation de la ressource en eau

Les cours d'eau véhiculent les débits q qui sont des grandeurs continues. Ils sont perturbés par des événements extérieurs, tels que les pluies, les rejets et les prélèvements des usagers. L'occurrence de ces événements peut entraîner une non satisfaction des besoins des consommateurs. Le but de la conduite réactive est de mettre en place des actions correctives afin d'atteindre des objectifs de valorisation de la ressource en eau malgré la présence de perturbations. Nous ne nous intéressons donc pas directement aux perturbations mais à leurs conséquences sur l'état de la ressource. Cette dernière peut être déterminée à partir des mesures issues des capteurs du réseau M_i . La hauteur d'eau h_{M_i} mesurée au niveau du capteur M_i est utilisée pour la détermination de l'état de la ressource e_i à chaque instant kT_d . Certains capteurs fournissent directement les mesures des débits, mais nous considérons ici les capteurs de mesures sur seuil ou limnimètres.

La stratégie de supervision concourante et d'accommodation hybride de la commande appliquée à la valorisation de la ressource en eau est représentée figure 2.7. Dans le cadre de la gestion des réseaux hydrographiques, le module GCOG regroupe les règles de gestionnaire concernant la gestion à long et à court terme présentées au premier chapitre. Les consignes de délestage et de chaque actionneur du système hydrographique, ainsi que les règles de priorités entre usages, sont définies selon les demandes et le contexte environnemental.

Le module SC reçoit les données sur les hauteurs d'eau h_{M_i} provenant des capteurs du réseau et les débits objectifs $q_{j_{obj}}$ de chaque vanne j , issus du module GCOG. Le module AHC reçoit des données sur l'état de la ressource e_i et l'écart entre les débits attendus et ceux mesurés ΔQ_{M_i} provenant du module SC, les débits objectifs $q_{j_{obj}}$, les priorités positives λ_j et négatives μ_j associées à chaque vanne j , ainsi que les temps de transfert τ_i caractéristiques de la dynamique des réseaux hydrographiques, issus du module GCOG.

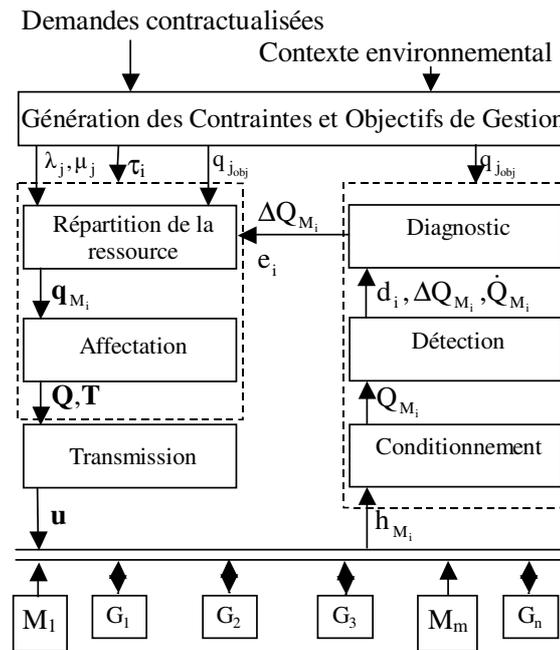


FIG. 2.7 – Architecture de conduite réactive de réseaux hydrographiques.

Les priorités λ_j et μ_j associées à chaque vanne transcrivent les règles d'arbitrage du gestionnaire lorsque la ressource en eau est en excès et lorsqu'elle est en manque. Les fonctions de supervision concurrente et d'accommodation de la commande sont décrites dans le cadre de la valorisation de la ressource en eau dans les sections suivantes.

2.7 Supervision concurrente de l'état des ressources en eau

2.7.1 Synthèse du bloc de conditionnement

Le Conditionnement a pour objectif la mise à disposition de données fiables. Il consiste d'une part à déterminer les débits Q_{M_i} à partir des hauteurs d'eau mesurées h_{M_i} grâce à l'utilisation de courbes de tarage débit/hauteur (figure 2.8) spécifiques à chaque limnimètres du réseau. A chaque hauteur mesurée $[mm]$ correspond un débit $[l/s]$.

Lors du rapatriement des données, des erreurs de transmission peuvent survenir. De plus, les réseaux hydrographiques sont soumis à des perturbations rapides, cycliques et de faibles amplitudes caractéristiques des phénomènes de pompage. Celles-ci ne doivent pas être prises en compte car elles sont naturellement atténuées au fil de l'eau. Les données sur les hauteurs d'eau issues des capteurs sont corrigées grâce à l'utilisation d'un filtrage passe-bas sur fenêtre glissante permettant de filtrer les perturbations non intéressantes.

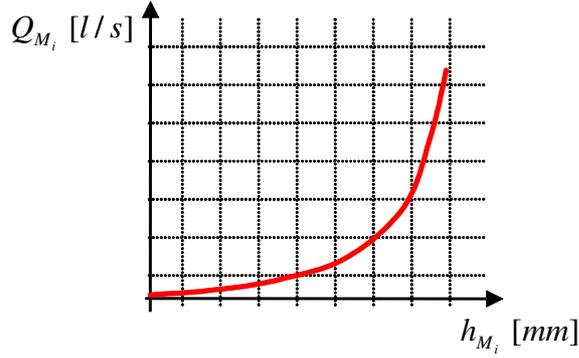


FIG. 2.8 – Allure du débit estimé en fonction de la hauteur d’eau pour un point de mesure M_i .

2.7.2 Synthèse du bloc de détection

La détection a pour rôle de révéler l’occurrence des écarts ΔQ_{M_i} entre les débits mesurés et conditionnés Q_{M_i} et les objectifs de gestion $Q_{M_i,obj}$ au niveau du point de mesure M_i à chaque instant kT_d . Les objectifs de gestion $Q_{M_i,obj}$ sont calculés à partir de la somme des débits objectifs de chaque actionneur $q_{j,obj}$ en aval du point de mesure M_i :

$$Q_{M_i,obj} = \sum_{j=n_i}^n q_{j,obj}, \quad (2.3)$$

où n_i la première vanne du bief, *i.e.* la première vanne en aval du point de mesure M_i , et n la dernière vanne.

La détection des écarts entre la ressource disponible et la ressource attendue est réalisée grâce à l’utilisation d’un automate à deux états D_{0i} et D_{1i} . Ils correspondent respectivement à un état **non_détection** et un état **détection** (figure 2.9). Les conditions de transition entre les deux états de l’automate de détection ϑ_i et $\neg\vartheta_i$ (où \neg est l’opérateur logique de négation) ont été établies dans le but de détecter uniquement l’occurrence d’événements significatifs.

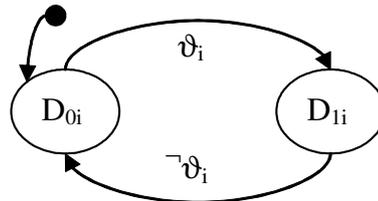


FIG. 2.9 – Automate de détection.

Deux méthodes de détection sont proposées. La première consiste à définir un seuil fixe de détection au delà duquel les variables continues seront considérées comme suffisamment importantes pour déclencher une accommodation des commandes. La seconde consiste à définir un seuil variable de détection en fonction de la connaissance a priori du signal. Elle permet de garantir une probabilité d'erreurs fixée.

La méthode de détection par seuil fixe (DSF) consiste à détecter l'instant pour lequel les grandeurs Q_{M_i} sortent de la zone délimitée par des seuils autour de l'objectif $Q_{M_i,obj}$ fixé pour chaque capteur M_i (figure 2.10). Le réglage des seuils peut être obtenu par compromis après différentes simulations optimistes et pessimistes. Une variable de décision d_i est définie pour indiquer la détection d'un écart. Elle est mise à 1 lorsqu'un écart est détecté, et dans le cas contraire, elle est affectée à 0.

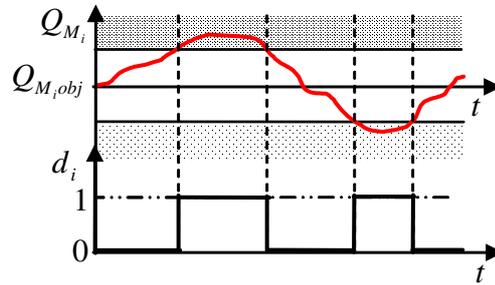


FIG. 2.10 – Fonction de décision d_i indiquant les franchissements de seuils fixes de détection au point de mesure M_i .

L'écart sur les grandeurs ΔQ_{M_i} est calculé pour le point de mesure M_i à partir de la grandeur mesurée Q_{M_i} et du débit objectif au point de mesure $Q_{M_i,obj}$:

$$\Delta Q_{M_i} = Q_{M_i} - Q_{M_i,obj}. \quad (2.4)$$

La valeur absolue de l'écart ΔQ_{M_i} est ensuite comparée à chaque période de détection T_d au seuil de détection défini th_i . Le seuil th_i doit être sélectionné de façon à être assez grand pour ne pas tenir compte des perturbations de faible amplitude, et suffisamment petit pour limiter le retard de détection. Les conditions de transition entre états dépendent de la valeur du seuil fixe th_i du point de mesure M_i :

$$\vartheta_i : [|\Delta Q_{M_i}| - th_i > 0]. \quad (2.5)$$

L'instant de détection t_d est tel que :

$$t_d = \{t : \vartheta_i\}. \quad (2.6)$$

L'usage de la méthode DSF permet d'avoir un premier résultat rapidement. Elle ne garantit cependant pas de minimiser le nombre de décision erronée.

La méthode de détection par seuil variable (DSV) est basée sur le principe du test de Wald [Basseville & Nikiforov, 1993]. Ce test peut être utilisé pour détecter les écarts sur des grandeurs continues, en supposant qu'elles suivent une loi de Gauss, tout en fixant les probabilités de non détection et de fausse alarme.

Deux hypothèses sont considérées : H_{0i} représentant le mode de fonctionnement normal pour lequel le signal ne change pas de moyenne et H_{1i} correspondant à un saut de moyenne du signal. Ce test appliqué sur un signal centré, est composé de cinq paramètres de réglage :

- la moyenne de la grandeur continue correspondant au débit et considérée égale à Q_{M_iobj} sous l'hypothèse nulle H_{0i} ,
- l'écart-type σ_i du signal qui est déterminé à partir de l'historique des mesures de débit normal,
- les probabilités de non détection PL_i et de fausse alarme PF_i ,
- le saut jp_i .

Le test séquentiel du saut de moyenne consiste à comparer la somme cumulée W donnée par la relation (2.7) avec les deux seuils U_i et V_i à chaque période de détection T_d (figure 2.11).

$$W(Q_{M_i}, k) = \sum_{r=0}^{R_W} |Q_{M_i}(k-r) - Q_{M_iobj}|, \quad (2.7)$$

où R_W est l'horizon du test de Wald.

Les variables U_i et V_i sont calculées à partir de l'écart type du signal, des probabilités de non détection et de fausse alarme et du saut :

$$\begin{cases} U_i(k) = \frac{jp_i}{2} + U_i(k-1), \\ V_i(k) = \frac{jp_i}{2} + V_i(k-1). \end{cases} \quad (2.8)$$

La valeur initiale de R_W est 0, et celles de $U_i(0)$, $V_i(0)$ et $W(Q_{M_i}, 0)$ sont telles que :

$$\begin{cases} U_i(0) = \frac{\sigma_i^2}{jp_i} \ln \left(\frac{PL_i}{1 - PF_i} \right), \\ V_i(0) = \frac{\sigma_i^2}{jp_i} \ln \left(\frac{1 - PL_i}{PF_i} \right), \\ W(Q_{M_i}, 0) = 0. \end{cases} \quad (2.9)$$

Dans ce cas, l'algorithme permettant de déterminer la valeur de la variable de décision d_i est défini à partir des règles suivantes. La variable d_i est initialisée à 0, puis affectée à 0 lorsque l'hypothèse H_{0i} est validée, *i.e.* $W(Q_{M_i}, k) \leq U_i$. Elle prend la valeur 1 lorsque l'hypothèse H_{1i} est validée, *i.e.* $V_i \leq W(Q_{M_i}, k)$. Lorsqu'une hypothèse est validée, les variables U_i , V_i sont initialisées selon la relation (2.9) et R_W est remis à 0. Si aucune hypothèse n'est validée, *i.e.* $U_i < W(Q_{M_i}, k) < V_i$, la variable de décision garde la valeur qu'elle avait à l'instant précédent, *i.e.* $d_i(k) = d_i(k-1)$, la valeur du débit mesuré à

l'instant k est ajoutée à la somme cumulée des débits mesurés aux instants précédents, et la variable R_W est incrémentée.

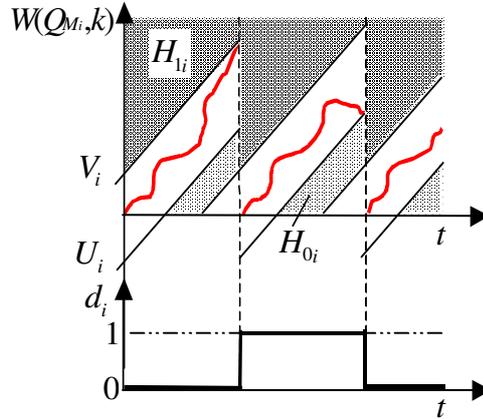


FIG. 2.11 – Fonction de décision d_i révélant un saut de moyenne détecté après que la somme cumulée $W(Q_{M_i}, k)$ ait rejoint le seuil haut V_i , puis le seuil bas U_i .

Lorsque la méthode de détection DSV est utilisée, les conditions de transition dépendent de la variable de décision d_i :

$$\vartheta_i : [d_i = 1]. \quad (2.10)$$

Quelque soit la méthode de détection, lorsque l'état de l'automate de détection est D_{1i} , l'écart sur les débits est considéré comme suffisamment important pour que le diagnostic de l'état du système soit réalisé. Les seuils de détection utilisés dans les techniques de détection par seuils fixes, th_i , et par saut de moyenne, jp_i , doivent être sélectionnés de façon à ne pas prendre en compte les perturbations de faible amplitude et de fréquence élevée, par rapport à la dynamique du système. La détection de perturbations de fréquence élevée provoque un diagnostic et une reconsignation trop fréquente des vannes ayant pour conséquence un battement qui provoque une agitation des débits tout le long des cours d'eau et une usure prématurée des organes de commande.

Les variables issues du bloc Détection sont la variable d_i , égale à 0 pour l'état D_{0i} et à 1 pour l'état D_{1i} , l'écart ΔQ_{M_i} et les dérivées \dot{Q}_{M_i} et \ddot{Q}_{M_i} de la grandeur continue déterminées sur fenêtre glissante.

2.7.3 Synthèse du bloc de diagnostic

Le Diagnostic est conçu pour déterminer l'état de la ressource au niveau du capteur. Seules les situations significatives et nécessitant des actions de compensation afin de satisfaire des objectifs de fonctionnement sont considérées. Ces situations sont déterminées à partir des caractéristiques du signal mesuré.

Certaines techniques de description qualitative des signaux ont été présentées au chapitre 1. Nous avons opté pour une approche de diagnostic par automates à états basés sur la caractérisation des signaux. En effet, la mise en place d'un diagnostic par génération de résidus s'avère complexe compte tenu des difficultés liées à la modélisation des systèmes hydrauliques et des situations qu'il est nécessaire de prendre en compte. Nous proposons de tenir compte des états du système caractérisés par le niveau, la tendance et l'allure des variables continues. Elles correspondent respectivement à l'estimation des grandeurs Q_{M_i} , \dot{Q}_{M_i} et \ddot{Q}_{M_i} . Les dérivées d'ordre supérieur ne sont pas considérées compte tenu de l'interprétation possible de la dynamique des écoulements.

La grandeur Q_{M_i} représente la quantité d'eau disponible à l'instant kT_d . La tendance du signal correspondant à l'estimation de \dot{Q}_{M_i} renseigne sur l'augmentation ou la diminution du débit. Finalement, l'allure associée à l'estimation de \ddot{Q}_{M_i} permet de tenir compte de la vitesse d'évolution du niveau. Elle permet de limiter l'impact, en aval des cours d'eau, des perturbations ayant une évolution rapide. La considération des grandeurs Q_{M_i} , \dot{Q}_{M_i} et \ddot{Q}_{M_i} , nous a conduit à la proposition d'un automate de diagnostic composé de 7 états décrits sur la figure 2.12 pour un capteur M_i .

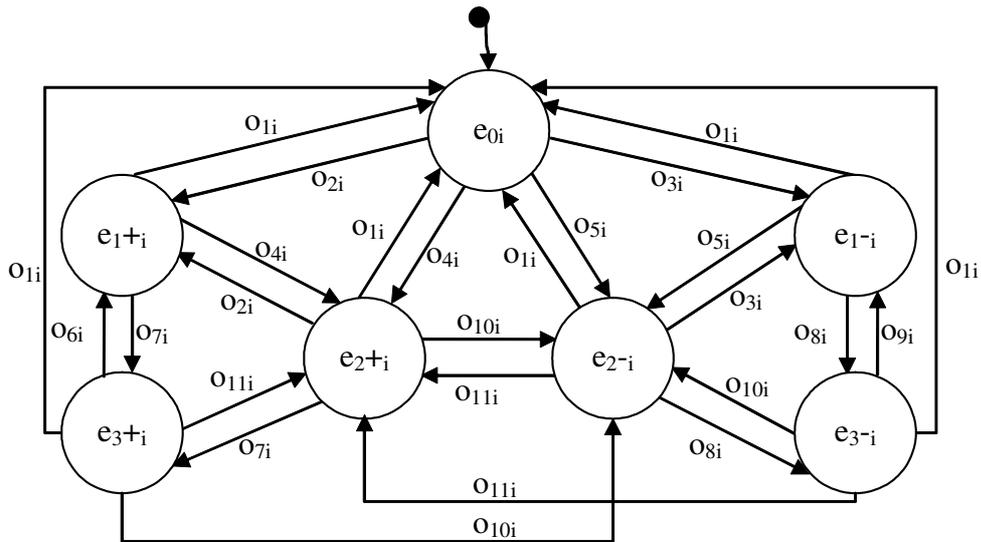


FIG. 2.12 – Automate de diagnostic déduit des 7 états interprétables physiquement.

Les états e_i représentés sur la figure 2.12 sont définis à partir de six situations possibles de la variable continue (tableau 2.1). L'état e_{0i} correspond à l'état de repos de l'automate. La situation e_{+i} correspond à un excédent de ressource, c'est à dire que la grandeur mesurée est au dessus du seuil fixé. Symétriquement, la situation e_{-i} correspond à un manque. Lorsque la variable continue est constante dans le temps, la situation est notée c_i , et dans le cas contraire, elle est notée $\neg c_i$. Finalement, lorsque l'évolution de la variable continue est rapide, la situation est notée \dot{c}_{+i} , et lorsqu'elle est lente, la situation est notée \dot{c}_{-i} .

\dot{c}_{-i} .

Etats	Situations	Interprétation
e_{0i}	e_{0i}	état de repos
e_{1+i}	$e_{+i} \wedge \neg c_i \wedge \dot{c}_{-i}$	excès \wedge non constant \wedge lent
e_{2+i}	$e_{+i} \wedge \neg c_i \wedge \dot{c}_{+i}$	excès \wedge non constant \wedge rapide
e_{3+i}	$e_{+i} \wedge c_i$	excès \wedge constant
e_{1-i}	$e_{-i} \wedge \neg c_i \wedge \dot{c}_{-i}$	manque \wedge non constant \wedge lent
e_{2-i}	$e_{-i} \wedge \neg c_i \wedge \dot{c}_{+i}$	manque \wedge non constant \wedge rapide
e_{3-i}	$e_{-i} \wedge c_i$	manque \wedge constant

TAB. 2.1 – Etats de l’automate de diagnostic.

Les états e_{+i} et e_{-i} dépendent du signe de la grandeur ΔQ_{M_i} définie par la relation (2.15). Les états c_i et $\neg c_i$ sont déterminés en fonction de l’évolution de la grandeur \dot{Q}_{M_i} et du seuil de diagnostic, dth_i . Enfin, les états \dot{c}_{+i} et \dot{c}_{-i} sont calculés à partir de l’allure \ddot{Q}_{M_i} et d’un critère subjectif sur la vitesse d’évolution de Q_{M_i} , noté v . Les conditions de transition entre les états de l’automate de diagnostic sont données dans le tableau 2.2 à partir de la variable de décision d_i ($d_i = 0$: état **non_détection** et $d_i = 1$: un état **détection**) et des conditions de transition suivantes :

$$\begin{cases} \psi_i & [\Delta Q_{M_i} < 0], \\ \omega_i & \left[\left| \dot{Q}_{M_i} \right| < dth_i \right], \\ \varsigma_i & \left[\left| \ddot{Q}_{M_i} \right| > v \right]. \end{cases} \quad (2.11)$$

La période de commande des vannes T_c est fixée en fonction de la dynamique du système. Il n’est donc pas possible de l’augmenter lors d’une variation rapide du débit. Partant de ce constat, la prise en compte de l’estimation de l’allure du débit \ddot{Q}_{M_i} et donc des états e_{1+i} , e_{2+i} , e_{1-i} et e_{2-i} s’avère inutile. Un automate de diagnostic à cinq états agrégés (figure 2.13) est donc retenu.

Les variables issues du diagnostic sont l’écart de débit à répartir ΔQ_{M_i} et l’état du système diagnostiqué e_i .

La compensation des situations de défaillance des systèmes hydrauliques dynamiques nécessite dans un premier temps la connaissance de l’état des ressources et dans un second temps le recours à des procédures d’accommodation de la commande. La valorisation de la ressource disponible dans les cours d’eau consiste à acheminer les excédents d’eau vers les réservoirs en aval de façon à y être stockés, et à compenser les manques par des restrictions sur les usages les moins prioritaires. Les manques et les excès d’eau sont déterminés à partir de l’estimation des écarts de débit ΔQ_{M_i} .

Transitions	Conditions
o_{1i}	$\neg d_i$
o_{2i}	$d_i \wedge \neg \psi_i \wedge \neg \varsigma_i$
o_{3i}	$d_i \wedge \psi_i \wedge \neg \varsigma_i$
o_{4i}	$d_i \wedge \neg \psi_i \wedge \varsigma_i$
o_{5i}	$d_i \wedge \psi_i \wedge \varsigma_i$
o_{6i}	$d_i \wedge \neg \psi_i \wedge \neg \omega_i \wedge \neg \varsigma_i$
o_{7i}	$d_i \wedge \neg \psi_i \wedge \omega_i$
o_{8i}	$d_i \wedge \psi_i \wedge \omega_i$
o_{9i}	$d_i \wedge \psi_i \wedge \neg \omega_i \wedge \neg \varsigma_i$
o_{10i}	$d_i \wedge \psi_i \wedge \neg \omega_i \wedge \varsigma_i$
o_{11i}	$d_i \wedge \neg \psi_i \wedge \neg \omega_i \wedge \varsigma_i$

TABLE 2.2 – Transitions de l'automate de diagnostic.

2.8 Accommodation hybride de la commande pour un cours d'eau d'un seul bras

2.8.1 Synthèse du bloc de répartition de la ressource

L'accommodation hybride de la commande conduit à la détermination de vecteurs de répartition $\mathbf{q}_{M_i}^k$ composés de toutes les nouvelles consignes à appliquer aux actionneurs. Les fonctions composant le module AHC sont décrites dans le cadre de cours d'eau composé d'un seul bras équipé de n vannes et de m points de mesure.

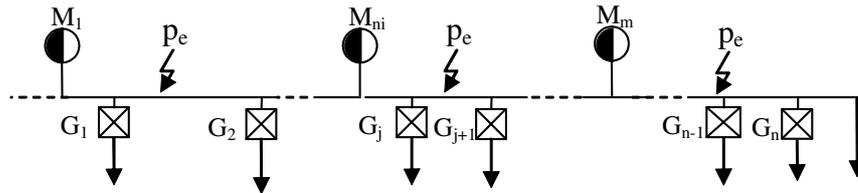


FIG. 2.14 – Cours d'eau composé de n vannes et de m points de mesure.

Lorsque l'état de la ressource e_i diagnostiqué est e_0 , aucune perturbation n'est détectée. Dans ce cas, les actionneurs doivent être consignés à leur objectif. Le vecteur de répartition $\mathbf{q}_{M_i}^k$ est obtenu en imposant à chaque vanne son débit objectif.

$$\mathbf{q}_{M_i}^k = \left[0 \quad \dots \quad 0 \quad q_{n_{obj}}^k \quad q_{n_i+1_{obj}}^k \quad \dots \quad q_{n_{obj}}^k \right]^T, \quad (2.12)$$

avec n_i l'indice de la première vanne en aval du $i^{\text{ème}}$ point de mesure, et n celui de la dernière vanne.

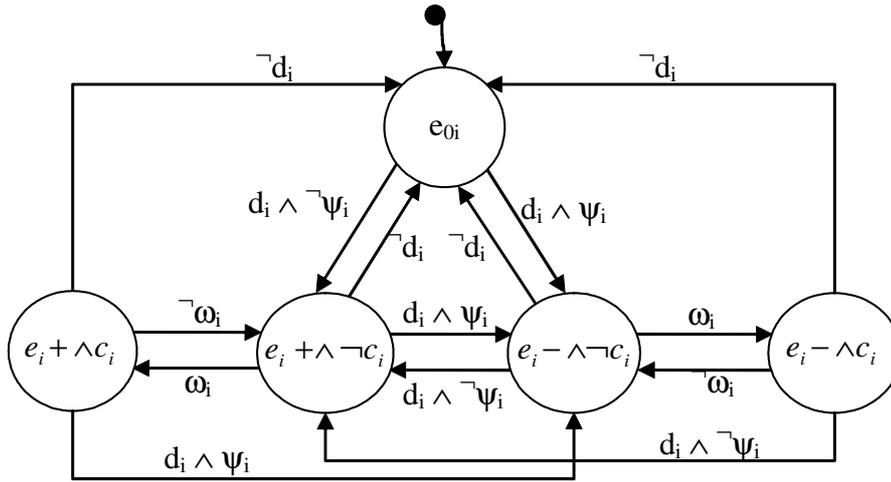


FIG. 2.13 – Automate agrégé de diagnostic à 5 états.

Lorsque le diagnostic indique un état e_i différent de l'état e_{0i} , une accommodation de la commande est réalisée. L'écart de débit est alors réparti équitablement entre les vannes se situant en aval du point de mesure M_i grâce à l'utilisation d'une méthode d'optimisation de la répartition tenant compte des priorités associées aux vannes. L'optimisation de la répartition de la ressource doit être réalisée tout en limitant le nombre de consignes envoyées aux vannes du réseau hydrographique. Cette contrainte nous a conduit à la proposition de deux méthodes de répartition utilisées respectivement lorsque l'état de la ressource est constante et lorsqu'elle est non constante.

Lorsque l'état de la ressource e_i est c_i , la perturbation est répartie entre toutes les vannes aval du point de mesure M_i , selon leur priorité λ_j ou μ_j déterminée au niveau du GCOG, et correspondant respectivement à des écarts de débits positifs ($e+_i$) ou négatifs ($e-_i$). La répartition est réalisée grâce à la minimisation d'une fonction de coût par programmation linéaire. La fonction de coût f_i est définie par la somme pondérée des différences entre le débit objectif $q_{j_{obj}}$ et la consigne q_j de chaque vanne j :

$$f_{M_i} = \sum_{j=n_i}^n \chi_{M_i,j} (q_j - q_{j_{obj}}), \quad (2.13)$$

avec $\chi_{M_i,j} = \gamma \frac{1}{\lambda_j} + (\gamma - 1) \frac{1}{\mu_j}$, $\gamma = \frac{1}{2}(\text{sign}(\Delta Q_{M_i}) + 1)$.

Lors de la répartition de l'écart de débit, il faut veiller à ce que les nouvelles consignes soient dans la plage de fonctionnement des vannes, et que leur somme soit égale à l'écart de débit. L'optimisation de la fonction de coût est donc réalisée sous les contraintes suivantes :

$$\begin{cases} \sum_{j=n_i}^n (q_j - q_{j_{obj}}) = \Delta Q_{M_i} , \\ q_{j_{\min}} \leq q_j \leq q_{j_{\max}} , \end{cases} \quad (2.14)$$

où $q_{j_{\min}}$ et $q_{j_{\max}}$ sont les bornes maximale et minimale de la plage de fonctionnement de la vanne j . La plage de fonctionnement de chaque vanne est déterminée à partir de ses caractéristiques de fonctionnement et/ou de la plage de débit à respecter sur les rivières ou les canaux alimentés par chaque vanne.

Un vecteur de répartition $\mathbf{q}_{M_i}^k$ est obtenu pour chaque point de mesure par optimisation de fonction de coût :

$$\mathbf{q}_{M_i}^k = [0 \quad \dots \quad 0 \quad q_{n_i}^k \quad \dots \quad q_{n_i+1}^k \quad \dots \quad q_n^k]^T. \quad (2.15)$$

Lorsque état de la ressource e_i est $\lceil c_i$, la répartition de l'écart de débit par optimisation d'une fonction de coût reviendrait à déterminer les nouvelles consignes des vannes à chaque nouvelle mesure provoquant des problèmes de maintenance pour l'équipement des réseaux hydrographiques. Ainsi, lorsque l'écart de débit est non constant, il n'est réparti que sur une seule vanne. Cette répartition peut être réalisée selon diverses règles. Dans [Duviella *et al.*, 2003a], nous avons proposé une première règle qui consiste à répartir l'écart de débit sur une seule et même vanne tant que l'état de la ressource est $\lceil c$. Cette règle n'a pas été retenue car elle provoque des sauts de commande importants lorsque l'état e_i passe de $\lceil c_i$ à c_i .

Une deuxième règle a été définie dans [Duviella *et al.*, 2003b] afin d'éviter les sauts de commande lorsque l'état e_i passe de $\lceil c_i$ à c_i . Elle consiste à répartir, à tour de rôle, l'écart de débit sur les vannes de plus grande priorité tant que l'état de la ressource est $\lceil c$. Un critère de sollicitation K_j associé à chaque vanne j , est incrémenté de 1 à chaque nouvelle sollicitation de la vanne. La vanne l sélectionnée est celle qui a le plus petit critère de sollicitation K_j (2.16). Les vannes peuvent être sélectionnées tant que leur plage de fonctionnement leur permet d'absorber un écart de débit. Dans le cas contraire, une autre vanne est sélectionnée selon la même procédure.

$$\left\{ \begin{array}{l} l \mid K_l = \min_{j \in GG} K_j \text{ et } \chi_l = \min_{j \in GG} \chi_j, \\ GG = \{j \mid n_i \leq j \leq n \text{ et } q_{j_{\min}} \leq q_{j_{obj}} + (\Delta Q_{M_i}^k - \Delta Q_{M_i}^{k-1}) \leq q_{j_{\max}} \}. \end{array} \right. \quad (2.16)$$

L'écart de débit qui n'a pas été encore réparti sur les autres vannes doit être réparti sur la vanne l .

$$\Delta q_l^k = \Delta Q_{M_i}^k - \Delta Q_{M_i}^{k-1}. \quad (2.17)$$

Le vecteur de répartition $\mathbf{q}_{M_i}^k$ obtenu associe à la nouvelle vanne sélectionnée l l'écart de débit restant.

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{q}_{M_i}^k = [0 \quad \dots \quad 0 \quad q_{n_i}^{k-1} \quad \dots \quad q_l^k \quad \dots \quad q_n^{k-1}]^T, \\ q_l^k = q_l^{k-1} + \Delta q_l^k. \end{array} \right. \quad (2.18)$$

L'écart de débit mesuré est réparti sur les vannes du canal selon des règles en fonction de l'état diagnostiqué et de l'importance des vannes. Les vecteurs de répartition obtenus pour chaque point de mesure M_i à chaque instant kT_d , sont utilisés afin de constituer le

vecteur de consignes d'affectation \mathbf{Q} ($1 \times n$). Ce dernier est obtenu par la relation (2.20) à l'aide de la matrice des débits d'accommodation α_{M_i} ($n \times n$) définie par (2.19) et de tous les vecteurs $\mathbf{q}_{M_i}^k$. Il contient les débits de consigne calculés à partir du point de mesure M_i le plus proche de q_j , *i.e.* ceux issus des vecteurs de répartition $\mathbf{q}_{M_1}^k$ pour les vannes G_1 à G_{n_2-1} , ceux issus du vecteur $\mathbf{q}_{M_i}^k$ pour les vannes G_{n_i} à $G_{n_{i+1}-1}$, et finalement ceux issus du vecteur $\mathbf{q}_{M_m}^k$ pour les vannes G_m à G_n .

$$\alpha_{M_i} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{n_{i+1}-1 \times n_{i+1}-1} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

où \mathbf{I} est la matrice identité de taille $n_{i+1} - 1 \times n_{i+1} - 1$.

$$\mathbf{Q} = \sum_{r=1}^{m-1} \alpha_{M_r} \mathbf{q}_{M_r}^k + \mathbf{q}_{M_m}^k, \quad (2.20)$$

où n_i est l'indice de la première vanne en aval du point de mesure M_i , n l'indice de la dernière vanne, et m le nombre total de points de mesure.

Lorsqu'un manque d'eau est détecté au point de mesure M_i , la répartition de la perturbation consiste à réduire l'ouverture de certaines vannes en aval de M_i . Compte tenu des temps de transferts importants, une fermeture des vannes à l'instant de détection provoquerait des débordements en bout du cours d'eau. En effet, le manque d'eau détecté ne s'est pas encore propagé le long du cours d'eau. De manière semblable, la répartition d'un excès d'eau par une ouverture trop précoce des vannes provoquerait des manques en bout du cours d'eau. Afin d'éviter les manques ou les excès d'eau provoqués par l'ouverture ou la fermeture trop précoce des vannes, les temps de transfert $T_{M_i,j}$ caractéristiques du réseau hydrographique doivent être pris en compte au niveau du bloc d'affectation.

2.8.2 Synthèse du bloc d'affectation

L'identification des temps de transfert peut être réalisée à partir de campagnes de mesure sur le terrain qui nécessitent la mise en place de moyens importants et sont par conséquent longues et onéreuses. Il est aussi possible d'utiliser une approche par modélisation à partir de la linéarisation des EDP de Saint-Venant. Cette linéarisation conduit à la détermination d'un temps de transfert correspondant à un débit. Ainsi, le domaine de fonctionnement des systèmes hydrauliques peut être décomposé et les temps de transfert correspondant aux débits peuvent être calculés. La figure 2.15 représente les temps de transfert correspondant aux débits avec un pas de $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$.

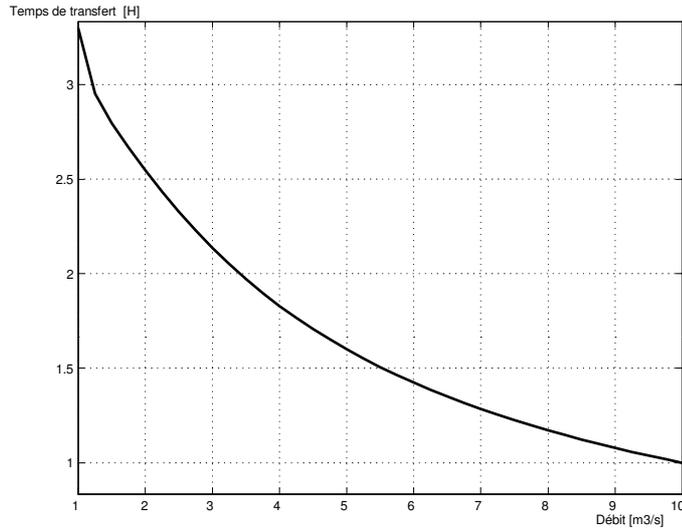


FIG. 2.15 – Allure des courbes liant le temps de transfert au débit.

La détermination des temps de transfert des biefs équipés de vannes latérales G_j , conduit à des résultats peu précis. En effet, les vannes disposées entre le point amont et aval des biefs ne sont jamais fermées, et le débit en amont du bief est différent de celui en aval. La prise en compte des biefs n'est pas suffisante dans ce cas. Nous avons donc choisi de considérer les tronçons de bief. Un tronçon est une partie d'un cours d'eau situé entre un point de mesure et une vanne, entre deux vannes et entre une vanne et un point de mesure aval. Les temps de transfert τ_i sont déterminés pour chaque tronçon en considérant que les débits amont et aval du tronçon Q_j sont identiques.

L'affectation de la ressource consiste à prendre en compte, lors de la reconsignation des vannes, les temps de transfert $T_{M_i,j}$ entre le point de mesure M_i , où la perturbation a été détectée, et chaque vanne j (figure 2.16).

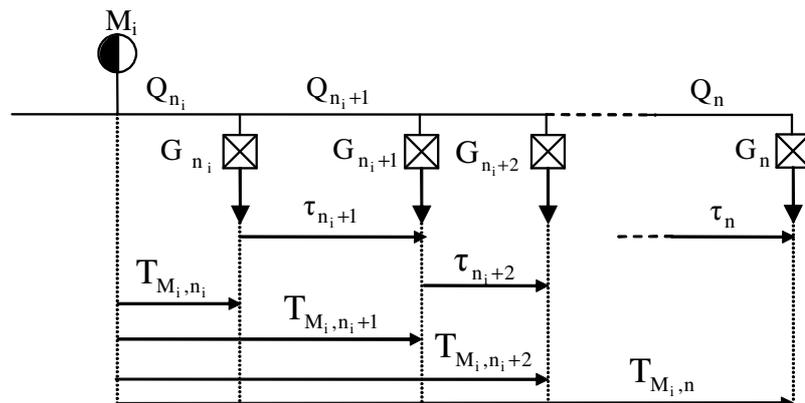


FIG. 2.16 – Temps de transfert τ_j entre chaque tronçon et les temps de transfert $T_{M_i,j}$ entre le point de mesure M_i et chaque vanne j .

Les temps de transfert $T_{M_i,j}$ sont calculés à partir des temps de transfert de chaque tronçon τ_j selon la relation (2.21).

$$T_{M_i,j} = T_{M_i,n_i} + \sum_{i=n_i}^j \tau_i, \quad (2.21)$$

avec $n_i + 1 \leq j \leq n$.

Ils sont ensuite exprimés en fonction de la période de détection T_d (2.22).

$$kd_{M_i,j} = \left\lfloor \frac{T_{M_i,j}}{T_d} \right\rfloor + 1, \quad (2.22)$$

où la partie entière d'une division est représentée par $\lfloor \cdot \rfloor$.

L'instant où la quantité d'eau mesurée en M_i parviendra à hauteur de la vanne j est donc :

$$\mathcal{T}_{M_i,j} = (k + kd_{M_i,j}) T_d,$$

où kT_d est l'instant courant.

Un vecteur d'instant d'affectation \mathbf{T} ($1 \times n$) est calculé à partir des instants d'affectation associés à chaque consigne (2.23). Il est réévalué à la période de détection T_d .

$$\mathbf{T} = [\mathcal{T}_{M_1,1} \ \mathcal{T}_{M_1,n_1+1} \ \dots \ \mathcal{T}_{M_i,n_i} \ \dots \ \mathcal{T}_{M_i,n_{i+1}-1} \ \dots \ \mathcal{T}_{M_m,n_m} \ \dots \ \mathcal{T}_{M_m,n}]^T. \quad (2.23)$$

Par la suite, une matrice d'accommodation \mathbf{u} est calculée à chaque instant kT_d à partir des consignes issues du vecteur \mathbf{Q} et des instants d'affectation issus du vecteur \mathbf{T} . Elle est composée de n colonnes et de H lignes, où H , multiple de la période de commande T_c , représente l'horizon des instants de commande. La première ligne regroupe les consignes qui seront envoyées à chaque vanne au prochain instant de commande $(k+1)T_c$, la deuxième, celles qui seront envoyées à l'instant de commande suivant $(k+2)T_c$, et finalement la dernière, celles envoyées à l'horizon de commande $(k+H)T_c$. La période de commande T_c est choisie comme un multiple entier κ de la période d'échantillonnage T_d . L'horizon H est recalculé à chaque période de détection kT_d par :

$$H = \left\lceil \frac{\max_{1 \leq i \leq n} \{T_i\}}{T_c} \right\rceil + 1. \quad (2.24)$$

L'actualisation de la matrice \mathbf{u} permet de prendre en compte les nouvelles consignes de débit calculées et de les ordonner selon leur instant d'affectation. Une consigne q_j est conservée sur l'horizon H tant qu'elle n'est pas remise en cause. La première ligne de la matrice \mathbf{u} est ensuite envoyée à chaque période de commande T_c . Le calcul de la matrice \mathbf{u} est décrit par l'algorithme présenté ci-dessous. L'initialisation de cet algorithme consiste à prendre $H = 1$, et $\mathbf{u}_1 = [q_{1_{obj}} \ \dots \ q_{j_{obj}} \ \dots \ q_{n_{obj}}]^T$.

Algorithme d'ordonnement du vecteur d'accommodation \mathbf{u} à chaque instant kT_d :

Entrées : le multiple entier κ de la période d'échantillonnage, l'instant courant k , l'horizon de consignation H , le vecteur d'accommodation \mathbf{u} , le vecteur d'instant d'affectation T , la période de commande T_c , le nombre d'actionneurs n , le vecteur de consignes d'affectation \mathbf{Q} .

Sorties : le vecteur d'accommodation \mathbf{u} .

<p>Si $\left\lfloor \frac{k}{\kappa} \right\rfloor == \frac{k}{\kappa}$ // l'instant d'échantillonnage correspond à une période de commande</p> <p style="padding-left: 20px;">\mathbf{u}_1 est transmis // envoi des consignes aux vannes</p> <p style="padding-left: 20px;">$H_{old} = H - 1$ // décrémentation de l'horizon de commande</p> <table border="0" style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; padding: 0 10px;"> <tr> <td style="padding: 0 5px;">Pour i allant de 1 à H_{old}</td> <td style="padding: 0 5px;">$\mathbf{u}_i = \mathbf{u}_{i+1}$ // la matrice u est décalée</td> </tr> <tr> <td style="padding: 0 5px;">FinPour</td> <td></td> </tr> </table> <p>FinSi</p> <p>$H = \max \left(\left\lfloor \frac{\max_{1 \leq i \leq n} \{\mathbf{T}(i)\}}{T_c} \right\rfloor + 1, H_{old} \right)$ // remise à jour de l'horizon H</p> <table border="0" style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; padding: 0 10px;"> <tr> <td style="padding: 0 5px;">Pour i allant de $H_{old} + 1$ à H</td> <td style="padding: 0 5px;">$\mathbf{u}_i = \mathbf{u}_{H_{old}}$ // initialisation des nouvelles lignes de u</td> </tr> <tr> <td style="padding: 0 5px;">FinPour</td> <td></td> </tr> </table> <table border="0" style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; padding: 0 10px;"> <tr> <td style="padding: 0 5px;">Pour j allant de 1 à n</td> <td style="padding: 0 5px;"> <table border="0" style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; padding: 0 10px;"> <tr> <td style="padding: 0 5px;">Pour i allant de $\left\lfloor \frac{T_i}{T_c} \right\rfloor + 1$ à H</td> <td style="padding: 0 5px;">$u_{i,j} = Q_j$ // mise à jour des consignes de leur instant de commande à H</td> </tr> <tr> <td style="padding: 0 5px;">FinPour</td> <td></td> </tr> </table> </td> </tr> <tr> <td style="padding: 0 5px;">FinPour</td> <td></td> </tr> </table>	Pour i allant de 1 à H_{old}	$\mathbf{u}_i = \mathbf{u}_{i+1}$ // la matrice u est décalée	FinPour		Pour i allant de $H_{old} + 1$ à H	$\mathbf{u}_i = \mathbf{u}_{H_{old}}$ // initialisation des nouvelles lignes de u	FinPour		Pour j allant de 1 à n	<table border="0" style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; padding: 0 10px;"> <tr> <td style="padding: 0 5px;">Pour i allant de $\left\lfloor \frac{T_i}{T_c} \right\rfloor + 1$ à H</td> <td style="padding: 0 5px;">$u_{i,j} = Q_j$ // mise à jour des consignes de leur instant de commande à H</td> </tr> <tr> <td style="padding: 0 5px;">FinPour</td> <td></td> </tr> </table>	Pour i allant de $\left\lfloor \frac{T_i}{T_c} \right\rfloor + 1$ à H	$u_{i,j} = Q_j$ // mise à jour des consignes de leur instant de commande à H	FinPour		FinPour		
Pour i allant de 1 à H_{old}	$\mathbf{u}_i = \mathbf{u}_{i+1}$ // la matrice u est décalée																
FinPour																	
Pour i allant de $H_{old} + 1$ à H	$\mathbf{u}_i = \mathbf{u}_{H_{old}}$ // initialisation des nouvelles lignes de u																
FinPour																	
Pour j allant de 1 à n	<table border="0" style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; padding: 0 10px;"> <tr> <td style="padding: 0 5px;">Pour i allant de $\left\lfloor \frac{T_i}{T_c} \right\rfloor + 1$ à H</td> <td style="padding: 0 5px;">$u_{i,j} = Q_j$ // mise à jour des consignes de leur instant de commande à H</td> </tr> <tr> <td style="padding: 0 5px;">FinPour</td> <td></td> </tr> </table>	Pour i allant de $\left\lfloor \frac{T_i}{T_c} \right\rfloor + 1$ à H	$u_{i,j} = Q_j$ // mise à jour des consignes de leur instant de commande à H	FinPour													
Pour i allant de $\left\lfloor \frac{T_i}{T_c} \right\rfloor + 1$ à H	$u_{i,j} = Q_j$ // mise à jour des consignes de leur instant de commande à H																
FinPour																	
FinPour																	

(2.25)

Les fonctions réalisées par chaque bloc de la stratégie de Supervision et d'Accommodation Hybride de la Commande ont été décrites dans le cadre d'un cours d'eau composé d'un seul bras. Afin de pouvoir appliquer notre approche dans le cadre des réseaux plus complexes, il est nécessaire de considérer le cas des confluent et des défluent (figure 1.14) et d'apporter quelques adaptations aux fonctions présentées précédemment.

2.9 Accommodation de la commande pour des cours d'eau maillés

Les réseaux hydrographiques sont composés d'une succession de bras simple, de confluent et de défluent. En définissant les principes de supervision et d'accommodation

de la commande pour les cas de confluent simple et de défluent simple, il est possible d'utiliser la stratégie de conduite de façon générique sur les réseaux hydrographiques.

Dans les deux configurations simples de réseaux, un confluent et un défluent, les fonctions de supervision, à savoir le conditionnement, la détection et le diagnostic, sont identiques à celles présentées dans la précédente section pour le cas d'un cours d'eau constitué d'un seul bras. Il s'agit de détecter et de diagnostiquer l'état de la ressource au niveau de chaque point de mesure M_i du système.

Dans le cas d'un confluent, la fonction de répartition de la ressource est également identique. La ressource est répartie sur chaque bief selon la méthode de répartition présentée dans la section précédente. La fonction d'affectation doit, quand à elle, être modifiée. Lors du calcul du vecteur de consignes d'affectation \mathbf{Q} , les nouvelles consignes calculées lors de la répartition de la ressource à partir des différents points de mesure doivent être, dans ce cas, additionnées pour toutes les vannes en commun à plusieurs biefs. La fonction de transmission reste également identique à celle présentée dans la section précédente.

L'exemple du cours d'eau schématisé sur la figure 2.17 permet d'illustrer les modifications apportées à la stratégie de conduite dans le cas d'un confluent. La ressource présente au niveau de M_1 est répartie entre les vannes $G_1, G_2, \dots, G_r, G_j, G_{j+1}$ et G_n , et celle présente au niveau de M_2 est répartie entre les vannes $G_{r+1}, G_{r+2}, \dots, G_{j-1}, G_j, G_{j+1}$ et G_n . Les consignes calculées lors de la répartition à partir du point de mesure M_1 et M_2 sont additionnées pour les vannes communes aux deux biefs, G_j à G_n .

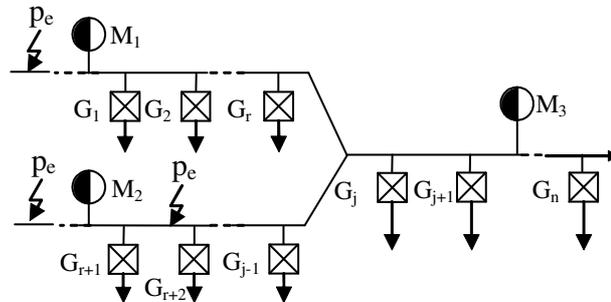


FIG. 2.17 – Cas d'une confluence.

Dans le cas d'un défluent, les cours d'eau sont généralement équipés d'au moins un point de mesure au niveau de la séparation du bras principal (figure 2.18), de façon à mesurer les débits d'alimentation des différents bras aval. Dans ce cas, les fonctions de répartition sont utilisés de façon indépendante pour le bras amont et pour chacun des bras aval.

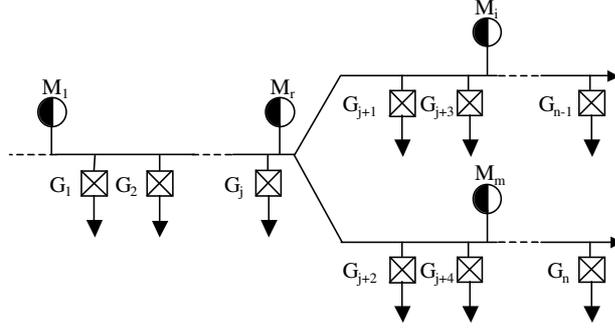


FIG. 2.18 – Cas d'un réseau hydrographique avec une défluece.

Lorsqu'il n'y a pas de point de mesure, il est nécessaire de modifier les fonctions de répartition. Cette modification revient, lorsque l'état du débit est constant, à ajouter de nouvelles contraintes lors de la résolution de la fonction de coût (2.13). La quantité d'eau non répartie en amont du point de défluece est exprimée selon la relation suivante :

$$\Delta Q_{Mi} = \sum_{j=n_i}^{nd_1-1} (q_{j_{obj}} - q_j), \quad (2.26)$$

où n_i est la première vanne en aval du point de mesure M_i , et nd_1 la première vanne du premier cours d'eau aval 1 après le point de séparation.

La répartition de la ressource est alors réalisée pour chaque point de mesure M_i du réseau sous les contraintes suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=n_i}^n (q_{j_{obj}} - q_j) = \Delta Q_{Mi}, \\ q_{j_{min}} \leq q_j \leq q_{j_{max}}, \\ \sum_{j=nd_r}^{nd_{r+1}-1} (q_{j_{obj}} - q_j) = w_r (\Delta Q_{Mi} - \sum_{j=n_i}^{nd_1-1} (q_{j_{obj}} - q_j)), r \in [1, N_b[, \\ \sum_{j=nd_{N_b}}^n (q_{j_{obj}} - q_j) = w_{N_b} (\Delta Q_{Mi} - \sum_{j=n_i}^{nd_1-1} (q_{j_{obj}} - q_j)), \\ \sum_{r=1}^{N_b} w_r = 1. \end{array} \right. \quad (2.27)$$

avec $\chi_{M_i, j} = \gamma \frac{1}{\lambda_j} + (\gamma - 1) \frac{1}{\mu_j}$, $\gamma = \frac{1}{2}(\text{sign}(\Delta Q_{Mi}) + 1)$, nd_r la première vanne du cours d'eau aval r après le point de séparation, w_r la proportion de débit alimentant le cours d'eau aval r , et N_b le nombre total de cours d'eau aval.

Les deux premières contraintes de résolution visent à garantir la répartition de l'écart de débit ΔQ_{Mi} et à conserver les nouvelles consignes calculées à l'intérieur de leur plage de fonctionnement délimitée par $q_{j_{min}}$ et $q_{j_{max}}$. La troisième contrainte permet la prise en compte, lors de la répartition de la ressource, des proportions de débit w_r alimentant les cours d'eau aval. La quatrième contrainte concerne la répartition de la ressource sur le

dernier cours d'eau aval. Finalement, la somme des proportions de débit w_r alimentant les cours d'eau aval est égale à 1.

Lorsque l'état de la ressource est non constante, la sélection de la vanne devant absorber l'écart de débit est réalisée selon la règle 2.16 en tenant compte de la sollicitation de chaque vanne. Lorsque la vanne sélectionnée appartient à l'un des cours d'eau aval, le débit qu'elle devra absorber ne lui parviendra pas entièrement, puisqu'il se répartira entre les cours d'eau aval au niveau du point de séparation des cours d'eau selon les proportions w_r . Dans ce cas, la vanne sélectionnée n'est consignée que pour absorber une partie du débit selon la proportion de débit alimentant le cours d'eau qu'elle équipe, et une des vannes de chacun des autres cours d'eau aval est consignée selon leur proportion w_r propres. Cette méthode revient donc à répartir l'écart de débit sur une vanne de chaque cours d'eau aval en tenant compte de la proportion de débit leur parvenant.

Les fonctions d'affectation et de transmission restent identiques à celles décrites dans la section précédente. Lorsque l'état de la ressource est constant, l'écart de débit mesuré en M_1 (figure 2.19) est répartie entre les vannes de G_1 à G_n en respectant les deux premières contraintes de (2.27). L'écart de débit résiduel après la reconsignation des vannes G_1 , G_2 et G_3 , alimente selon les proportions w_1 et w_2 les deux cours d'eau aval. Il est respectivement réparti sur les vannes G_4 à G_{nd_2-1} selon la proportion w_1 , et sur les vannes G_{nd_2} à G_n selon la proportion w_2 , en respectant la troisième contrainte de (2.27). Lorsque l'état de la ressource est non constant, l'écart de débit ΔQ_{M_1} mesuré en M_1 est répartie sur une des vannes G_1 à G_n selon la règle de sélection 2.16. Lorsqu'une des vannes du premier bras aval, de G_4 à G_{nd_2-1} , est sélectionnée pour absorber l'écart de débit ΔQ_{M_1} , elle est consignée à la valeur de ΔQ_{M_1} multipliée par la proportion w_1 , et une des vannes du second bras aval, de G_{nd_2} à G_n , est consignée à la valeur de ΔQ_{M_1} multipliée par la proportion w_2 . La répartition de l'écart de débit est identique lorsqu'une des vannes du second bras aval est sélectionnée en premier. Lorsque l'état de la ressource est non constant, une vanne de chacun des cours d'eau aval est sélectionnée pour absorber l'écart de débit qui leur parvient.

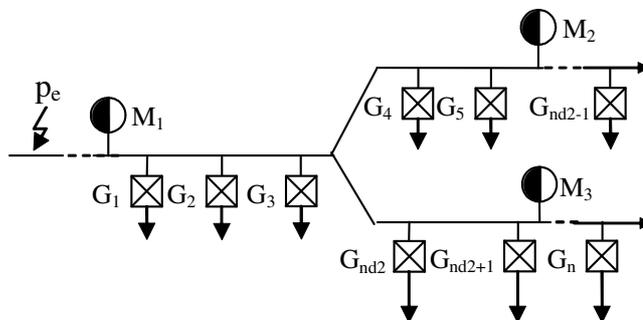


FIG. 2.19 – Cas d'une défluence.

La stratégie de supervision et d'accommodation hybride de la commande a été adaptée pour les configurations de cours d'eau avec confluence et défluence, à partir des méthodes développées pour le cas d'un cours d'eau composé d'un seul bras. Elle peut ainsi être utilisée de façon générique pour la valorisation des ressources des réseaux hydrographiques. Cependant, devant la complexité et la diversité de la morphologie des réseaux hydrographiques, les règles de répartition et d'affectation de la ressource ne peuvent pas être appliquées en l'état. Une représentation simple et générique des réseaux hydrographiques, nécessitant la numérotation des vannes et des points de mesure, est en effet difficile à générer. L'utilisation de la stratégie de conduite sur un réseau hydrographique nécessite alors une représentation des réseaux, qui permettra de savoir sur quelles branches et avec quelles proportions l'écart de débit mesuré au niveau d'un point de mesure sera réparti.

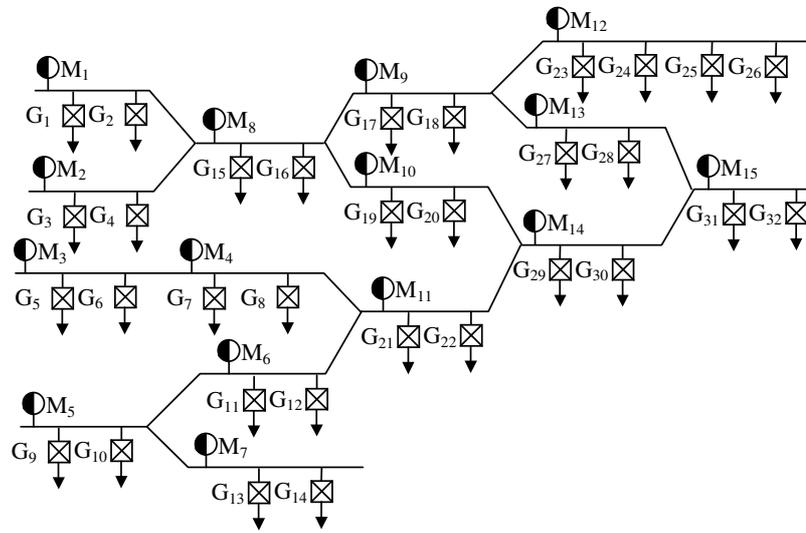


FIG. 2.20 – Réseau hydrographique composé de plusieurs défluents et confluent, et équipé de plusieurs points de mesure et de vannes.

Le réseau hydrographique représenté sur la figure 2.20 est composé de 4 confluent et de 4 défluents, et équipé de 15 points de mesure et de 32 vannes. L'indexage des vannes et des points de mesure est réalisé, dans cette représentation, selon une certaine logique qui ne permet pas l'utilisation des règles de répartition et d'affectation proposées précédemment. Afin de répartir l'écart de débit mesuré au point de mesure M_1 , il est nécessaire de savoir que ce cours d'eau alimente les vannes G_1 , G_2 , G_{15} et G_{16} selon une proportion égale à 1, les vannes de G_{15} à G_{20} et les vannes de G_{23} à G_{32} , selon des proportions qu'il est nécessaire de déterminer. L'expression générique des règles de répartition et d'affectation nécessiterait une représentation beaucoup plus complexe des réseaux hydrographiques avec la définition de noeuds de confluence et de défluence, la numérotation des vannes et des points de mesure de façon à connaître le chemin d'un point de mesure à une vanne et les proportions à prendre en compte. Il s'agit ici d'un problème structurel plutôt qu'un

problème de méthodologie.

Les fonctions utilisées pour la stratégie de supervision et d'accommodation hybride de la commande ont été décrites successivement et généralisées aux cas des confluent et des effluents. Nous proposons dans la section suivante une formalisation hybride de la stratégie de conduite.

2.10 Formalisation hybride de la stratégie de conduite

Nous définissons un automate hybride (HA) pour chaque capteur M_i du réseau. La figure 2.21 illustre le formalisme adopté. A chaque état de la ressource considéré est associé une action permettant la valorisation de la ressource en eau. Afin de prendre en compte tous les points de mesure équipant les canaux, il est possible d'adopter une représentation par automates hybrides concourants (cHA). Ce formalisme est basé sur les automates hybrides probabilisés concourants (cPHA) décrits au chapitre précédent. La description globale de la stratégie de conduite consiste à interconnecter tous les HA_{M_i} définis pour chaque point de mesure M_i . La représentation adoptée est illustrée sur la figure 2.22. Les vecteurs de répartition issus de chaque cHA sont transmis au bloc transmission afin de constituer la matrice de transmission \mathbf{u} .

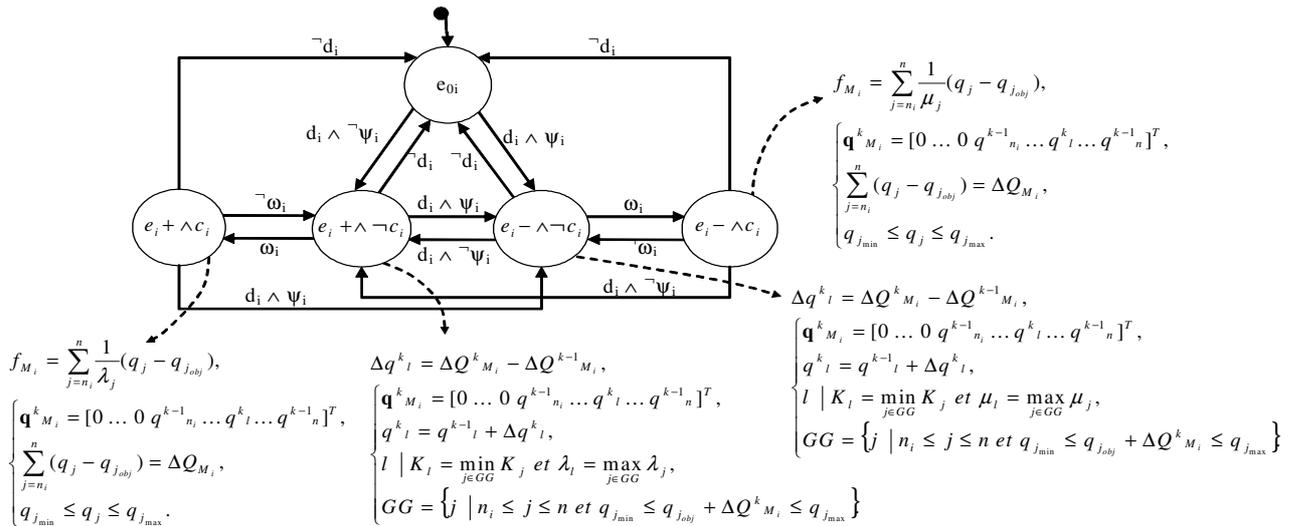


FIG. 2.21 – Formalisation hybride (HA_{M_i}) de la stratégie de conduite pour le point de mesure M_i .

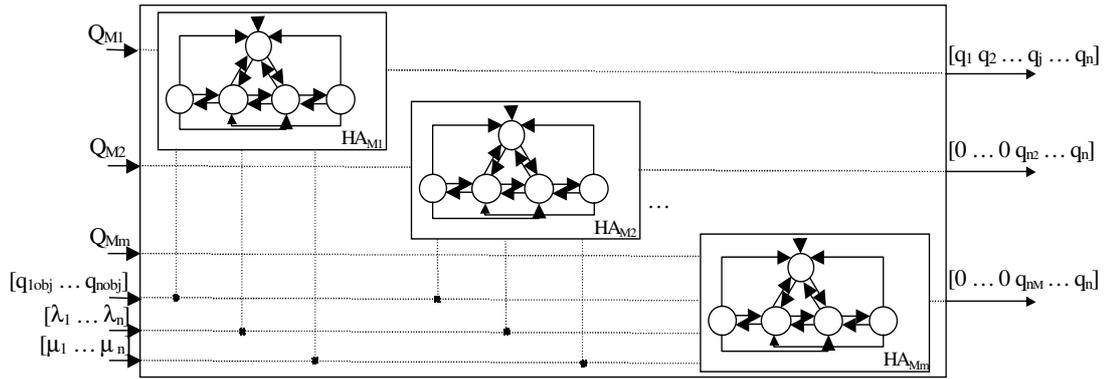


FIG. 2.22 – Formalisation hybride (cHA) de la stratégie de conduite.

Nous avons proposé une représentation hybride de la stratégie de conduite sous forme d'automates hybrides concourants. Cette représentation théorique permet une formalisation de la stratégie dans son ensemble. Cependant, elle présente l'inconvénient de ne pas être directement implantable car il n'existe pas d'outils permettant l'application directe des fonctions proposées. Cela nous a conduit à proposer une implantation modulaire de la stratégie de conduite.

2.11 Conclusion

La stratégie de conduite réactive proposée s'articule autour de la supervision concurrente des grandeurs et de l'accommodation hybride des commandes envoyées aux actionneurs équipant les systèmes étendus. La stratégie de supervision et d'accommodation de la commande a été adaptée pour la gestion des réseaux hydrographiques afin d'apporter une réponse aux problématiques de gestion de la ressource en eau en permettant une économie des excédents d'eau et une répartition équitable de la ressource disponible. La supervision de la ressource des réseaux hydrographiques est réalisée de manière concurrente au niveau de chaque capteur du réseau. Elle se compose d'une fonction de conditionnement pour l'obtention de données fiables, d'une fonction de détection permettant de déterminer l'instant où les objectifs de gestion ne sont plus atteints, et d'une fonction de diagnostic pour la détermination de l'état de la ressource. Le conditionnement des grandeurs mesurées fait essentiellement appel à des techniques de filtrage. Nous avons proposé deux techniques permettant la détection des écarts entre les valeurs attendues et les valeurs mesurées. La technique de détection par seuil fixe présente l'avantage d'être simple à utiliser. La technique de détection par saut de moyenne nécessite une étude préalable des signaux mesurés et des perturbations. Elle présente *a priori* l'avantage de limiter le taux de fausse alarme et les manques à la détection. La supervision de l'état de la ressource est réalisée grâce à des automates à états en considérant le niveau et la tendance des signaux mesurés.

L'accommodation hybride de la commande consiste en une répartition de la ressource disponible en tenant compte des règles d'arbitrage du gestionnaire. Elle est directement dépendante de l'état de la ressource diagnostiquée. L'affectation de la ressource permet de tenir compte des temps de transfert importants caractéristiques de la dynamique des réseaux hydrographiques. Les fonctions de répartition et d'affectation de la ressource présentées dans le cadre d'un cours d'eau composé d'un seul bras, sont adaptées aux autres composants élémentaires des réseaux hydrographiques, les confluent et les défluent. L'application des fonctions de répartition et d'affectation de la ressource dans le cadre d'un réseau hydrographique complexe composé de plusieurs confluent et défluent nécessite une étude préalable de la structure du réseau, afin de pouvoir utiliser les règles de répartition proposées.

Les fonctions composant les modules de la stratégie de conduite doivent être réglées afin de pouvoir évaluer notre stratégie sur des scénarios caractéristiques du fonctionnement des réseaux hydrographiques. Ce réglage et cette évaluation nécessitent un simulateur reproduisant le comportement des systèmes hydrauliques. Une approche de multimodélisation des réseaux hydrographiques fait l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 3

Multimodélisation des réseaux hydrographiques

3.1 Introduction

La problématique de valorisation de la ressource en eau des réseaux hydrographiques identifiée au premier chapitre peut être résolue par la proposition d'une stratégie de supervision et d'accommodation de la commande. L'implantation de la stratégie de conduite réactive requiert des réglages et évaluation préalables en tenant compte de la structure des réseaux hydrographiques et de leur dynamique. Selon les résultats obtenus en simulation, son implantation sur les systèmes hydrographiques réels pourra être envisagée. Ainsi, est-il indispensable d'évaluer la stratégie de conduite réactive par simulation en proposant différents scénarios de fonctionnements réels et de fonctionnements extrêmes. La démarche de réglage et d'évaluation par simulation est d'autant plus intéressante qu'elle est facilitée par la mise à disposition d'outils très performants en temps de calcul. Afin de réaliser le réglage de la stratégie de conduite réactive, nous devons cela disposer d'un modèle de la dynamique des réseaux hydrographiques.

Les réseaux hydrographiques ont été décrits au premier chapitre comme étant des systèmes dynamiques étendus composés de plusieurs systèmes hydrauliques interconnectés. Nous ne considérons que les systèmes hydrauliques à surface libre. Leur décomposition en biefs permet l'identification de leur dynamique à partir des équations de Saint-Venant présentées au chapitre 1. Ces dernières ne peuvent être résolues que par approches numériques. Cependant, il est possible d'utiliser un modèle plus simple : le modèle de l'onde diffusante obtenu à partir des équations de Saint-Venant grâce à la prise en compte d'hypothèses supplémentaires. L'utilisation de cette technique de modélisation restant encore complexe, une linéarisation du modèle de l'onde diffusante est alors préconisée. Elle conduit à une modélisation linéaire de la dynamique des systèmes hydrauliques autour d'un point de fonctionnement. Le modèle de l'onde diffusante et la technique de linéari-

sation autour d'un point de fonctionnement sont décrits dans la première partie de ce chapitre.

La simulation du comportement des systèmes hydrauliques à surface libre à partir des équations de Saint-Venant nécessite l'implantation de techniques numériques, ou l'acquisition de logiciels spécifiques proposés sur le marché. L'objectif de mon travail de thèse ne consistait pas en la proposition d'un nouveau logiciel de résolution des équations de Saint Venant. Nous avons cependant souhaité proposer une technique de modélisation simple des systèmes hydrauliques à surface libre dans le but de disposer d'un simulateur sans être contraint par l'achat d'un logiciel.

Afin d'obtenir une modélisation correcte de la totalité des plages de fonctionnement de la dynamique des systèmes hydrauliques, nous proposons, dans la deuxième partie, une approche de multimodélisation. Elle consiste à modéliser la dynamique de chacune des plages de fonctionnement à partir de la linéarisation du modèle de l'onde diffusante. Cette approche permet ainsi de limiter les erreurs de modélisation grâce à une fonction de sélection des modèles linéaires. Nous proposons trois approches de multimodélisation. La première est réalisée en considérant les débits, la seconde les temps de transfert et la dernière les coefficient de célérité. Dans la troisième partie, les trois approches sont comparées, sur l'exemple d'un bief de forme trapézoïdale.

Dans la quatrième partie du chapitre, nous utilisons l'approche selon le coefficient de célérité pour modéliser la dynamique d'une galerie à profil circulaire. Finalement, dans la sixième partie, l'approche de multimodélisation des systèmes à écoulement à surface libre est comparée à une approche utilisant les équations aux dérivées partielles (EDP) de Saint-Venant. Cette comparaison réalisée dans le cadre de la modélisation de la galerie à profil circulaire, permet de juger de l'efficacité de notre approche.

3.2 Modélisation des systèmes hydrauliques à surface libre

Les systèmes hydrauliques à surface libre sont composés de différents biefs caractérisés par un profil, une longueur et une pente. Leur dynamique est généralement modélisée par les EDP de Saint-Venant détaillée au chapitre 1 (3.1).

$$\begin{cases} \frac{\partial S(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial Q(x,t)}{\partial x} = q_l, \\ \frac{\partial Q(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2(x,t)}{S(x,t)} \right) + gS \frac{\partial z(x,t)}{\partial x} + gSJ = kq_l V. \end{cases} \quad (3.1)$$

La résolution analytique de ces dernières n'étant pas possible, des approches numériques selon des schémas de discrétisation, tels que le schéma de Preissmann [Chow *et al.*, 1988] ou le schéma implicite NewC [Kutija & Hewett, 2002] sont utilisées. Elles nécessitent la

connaissance de conditions limites à l'amont et à l'aval (relations reliant le débit Q au niveau z), ainsi que de conditions initiales sur les débits et les niveaux en tout point du système. La bonne représentation de la dynamique des systèmes hydrauliques lors de l'utilisation d'un schéma de discrétisation nécessite un choix adapté des pas de temps dt et d'espace dx [Malaterre, 1994]. Le choix est satisfaisant lorsque le nombre de Courant C_r (3.2) est proche de 1.

$$C_r = \frac{dt}{dx}(V + C), \quad (3.2)$$

avec $V = \frac{Q}{S}$, où V et C sont respectivement la vitesse et la célérité de l'écoulement. La valeur de ces coefficients dépend directement du débit Q . Il convient alors de sélectionner les pas de temps dt et d'espace dx pour chaque point de fonctionnement Q .

Les équations de Saint-Venant, assez complexes à mettre en œuvre, peuvent être simplifiées en considérant les hypothèses suivantes :

- les apports latéraux sont nuls, $q_l = 0$,

- les termes d'inertie sont négligeables devant les termes de pression, $\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q^2/S}{\partial x} \ll gS \frac{\partial z}{\partial x}$.

Le modèle non linéaire de l'onde diffusante ainsi obtenu est donné par :

$$\frac{\partial Q(x, t)}{\partial t} + C(Q, z, x) \frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} - D(Q, z, x) \frac{\partial^2 Q(x, t)}{\partial x^2} = 0, \quad (3.3)$$

où $Q(x, t)$ est le débit du bief [m^3/s], $C(Q, z, x)$ le coefficient de célérité [m/s] et $D(Q, z, x)$ le coefficient de diffusion [m^2/s].

Une méthode permettant l'identification des coefficients C et D supposés uniquement dépendant du débit Q , a été proposée [Litrico, 1999]. Les coefficients C et D sont recherchés sous la forme :

$$\begin{aligned} C(Q) &= \alpha_C Q^{\beta_C}, \\ D(Q) &= \alpha_D Q^{\beta_D}, \end{aligned} \quad (3.4)$$

où α_C , α_D , β_C , β_D sont des paramètres dynamiques identifiés à partir d'hydrogrammes réels.

Cette méthode d'identification conduit à l'obtention d'un modèle non-linéaire représentatif du comportement hydraulique. Son utilisation reste cependant assez complexe.

Les paramètres de ces deux méthodes de modélisation dépendent des points de fonctionnement. Partant de ce constat, la dynamique des biefs peut être représentée par des systèmes linéaires à paramètres variables (1.14). Il s'agit alors d'identifier les paramètres de modélisation et les retards. Pour des raisons de simplification, les systèmes linéaires à paramètres variables sont représentés par un ensemble de systèmes linéaires à retard constant correspondant aux différents points de fonctionnement pris en compte (1.6). Ces modèles peuvent être obtenus à partir de la linéarisation du modèle de l'onde diffusante autour de différents points de fonctionnement, en considérant les coefficients C et D constants et acceptables sur des plages de fonctionnement à définir. Une représentation de

la dynamique des réseaux hydrographiques par multi-modélisation doit donc être définie afin d'identifier la totalité de leur capacité de fonctionnement.

La démarche de multimodélisation que nous proposons est une alternative à l'utilisation d'approches numériques pour la résolution des équations de Saint-Venant. Elle consiste à décomposer la plage de fonctionnement des systèmes hydrauliques en plusieurs sous-domaines et de modéliser la dynamique de ces derniers par des modèles linéaires. L'intérêt de la multimodélisation est d'obtenir une série de modèles linéaires valables sur des plages de fonctionnement plus petites, et ainsi réduire l'erreur de modélisation. Les modèles linéaires sont obtenus à partir de la linéarisation du modèle de l'onde diffusante. Les coefficients $C(Q, z, x)$ et $D(Q, z, x)$ sont considérés constants, *i.e.* C_e et D_e . Cette hypothèse est vérifiée pour une plage de débit restreinte autour du débit de linéarisation Q_e . Ainsi, le modèle simplifié de l'onde diffusante est formulé par l'équation (3.5) à partir de q représentant les écarts de débits par rapport à Q_e , tels que $Q = Q_e + q$.

$$\frac{dq}{dt} + C_e \frac{dq}{dx} - D_e \frac{d^2q}{dx^2} = 0. \quad (3.5)$$

La linéarisation du modèle de l'onde diffusante a été employée dans la littérature afin de représenter, par un modèle unique, la dynamique des systèmes hydrauliques. Le point d'identification Q_e est sélectionné comme étant le débit correspondant au centre de la plage de fonctionnement du système hydraulique dans [Kosuth, 1994]. Considérant que le paramètre le plus significatif de la dynamique est le retard, le débit correspondant au centre de la plage des temps transfert a été choisi comme point d'identification du modèle dans [Litrico, 1999]. La linéarisation du modèle de l'onde diffusante conduit à une fonction de transfert d'ordre fini. L'ordre du modèle obtenu est déterminé à partir du coefficient adimensionnel C_M [Malaterre, 1994] :

$$C_M = \frac{2C_e X}{9D_e}, \quad (3.6)$$

où X représente la longueur du bief.

Ainsi, la caractérisation du comportement du bief est donnée par les règles suivantes [Georges & Litrico, 2002] :

- lorsque $1 < C_M$, le bief peut être modélisé par une fonction de transfert du second ordre avec retard, $F(s) = \frac{e^{-\tau s}}{1 + a_1 s + a_2 s^2}$
- lorsque $C_M \leq \frac{4}{9}$, le bief peut être modélisé par une fonction de transfert du premier ordre sans retard, $a_2 = 0$, $\tau = 0$,
- lorsque $\frac{4}{9} < C_M \leq 1$, le bief peut être modélisé par une fonction de transfert du premier ordre avec retard, $a_2 = 0$.

L'identification des paramètres a_1 , a_2 et τ est réalisée par la méthode des moments :

$$\begin{aligned} a_1 &= \left(-\frac{6XD_e^2}{C_e^5} + \sqrt{\frac{4X^2D_e^3}{C_e^9} \left(\frac{9D_e}{C_e} - 2X \right)} \right)^{\frac{1}{3}} + \left(-\frac{6XD_e^2}{C_e^5} - \sqrt{\frac{4X^2D_e^3}{C_e^9} \left(\frac{9D_e}{C_e} - 2X \right)} \right)^{\frac{1}{3}}, \\ a_2 &= \frac{2XD_e}{C_e^3} \left(1 - \frac{3D_e}{a_1 C_e^2} \right), \\ \tau &= \frac{X}{C_e} - a_1. \end{aligned} \tag{3.7}$$

Les coefficients C_e et D_e sont directement dépendants des paramètres géométriques du bief (largeur du miroir L , pente de frottement J , etc.), et du débit de linéarisation Q_e :

$$\begin{aligned} C_e &= \frac{1}{L^2 \frac{\partial J}{\partial Q_e}} \left[\frac{\partial L}{\partial x} - \frac{\partial JL}{\partial z} \right], \\ D_e &= \frac{1}{L \frac{\partial J}{\partial Q_e}}. \end{aligned} \tag{3.8}$$

La démarche de multimodélisation nécessite la décomposition du domaine d'évolution possible des systèmes hydrauliques en sous-domaines de fonctionnement. Afin de limiter le nombre de sous-domaines considérés, nous proposons trois approches de multimodélisation selon des critères représentatifs de la dynamique des systèmes hydrauliques. Elles sont présentées dans la section suivante.

3.3 Multimodélisation des systèmes hydrauliques à surface libre

L'approche de multimodélisation qui semble la plus intuitive consiste à considérer les débits. La décomposition est réalisée selon un pas de débit qui peut être choisi qualitativement ou calculé en fonction du nombre de modèles souhaités. Lorsque le nombre N_m de modèles souhaités est connu, le pas de débit Δq est obtenu selon la relation suivante :

$$\Delta q = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{N_m}, \tag{3.9}$$

où le débit Q_{\max} est le point de fonctionnement du système hydraulique avant débordement, et le Q_{\min} le débit critique d'un cours d'eau.

Ainsi, la plage de fonctionnement d'un bief est décomposée en sous-domaines dont les plages de validité sont de taille identique, égale au pas de débit Δq . La dynamique de chaque sous-domaine doit ensuite être modélisée en considérant le point de fonctionnement

correspondant au débit moyen de chaque sous-domaine q_{id_r} selon l'algorithme suivant :

Algorithme de détermination des sous domaines de fonctionnement selon les débits :

Entrées : le nombre de modèles souhaités N_m , les débits de fonctionnement minimal Q_{\min} et maximal Q_{\max} , le pas de débit Δq .

Sorties : les débits q_{id_r} correspondant au centre du sous-domaine r , les bornes inférieures q_{\inf_r} et supérieures q_{\sup_r} des sous domaines de fonctionnement.

Pour r allant de 1 à N_m

$$q_{id_r} = Q_{\min} + \left(r - \frac{1}{2}\right)\Delta q$$

$$q_{\sup_r} = Q_{\min} + r\Delta q$$

$$q_{\inf_r} = Q_{\min} + (r - 1)\Delta q$$

FinPour

(3.10)

Le modèle r , identifié par une fonction de transfert pour le débit q_{id_r} à partir des relations 3.7 et 3.8, est considéré comme valable sur le sous-domaine $[q_{\inf_r} ; q_{\sup_r}]$.

Une seconde approche de multimodélisation consiste à déterminer les sous-domaines de fonctionnement en tenant compte des coefficients des fonctions de transfert (3.7), à savoir a_1 , a_2 ainsi que du retard τ . Nous considérons que τ est le coefficient le plus représentatif de la dynamique des cours d'eau. Sa prise en compte conduit à une expression plus explicite de l'erreur de modélisation que celle issue de la considération de a_1 ou a_2 . Cette hypothèse est également considérée dans [Litrico, 1999]. Nous proposons donc de considérer τ lors de la multimodélisation. Une dernière approche consiste à prendre en compte un des paramètres liés à la dynamique des écoulements à surface libre, à savoir le coefficient C ou le coefficient D . Le coefficient C correspondant à la vitesse du flux est une grandeur plus représentative qualitativement de la dynamique d'écoulement que le coefficient D . Nous proposons donc de considérer le coefficient C lors de la multimodélisation.

Un modèle est considéré comme valable tant que l'erreur sur le coefficient x pris en compte ne dépasse pas un certain pourcentage Π_x , *i.e.* Π_c pour le coefficient de célérité C et Π_τ pour le retard τ . La démarche conduisant à la détermination des sous-domaines de fonctionnement est décrite dans un cadre générique. Afin d'obtenir des sous-domaines de taille identique, y compris aux extrémités du domaine d'évolution possible des systèmes hydrauliques, la décomposition est réalisée à partir de le milieu du coefficient considéré soit x_{med} . Ce dernier est calculé à partir du coefficient minimum x_{\min} correspondant aux débit minimum Q_{\min} , et du coefficient maximum x_{\max} correspondant aux débit maximum Q_{\max} , selon la relation (3.11). Les sous-domaines de fonctionnement sont déterminés selon l'algorithme (3.12).

$$x_{med} = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}. \quad (3.11)$$

Algorithme de détermination des sous domaines de fonctionnement selon un coefficient x :

Entrées : les coefficients minimum x_{\min} , maximum x_{\max} et moyen x_{med} , le pourcentage d'erreur tolérée Π_x .

Sorties : les coefficients x_{id_r} correspondant au centre du sous-domaine r , les bornes inférieures x_{inf_r} et supérieures x_{sup_r} des sous domaines de fonctionnement.

$r = 1$

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{Pour } i \text{ allant de } \left\lfloor \begin{array}{l} \sup \left(\frac{\ln \frac{x_{\min}}{x_{med}}}{\ln \frac{1 + \Pi_x}{1 - \Pi_x}} \right) \\ \inf \left(\frac{\ln \frac{x_{\max}}{x_{med}}}{\ln \frac{1 + \Pi_x}{1 - \Pi_x}} \right) \end{array} \right\rfloor \text{ à } \left\lfloor \begin{array}{l} \sup \left(\frac{\ln \frac{x_{\min}}{x_{med}}}{\ln \frac{1 + \Pi_x}{1 - \Pi_x}} \right) \\ \inf \left(\frac{\ln \frac{x_{\max}}{x_{med}}}{\ln \frac{1 + \Pi_x}{1 - \Pi_x}} \right) \end{array} \right\rfloor \\
 x_{id_r} = \left(\frac{1 + \Pi_x}{1 - \Pi_x} \right)^i x_{med} \\
 x_{sup_r} = (1 + \Pi_x) \left(\frac{1 + \Pi_x}{1 - \Pi_x} \right)^i x_{med} \\
 x_{inf_r} = (1 - \Pi_x) \left(\frac{1 + \Pi_x}{1 - \Pi_x} \right)^i x_{med} \\
 r + + \\
 \text{FinPour}
 \end{array} \right\} \quad (3.12)$$

Une tolérance sur l'erreur des temps de transfert de $\Pi_r = 15$ % est acceptable compte tenu de la dynamique lente des cours d'eau. Un choix du pourcentage d'erreur Π_c de l'ordre de 10 % conduit à une erreur acceptable sur les coefficients des modèles identifiés.

Les hauteurs d'eau z_{id_r} de chaque sous-domaine r sont calculées en fonction des points de fonctionnement x_{id_r} , afin d'identifier les paramètres des modèles. Une relation entre le retard τ et le niveau d'eau z (3.13) est obtenue à partir des fonctions $C = f(Q)$, $D = g(Q)$ détaillées dans l'annexe 1, et de la relation de Manning-Strickler (1.20).

$$\tau_{id} = \frac{X}{C_{id}} - \left[\left(-\frac{6XD_{id}^2}{C_{id}^5} + \sqrt{\frac{4X^2D_{id}^3}{C_{id}^9} \left(\frac{9D_{id}}{C_{id}} - 2X \right)} \right)^{\frac{1}{3}} + \left(-\frac{6XD_{id}^2}{C_{id}^5} - \sqrt{\frac{4X^2D_{id}^3}{C_{id}^9} \left(\frac{9D_{id}}{C_{id}} - 2X \right)} \right)^{\frac{1}{3}} \right], \quad (3.13)$$

où les paramètres C_{id} et D_{id} sont exprimés, selon la géométrie du cours d'eau, en fonction de z_{id} . Une seconde relation entre la célérité et le niveau d'eau z (3.14) est obtenue à partir de la fonction $C = f(Q)$ détaillée dans l'annexe 1 et de la relation de Manning-Strickler.

$$C_{id} = \frac{\sqrt{JS}^{\frac{5}{3}}}{nP^{\frac{2}{3}}L^2} \left[-\frac{1}{2} \frac{\partial L}{\partial z} - \frac{L}{3P} \left(2 \frac{\partial P}{\partial z} - 5 \frac{P}{S} \frac{\partial S}{\partial z} \right) \right], \quad (3.14)$$

où L , P et S sont exprimés, selon la géométrie du cours d'eau, en fonction de z_{id} .

Les équations (3.13) et (3.14) sont ensuite résolues numériquement par la méthode des moindres carrés, avec une précision d'un millimètre. La détermination des hauteurs d'eau z_{id_r} permet de calculer les débits Q_{id_r} selon la relation (1.20), les coefficients de célérité C_{id_r} et de diffusion D_{id_r} (3.8), ainsi que les coefficients des fonctions de transfert a_1 et

a_2 , modélisant la dynamique de chaque sous-domaine (3.7). Les paramètres $x_{\text{inf},r}$ et $x_{\text{sup},r}$ correspondant aux bornes de validité des modèles identifiés conduisent à la détermination des intervalles de validité des sous-domaines de fonctionnement, définis par la plage de débit $[Q_{\text{inf},r} ; Q_{\text{sup},r}]$. Nous souhaitons maintenant comparer les différentes approches de multimodélisation proposées.

3.4 Comparaison des algorithmes de multimodélisation

Dans la partie précédente, nous avons proposé une démarche de multimodélisation des biefs des systèmes hydrauliques à surface libre qui consiste à partitionner leur plage de fonctionnement en sous-domaines. La génération des sous-domaines de fonctionnement est réalisée selon trois approches décrites sous la forme d’algorithme. Dans le but de mieux percevoir les avantages et les inconvénients de chacune des trois approches de multimodélisation, elles sont comparées sur l’exemple d’un bief d’un système hydraulique de forme trapézoïdale (figure 3.1). Les caractéristiques physiques du cours d’eau sont données dans le tableau (3.1).

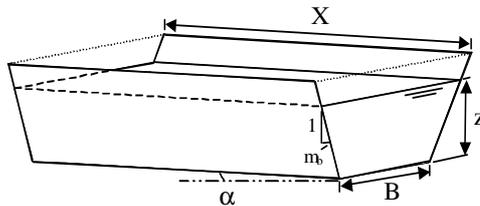


FIG. 3.1 – Système hydraulique à profil trapézoïdal.

Paramètre	Valeur
B [m]	2,85
m_b	0,99
X [m]	1732
n_M	0,02
α	0,13 %
Q_{min} [m^3/s]	1
Q_{max} [m^3/s]	10

TAB. 3.1 – Paramètres physiques du cours d’eau.

Avant de réaliser la multimodélisation du système considéré, il est nécessaire de déterminer l'expression des coefficients de célérité C_e et de diffusion D_e pour un bief à profil trapézoïdal. Les expressions des coefficient C_e et D_e dont le détail des calculs est fourni en Annexe 1, sont obtenus à partir de la relation (3.8).

$$\begin{aligned} C_e &= \frac{Q_e}{L^2} \left[-m_b + \frac{L}{3} \left(\frac{2B}{Pz} + \frac{5L}{S} - \frac{2}{z} \right) \right], \\ D_e &= \frac{Q_e}{2LJ}, \end{aligned} \quad (3.15)$$

avec :

- $L = B + 2m_b z$,
- $S = (B + m_b z)z$,
- $P = B + 2z\sqrt{1 + m_b^2}$.

Le niveau de l'eau z est calculé à partir de la formule de Manning-Strickler (1.20) selon le débit Q_e . Une expression simple de z en fonction des autres paramètres ne peut pas être obtenue compte tenu de la forme des paramètres P et S . La démarche retenue consiste alors à résoudre numériquement l'équation de Manning-Strickler. Pour cela, nous avons utilisé la méthode de résolution par moindres carrés, en spécifiant une précision de la solution de l'ordre du millimètre (3.16).

$$\ln \left(\frac{J}{Q_e^2 n_M^2} \right) - \left(\frac{4}{3} \right) \ln P + \left(\frac{10}{3} \right) \ln S = 0. \quad (3.16)$$

Maintenant que l'expression des coefficients C_e et D_e pour un bief à profil trapézoïdal est connue, il est possible de modéliser le système.

L'approche de multimodélisation selon les débits Q conduit à la proposition de trois sous-domaines de fonctionnement de taille identique avec un pas de débit Δq correspondant à $3 \text{ m}^3/\text{s}$ (3.9). Ce pas de débit est jugé satisfaisant *a priori*, compte tenu de la plage de fonctionnement du système, $Q \in [1; 10]$. L'application de l'algorithme (3.10) conduit à la définition de trois sous-domaines de fonctionnement ainsi que des débits q_{id_r} correspondant au centre des sous-domaines considérés (tableau 3.2). Par la suite, les niveaux d'eau z correspondant aux débits q_{id_r} sont déterminés à partir de la relation (3.16). Les valeurs des coefficients C_e et D_e sont ensuite déterminées selon la relation (3.15). Finalement, les paramètres des fonctions de transfert sont calculés selon la relation (3.7). Les paramètres identifiés pour chaque sous-domaine sont présentés dans le tableau 3.2.

L'approche de multimodélisation selon le retard τ consiste à décomposer la plage de fonctionnement du bief en considérant un pourcentage d'erreur sur le retard de $\Pi_\tau = 15$ %. Sachant que le temps de transfert maximal du système considéré est de 653 s , soit $10 \text{ min } 53 \text{ s}$, le choix de Π_τ permet de garantir une erreur sur les temps de transfert inférieure à 100 s , soit $1 \text{ min } 30 \text{ s}$. Ce choix est donc tout à fait acceptable. L'utilisation de l'algorithme (3.12) conduit à l'identification de quatre domaines de validité ainsi qu'aux coefficients τ_{id_r} correspondant au centre de chaque sous-domaine r . Les niveaux d'eau z

Q [m^3/s]	Plage considérée [m^3/s]	z [mm]	C [m/s]	D [m^2/s]	a_1	a_2	τ [s]
2,5	[1 ; 4[	646	1,5	233	740	144340	446
4,5	[4 ; 7[	1017	1,7	435	719	114560	278
8,5	[7 ; 10]	1297	1,9	603	682	81066	228

TAB. 3.2 – Paramètres de niveau z , de célérité C et de diffusion D calculés selon les débits Q et paramètres des modèles a_1 , a_2 et τ pour les plages considérées.

correspondant aux coefficients τ_{id_r} sont ensuite déterminés par la résolution de l'équation (3.13). La démarche de calcul des valeurs des débits, des sous-domaines de fonctionnement, des coefficients de célérité et de diffusion est identique à celle présentée précédemment. Elle fait appel aux relations (1.20) pour les débits et (3.15) pour les coefficients C_e et D_e . Finalement, les paramètres des fonctions de transfert sont calculés selon la relation (3.7). Les paramètres identifiés pour chaque sous-domaine sont présentés dans le tableau 3.3.

Q [m^3/s]	Plage considérée [m^3/s]	z [mm]	C [m/s]	D [m^2/s]	a_1	a_2	τ [s]
1,3	[1 ; 1,7[	434	1,2	132	743	156410	653
2,2	[1,7 ; 2,9[	597	1,4	208	741	147340	482
3,6	[2,9 ; 4,8[	802	1,6	315	734	133460	357
6,1	[4,8 ; 10]	1076	1,8	469	713	108470	264

TAB. 3.3 – Paramètres de niveau z , de célérité C et de diffusion D calculés selon les retards τ et paramètres des modèles a_1 , a_2 et τ pour les plages considérées.

Finalement, l'approche de multimodélisation selon le coefficient de célérité C consiste à décomposer la plage de fonctionnement en acceptant un pourcentage d'erreur sur le coefficient de célérité de $\Pi_C = 10$ %. Le choix de Π_C est satisfaisant *a priori* compte tenu des hypothèses considérées lors de la linéarisation du modèle de l'onde diffusante. L'utilisation de l'algorithme (3.12) permet l'identification de trois domaines de validité ainsi que les coefficients correspondant au centre de chaque sous-domaine r . Les niveaux d'eau z correspondant aux coefficients C_{id_r} sont ensuite déterminés par la résolution de l'équation (3.14). Par la suite, les valeurs des débits ainsi que les sous-domaines de fonctionnement sont calculés selon la relation (1.20). Les coefficients de diffusion sont déterminés selon la relation (3.15). De la même façon que précédemment, les paramètres des fonctions de transfert sont calculés selon la relation (3.7). Les paramètres identifiés pour chaque sous-domaine sont présentés dans le tableau 3.4.

Afin de juger de l'efficacité des approches proposées, nous avons dans un premier temps déterminé les valeurs des paramètres de modélisation a_1 , a_2 et τ pour chaque débit de la plage de fonctionnement, *i.e.* [1, 10], avec un pas de 1 m^3/s . La démarche de calcul des

Q [m^3/s]	Plage considérée [m^3/s]	z [mm]	C [m/s]	D [m^2/s]	a_1	a_2	τ [s]
1, 5	[1 ; 2, 2[	469	1, 3	148	742	154520	608
3, 4	[2, 2 ; 5, 3[	775	1, 6	300	736	135470	369
8, 7	[5, 3 ; 10]	1320	1, 9	617	678	77690	226

TAB. 3.4 – Paramètres de niveau z , de célérité C et de diffusion D calculés selon les coefficients de célérité C et paramètres des modèles a_1 , a_2 et τ pour les plages considérées.

paramètres est identique à celle décrite lors de la multimodélisation selon les débits. Les valeurs des paramètres de modélisation pour chaque débit sont représentés sur la figure 3.2 par des points. Les trois approches de multimodélisation conduisent à trois décompositions différentes de la plage de fonctionnement du système. Les plages considérées Ω des paramètres identifiés a_1 , a_2 et τ pour chaque sous-domaine de fonctionnement sont déterminées et représentés sur la figure 3.2. Les résultats obtenus lors de la multimodélisation selon les débits figurent en trait pointillé (...), ceux obtenus lors de la multimodélisation selon les temps de transfert en trait continu (—), et ceux issus de la multimodélisation selon les coefficients de célérité sont tracés en trait discontinu (- - -).

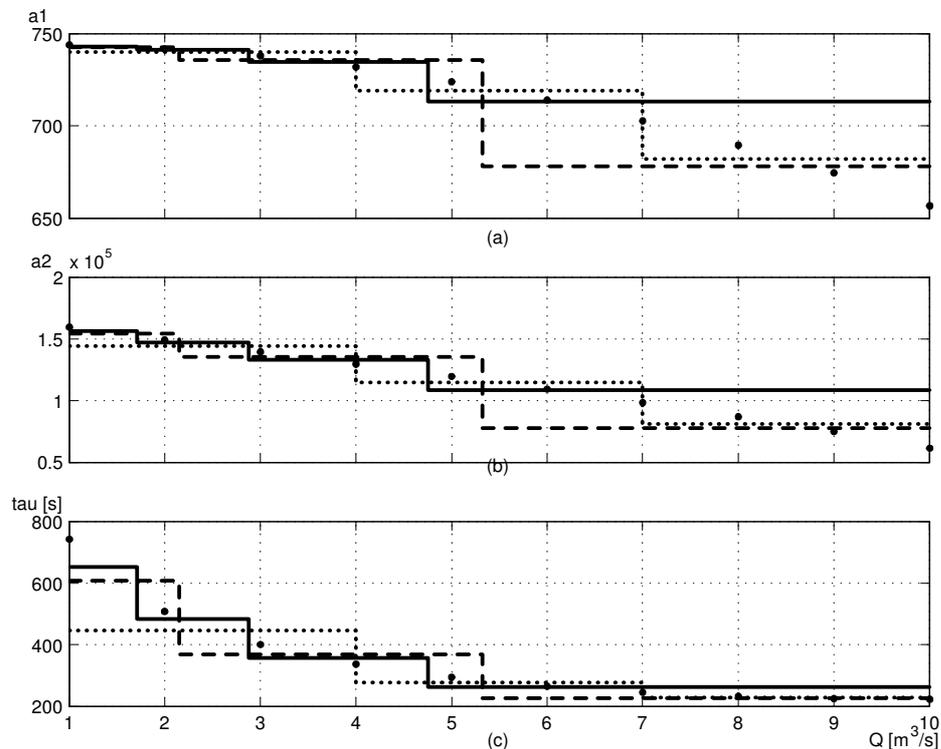


FIG. 3.2 – Variation des paramètres identifiés (a) a_1 , (b) a_2 et (c) τ selon les plages considérées dans les trois approches de multimodélisation.

Dans un second temps, les domaines de variation Ω de chaque paramètre pour tous les sous-domaines identifiés sont déterminés (tableau 3.5). Ils permettent de calculer les pourcentages d'erreur maximum Er_{\max} pour tous les paramètres par sous-domaine, en considérant les bornes du sous-domaine et la valeur du paramètre identifié.

	a_1	Ω_{a_1}	Er_{\max}	a_2 (e^3)	Ω_{a_2} (e^3)	Er_{\max}	τ [s]	Ω_τ	Er_{\max}
Approche selon Q	740	[744; 732[	1 %	144	[159; 129[	11 %	446	[742; 336[	66 %
	719	[732; 702[	2, 5 %	115	[129; 98[	16 %	278	[336; 245[	21 %
	682	[702; 657]	4 %	81	[98; 61]	32 %	228	[245; 223]	7, 5 %
Approche selon τ	743	[744; 742[	0, 1 %	156	[159; 152[	3 %	653	[742; 555[	17 %
	741	[742; 738[	0, 5 %	147	[152; 141[	5 %	482	[555; 415[	15 %
	734	[738; 725[	1 %	133	[141; 122[	9 %	357	[415; 307[	15 %
	713	[725; 657]	8, 5 %	108	[122; 61]	77 %	264	[307; 223]	18 %
Approche selon C	742	[744; 741[	0, 3 %	155	[159; 148[	5 %	608	[742; 487[	25 %
	736	[741; 721[	2 %	135	[148; 116[	16 %	369	[487; 284[	32 %
	678	[721; 657]	6 %	78	[116; 61]	50 %	226	[284; 223]	26 %

TAB. 3.5 – Erreurs d'identification Er_{\max} des paramètres des modèles a_1 , a_2 et τ selon les domaines de variation Ω_{a_1} , Ω_{a_2} et Ω_τ pour les multimodélisations en débit, en retard et en célérité.

Les résultats obtenus et présentés sur la figure 3.2 et dans le tableau 3.5 permettent de juger de l'efficacité des approches de multimodélisation. Les sous-domaines obtenus en considérant l'approche selon les débits correspondent à des plages de débit de taille identique. Cependant, cette approche conduit à des erreurs importantes sur le temps de transfert τ pour les débits inférieurs à $5 m^3/s$, et sur les paramètres a_1 et a_2 pour les débits supérieurs à $5 m^3/s$. La différence entre le temps de transfert identifié pour la plage de débit située entre $1 m^3/s$ et $4 m^3/s$ et les temps de transfert calculés pour les débits de $1 m^3/s$ et de $4 m^3/s$ correspond à un pourcentage d'erreur de 66 %. D'autre part, les différences sur les paramètres a_1 et a_2 identifiés pour les plages de débit situées entre $7 m^3/s$ et $10 m^3/s$ et les paramètres calculés pour les débits de $7 m^3/s$ et de $10 m^3/s$ correspondent à des pourcentages d'erreur respectifs de 4 % et de 32 %. L'erreur sur le temps de transfert τ est beaucoup trop importante, et les plages de validité des sous-domaines sont très différentes pour chaque paramètre d'identification.

Les deux autres approches de multimodélisation conduisent à l'obtention de sous-domaines de tailles assez similaires pour chaque paramètre d'identification. Ces approches permettent un découpage plus fin de la plage de fonctionnement pour les débits inférieurs à $5 m^3/s$, mais provoquent des erreurs importantes sur les paramètres a_1 et a_2 pour les débits supérieurs à $5 m^3/s$. L'approche de multimodélisation selon les temps de transfert

permet de conserver l'erreur sur la plage de validité du paramètre τ au alentour de 15 %. Cependant, les erreurs sur les paramètres a_1 et a_2 , respectivement de 8,5 % et de 77 % pour les débits les plus grands, sont trop importantes. L'approche de multimodélisation selon les coefficients de célérité C conduit à une erreur de 50 % sur le paramètre a_2 pour le sous-domaine correspondant aux débits maximums, ainsi qu'à des erreurs aux alentours de 30 % sur le paramètre τ .

Bien que l'approche selon les débits Q présente l'avantage d'être facilement utilisable, elle rencontre une difficulté due à l'absence d'indicateur permettant de savoir si le choix du nombre de modèle N_m ou si le choix du pas de débit Δq sont judicieux ou non. L'approche selon le retard τ présente l'avantage d'être basée sur le paramètre le plus significatif de la dynamique des systèmes d'écoulement à surface libre. Le pourcentage d'erreur tolérée sur les sous-domaines de fonctionnement est également plus facile à sélectionner qualitativement. Cependant, elle ne permet pas de générer des sous-domaines de fonctionnement dont l'erreur sur les paramètres a_1 et a_2 est semblable. Finalement l'approche selon le coefficient de célérité C , présente l'avantage d'être basée sur un critère représentatif de la dynamique des systèmes hydrauliques. De plus, elle conduit à la détermination de sous-domaines de fonctionnement dont l'erreur sur les paramètres τ , a_1 et a_2 est sensiblement égale. Cette approche de modélisation est donc la plus appropriée pour l'identification de la dynamique des systèmes hydrauliques à surface libre.

Nous préconisons l'approche de multimodélisation selon le coefficient de célérité C pour la multimodélisation de la dynamique des systèmes hydrauliques à surface libre. Cette approche présente également l'avantage de pouvoir modéliser les biefs de petites dimensions, pour lesquels les temps de transfert ne sont pas toujours identifiables par le calcul. Par ailleurs, la réduction de l'erreur sur les paramètres d'identification peut être réalisée en réduisant le pourcentage d'erreur Π_C . Afin de valider notre démarche de multimodélisation, nous proposons d'identifier la dynamique d'une galerie circulaire fermée.

3.5 Multimodélisation d'une galerie à profil circulaire

Le barrage de la Gimone situé dans la région Midi-Pyrénées dans le sud-ouest de la France alimente deux rivières, la Gimone et la Save. L'alimentation de la Save est réalisée grâce à une galerie circulaire de près d'un kilomètre de long. Le débit d'alimentation de la galerie est contrôlé grâce à une vanne de type jet creux G_1 située à hauteur du barrage, et régulé localement à partir d'un capteur de niveau M_1 situé à la sortie de la galerie (figure 3.3).

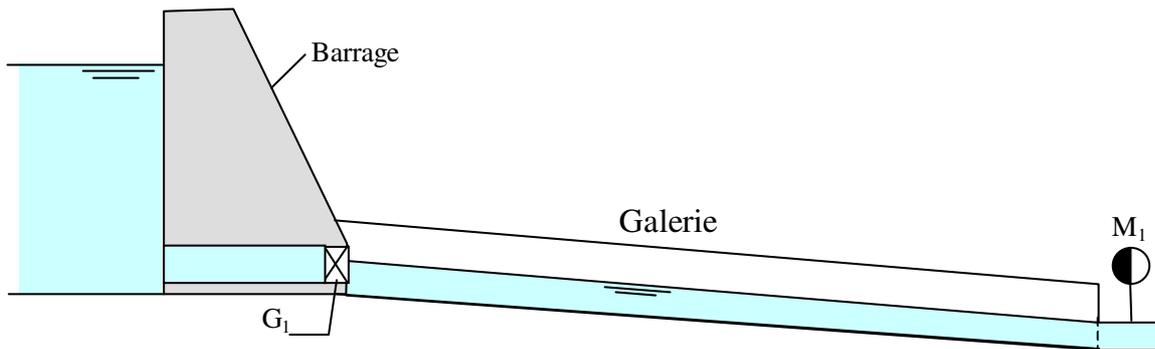


FIG. 3.3 – Barrage et galerie alimentant la rivière Save.

D'après [Kovacs, 1988], une galerie circulaire est un système hydraulique à surface libre tant que la hauteur d'eau dans la galerie pour son débit de fonctionnement maximum est inférieur à 1,87 fois son rayon R . Nous considérons la galerie comme un système hydraulique à surface libre puisque son débit de fonctionnement maximal de $5 \text{ m}^3/\text{s}$ correspond à une hauteur d'eau inférieure à 1,87 fois son rayon R . La dynamique de la galerie peut alors être identifiée à l'aide de l'approche de multimodélisation présentée précédemment. Pour cela, il est nécessaire de connaître les caractéristiques physiques de la galerie. La galerie a une longueur X de $946,65 \text{ m}$, un rayon R de $0,9 \text{ m}$ et une pente i_g de $0,26\%$ (figure 3.4). La galerie étant entièrement bétonnée, son coefficient de Strickler est estimé à 70. La plage de fonctionnement de la galerie est comprise entre $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ et $5 \text{ m}^3/\text{s}$. Le débit de la galerie est connu en entrée et en sortie. Elle peut donc être assimilée à un bief et modélisée dans son ensemble.

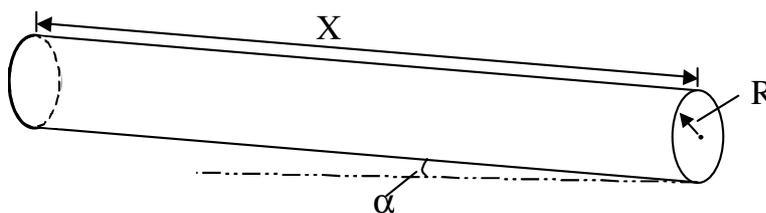


FIG. 3.4 – Caractéristiques physiques de la galerie Lunax-Save.

De la même façon que pour le bief de forme trapézoïdal présenté dans la section précédente, il est nécessaire, avant de réaliser la multimodélisation de la galerie, de déterminer l'expression des coefficients de célérité C_e et de diffusion D_e pour un bief à profil circulaire (figure 3.5).

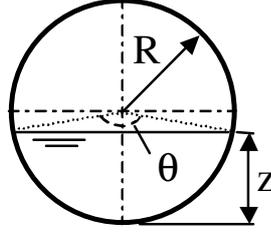


FIG. 3.5 – Caractéristiques définissant un profil circulaire.

Dans le cas d'un profil circulaire, l'expression des coefficients C_e et D_e , obtenus à partir de la relation (3.8), sont donnés par la relation (3.17) (le détail des calculs est fourni en Annexe 1).

$$\begin{aligned} C_e &= \frac{Q_e}{L^2} \left[-\frac{2(R-z)}{L} + \frac{1}{3P} \left[5\frac{P}{S} \left(\frac{L^2}{2} + 4Rz - 2z^2 \right) - 8R \right] \right], \\ D_e &= \frac{Q_e}{2LJ}, \end{aligned} \quad (3.17)$$

avec :

- $L = 2\sqrt{2Rz - z^2}$,
- $S = \frac{R^2}{2}(\theta - \sin \theta)$,
- $P = R\theta$,
- $\theta = 2 \cos^{-1} \left(\frac{R-z}{R} \right)$.

Le niveau de l'eau z est calculé à partir de la formule de Manning-Strickler (1.22) selon le débit Q_e en résolvant par la méthode de résolution par moindres carrés l'équation (3.16). Les coefficients C_e et D_e pour un bief à profil circulaire peuvent maintenant être calculés.

La méthode de multimodélisation nécessite un découpage de la plage de fonctionnement du système dynamique. La partition de la plage de fonctionnement peut être réalisée suivant différents critères significatifs de la dynamique du système qui sont dans ce cas le débit Q , la célérité C ou le temps de transfert τ . Nous avons montré dans la partie précédente que l'approche de multimodélisation préconisée était celle utilisant le coefficient de célérité C . En considérant des sous-domaines de la plage de fonctionnement où l'erreur sur le coefficient de célérité est de l'ordre de 10 %, la méthode de multimodélisation nous conduit à quatre sous-domaines dont les paramètres d'identification ainsi que les plages de validité sont donnés dans le tableau 3.6. Les erreurs maximales de la célérité sur les sous-domaines de fonctionnement sont également calculées. Elles sont de l'ordre de 10 %, et atteignent 13 % pour les sous-domaines correspondant aux extremums des points de fonctionnement du système.

Les points de fonctionnement calculés à partir du coefficient de célérité C permettent de déterminer les niveaux d'eau z correspondant, puis les débits de fonctionnement q , et

Point d'identification C_e [m/s]	Domaine de validité	Erreur maximale
1,9	[1,7 ; 2,1[	12 %
2,3	[2,1 ; 2.5[	9 %
2,8	[2,6 ; 3,1[	10 %
3,5	[3,1 ; 3.9[	13 %

TAB. 3.6 – Coefficient de célérité C_e correspondant au point de fonctionnement du sous-domaine i de fonctionnement.

enfin les coefficients de diffusion D . Finalement, chaque dynamique des sous-domaines est modélisée par une fonction de transfert à partir de la simplification du modèle de l'onde diffusante (3.7). Les hauteurs d'eau z , les coefficients de célérité C et de diffusion D déterminés pour chaque sous-domaine sont présentés sur la figure 3.6. Afin de juger de l'efficacité de la multimodélisation, nous avons déterminé les valeurs des paramètres de modélisation C , z et D pour chaque débit de la plage de fonctionnement, *i.e.* [1, 5], avec un pas de calcul de $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Les valeurs des paramètres de modélisation sont représentés sur la figure 3.6 par des points. Les paramètres des fonctions de transfert sont présentés sur la figure 3.7. Les valeurs des paramètres a_1 , a_2 et τ calculés de manière identique sont représentés par des points sur la figure 3.7. La plage de validité des sous-domaines de modélisation, ainsi que les valeurs des coefficients et paramètres de modélisation correspondants sont regroupés dans le tableau 3.7.

Plage de validité [m^3/s]	q [m^3/s]	C_e [m/s]	D_e [m^2/s]	a_1	a_2	τ [s]
[0,5 ; 1[	0,75	1,9	92	245	17355	252
[1 ; 2[	1,5	2,3	164	234	15049	172
[2 ; 3,5[	2,8	2,8	300	222	12310	110
[3,5 ; 5]	4,4	3,4	207	199	8396	73

TAB. 3.7 – Paramètres identifiés correspondant aux sous-domaines de fonctionnement.

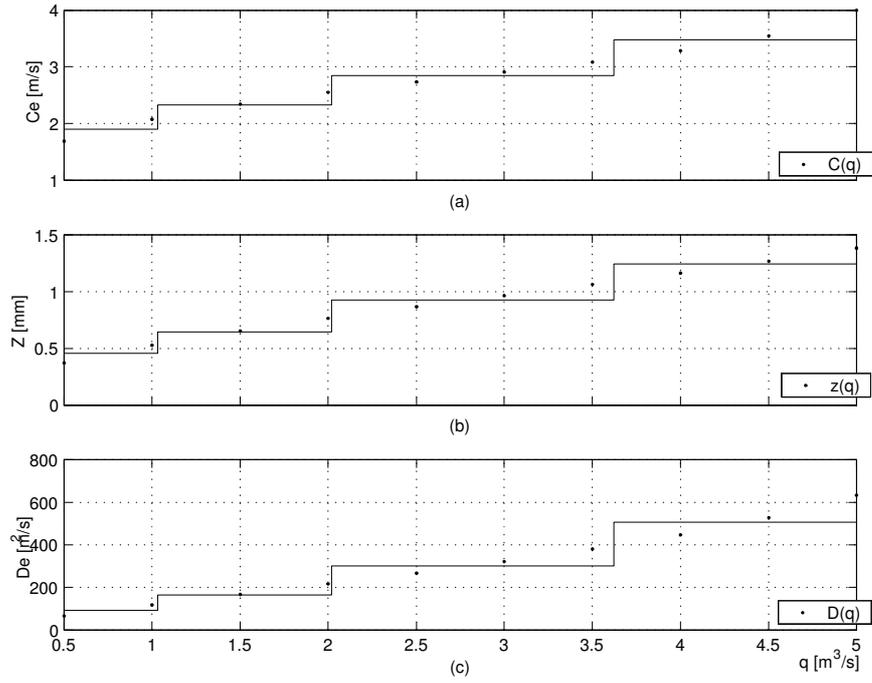


FIG. 3.6 – Détermination (a) des coefficients de célérité C_e , (b) des niveaux d'eau z et (c) des coefficients de diffusion D_e pour chaque sous-domaine de modélisation.

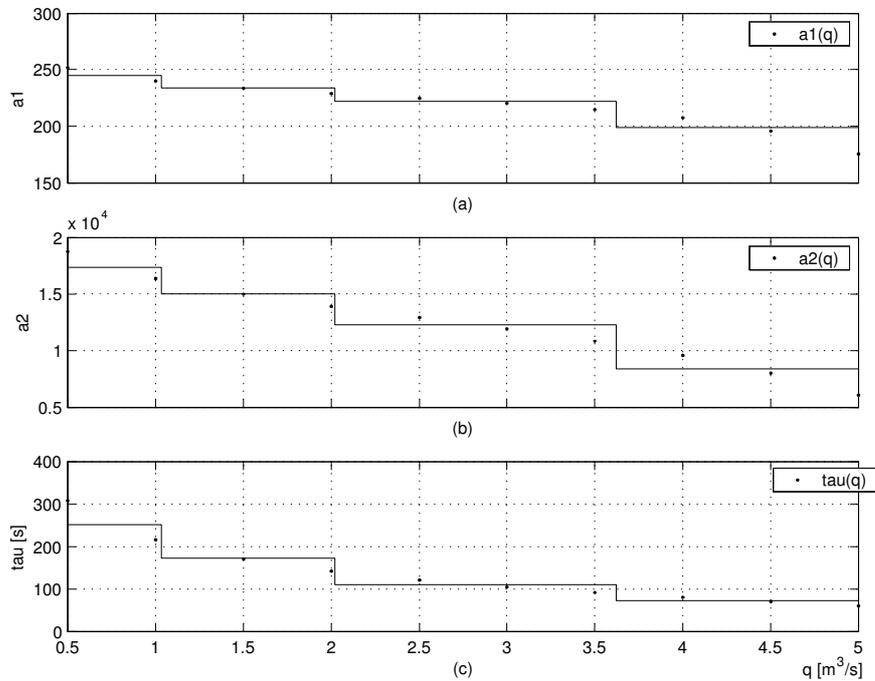


FIG. 3.7 – Détermination (a) des coefficients a_1 , (b) coefficients a_2 et (c) des temps de transfert τ pour chaque sous-domaine de modélisation.

L'approche de multimodélisation selon le coefficient de célérité conduit à l'identification de la dynamique de la galerie, en limitant les erreurs de modélisation sur les paramètres a_1 , a_2 et τ . La démarche de multimodélisation est illustrée dans le cadre d'un système hydraulique réel. Cependant, il convient de l'évaluer en la comparant à une approche de modélisation par équations aux dérivées partielles (EDP). Dans la section suivante, nous proposons de comparer l'approche de multimodélisation à une approche de modélisation par EDP dans le cadre de la galerie de Lunax-Save.

3.6 Intérêt de la multimodélisation par rapport à une représentation aux dérivées partielles

Les EDP de Saint Venant présentées dans la première section de ce chapitre permettent une modélisation très représentative de la dynamique des systèmes hydrauliques à surface libre. Nous souhaitons, dans cette partie, modéliser la galerie de Lunax-Save (figure 3.4) selon une approche par EDP, puis comparer le modèle obtenu à celui issu de l'approche par multimodélisation présentée dans la section précédente. La modélisation par EDP nécessite la connaissance des conditions limites aval de la galerie. Elles sont fournies dans le tableau 3.8. Les conditions limites indiquent les niveaux d'eau correspondant aux débits.

Débit [m^3/s]	0,51	1,02	1,49	2,02	2,53	3,03	3,52	4,06	4,55	5,07
Niveau [m]	0,54	0,72	0,84	0,95	1,04	1,12	1,19	1,26	1,32	1,38

TAB. 3.8 – Conditions limites de la galerie Lunax-Save donnant les relations entre les débits et les hauteurs d'eau.

La résolution des EDP doit ensuite être réalisée à partir des conditions limites selon un schéma de discrétisation. Pour cela, nous avons choisi d'utiliser le logiciel SIC (simulation des canaux d'irrigation) développé par le CEMAGREF de Montpellier¹. Il permet la simulation des écoulements des rivières et des canaux d'irrigation à partir de la résolution des EDP selon le schéma de discrétisation de Preismann et différents algorithmes de résolution. Parmi ceux proposés, nous avons choisi d'utiliser l'algorithme de résolution de Newton qui offre les meilleures performances malgré des durées de simulation plus longues. L'utilisation du schéma de Preismann impose également la sélection des pas de temps et d'espace fixes de façon à garantir un nombre de courant C_r (3.2) proche de 1. Dans le cas contraire, des périodes d'instabilité du débit en réponse à des échelons peuvent apparaître.

¹CEMAGREF. SIC user's guide and theoretical concepts. Montpellier, 1992. <http://canari.montpellier.cemagref.fr/>

La galerie de Lunax-Save a donc été modélisée sous SIC. Les paramètres des modèles obtenus par la méthode de multimodélisation pour la galerie sont ceux présentés dans le tableau 3.7.

La comparaison entre les deux méthodes de modélisation consiste à appliquer, par simulation, aux deux modèles identifiés un signal d'entrée correspondant à une évolution de débit, et à confronter les réponses obtenues en sortie.

Les modèles de la galerie sont soumis à des variations de débits en entrée sous forme de créneau dans un premier temps, puis sous forme de rampe. Dans le cas où le débit est sous forme de créneau, le débit initial d'alimentation de la galerie est de $2 \text{ m}^3/\text{s}$. Il subit par la suite deux augmentations successives, sous forme d'échelon, de $1 \text{ m}^3/\text{s}$, et finalement deux diminutions successives de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ (figure 3.8.a).

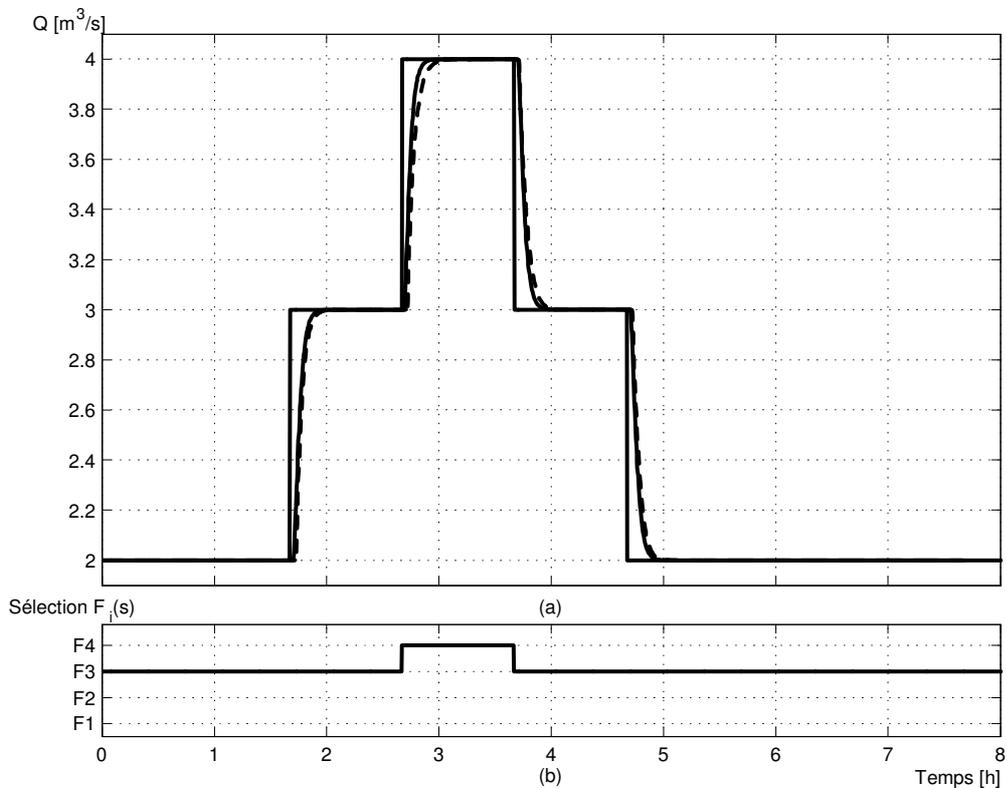


FIG. 3.8 – (a) Réponses à un créneau de débit simulées par EDP (---) et par un banc de modèles (—) et (b) modèles sélectionnés.

Les résultats de simulation obtenu par EDP sont représentés en trait discontinu (---), et ceux par multimodélisation en trait continu (—) sur la figure 3.8.a. La sélection en ligne la fonction de transfert représentant le mieux la dynamique du cours d'eau est représentée sur la figure 3.8.b. Elle est réalisée en fonction du débit selon les plages de fonctionnement définies lors de la conception du banc de modèles.

Dans le cas où le débit évolue selon des rampes, le débit initial d'alimentation de la

galerie est également de $2 \text{ m}^3/\text{s}$. Il subit par la suite deux augmentations successives, sous forme de rampe, de $1 \text{ m}^3/\text{s}$, et finalement deux diminutions successives de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ (figure 3.9.a). Les résultats de simulation obtenus par EDP sont représentés en trait discontinu (- - -), et ceux par multimodélisation en trait continu (—) sur la figure 3.9.a. Comme précédemment, la sélection en ligne de la fonction de transfert est représentée sur la figure 3.9.b.

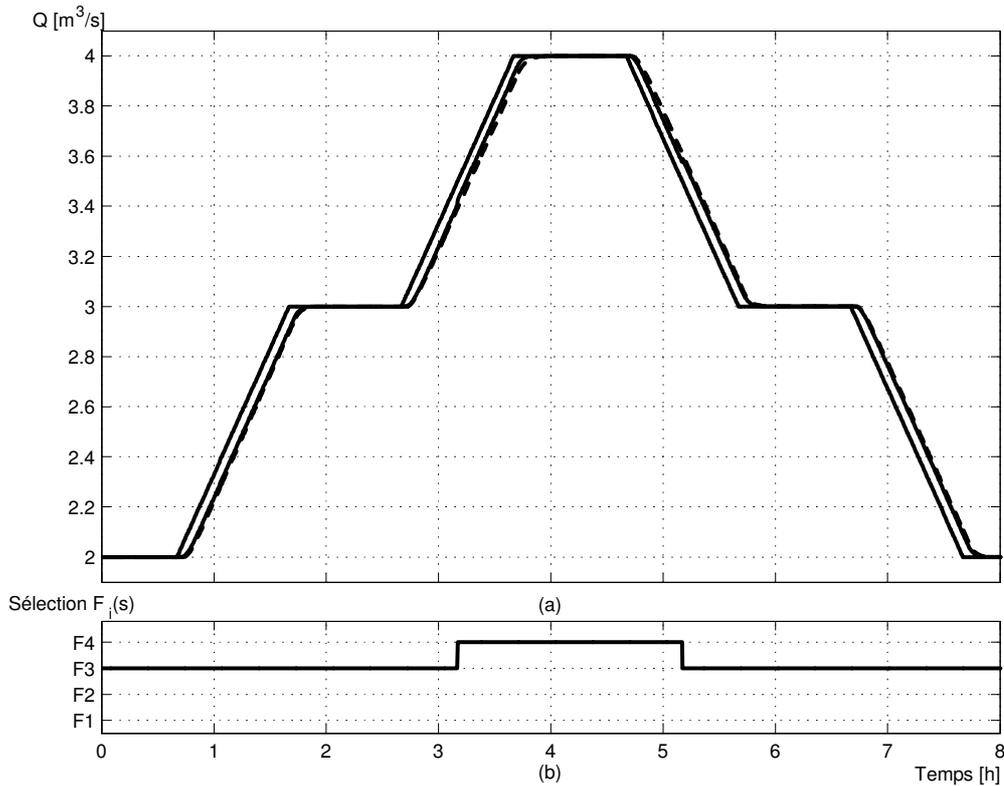


FIG. 3.9 – (a) Réponses à un créneau de débit simulées par EDP (- - -) et par un banc de modèles (—) et (b) modèles sélectionnés.

Les réponses obtenues par les deux approches de modélisation de la galerie sont très similaires. Des différences entre l'approche par EDP et l'approche multimodèle apparaissent cependant pour le créneau de $4 \text{ m}^3/\text{s}$ sur les résultats de la première simulation. Un écart important apparaît également entre les deux méthodes à partir de $3,4 \text{ m}^3/\text{s}$ sur les résultats de la seconde simulation. Ces différences proviennent essentiellement de la plage de débit importante considérée lors de la multimodélisation, *i.e.* $[3,5 ; 5]$. Il est possible d'affiner les résultats de la multimodélisation en augmentant le nombre de modèles en acceptant un pourcentage d'erreur Π_C plus faible sur le coefficient de célérité. Ces écarts sont cependant suffisamment faibles pour conclure sur la similarité des résultats obtenus grâce aux deux méthodes de modélisation.

3.7 Conclusion

L'approche d'identification des systèmes hydrauliques à surface libre par multimodélisation proposée dans ce chapitre est basée sur la linéarisation du modèle de l'onde diffusante obtenu à partir de la simplification des équations de Saint-Venant. Cette approche consiste à décomposer la plage de fonctionnement d'un système hydraulique en plusieurs sous-domaines et à identifier la dynamique de chaque sous-domaine autour d'un point de fonctionnement par une fonction de transfert du premier ou du second ordre avec ou sans retard. Nous avons proposé trois approches de décomposition de la plage de fonctionnement du système hydraulique. La première est réalisée en considérant les débits, la suivante, les temps de transfert et la dernière, les coefficients de célérité. L'approche de multimodélisation selon les coefficients de célérité est la plus adaptée pour la modélisation des systèmes hydrauliques car elle permet l'obtention d'une erreur équivalente sur tous les coefficients d'identification. Elle présente également l'avantage de pouvoir être mise en œuvre sur des biefs de petites dimensions.

L'approche de multimodélisation selon le coefficient de célérité est ensuite utilisée pour l'identification de la dynamique d'un système réel, la galerie Lunax-Save. Cette galerie a la particularité d'avoir un profil circulaire.

Finalement, l'approche par multimodélisation est comparée par simulation à une approche de modélisation par EDP sur la galerie Lunax-Save. Les deux approches conduisent à des résultats très similaires. Les résultats trouvés permettent de conclure sur la qualité de la multimodélisation de la dynamique des systèmes hydrauliques à surface libre. La méthode de multimodélisation est préconisée pour le réglage et la validation de la stratégie de conduite réactive. Le chapitre suivant a pour objet l'évaluation de la stratégie de conduite proposée.

Chapitre 4

Evaluation de la stratégie de conduite réactive

4.1 Introduction

Nous avons proposé au chapitre 2, un modèle conceptuel et une démarche de synthèse d'une conduite réactive pour les systèmes étendus. La conduite réactive permet, dans un cadre générique, la prise en compte de l'état des systèmes dynamiques pour l'application des règles des gestionnaires. Elle est conceptualisée sous un formalisme modulaire composé d'une partie de supervision concourante et d'une partie d'accommodation hybride de la commande. La stratégie de conduite a été décrite et spécifiée pour la valorisation de la ressource des systèmes hydrographiques avec pour objectifs l'acheminement des excédents d'eau vers les retenues aval et la répartition équitable de la ressource disponible.

Dans ce chapitre, nous souhaitons réaliser l'évaluation par simulation de la stratégie de conduite dans le cadre de la problématique de la gestion du système Neste. La particularité du système Neste est la ré-alimentation des rivières de Gascogne ainsi que des barrages de coteaux grâce au canal de la Neste. Une démarche d'évaluation de la stratégie proposée est présentée dans la première section. Elle nécessite la définition d'indicateurs de performance. Un simulateur reproduisant la dynamique des systèmes hydrauliques à surface libre par multimodélisation est utilisé afin de régler la stratégie proposée.

Le canal de la Neste est équipé de plusieurs capteurs et d'actionneurs permettant la supervision de la ressource et l'acheminement de l'eau aux endroits voulus. La problématique de gestion du canal de la Neste consiste donc à valoriser la ressource en eau qu'il véhicule malgré la présence de perturbations. Elle est présentée dans la deuxième partie.

Le simulateur de la dynamique du canal de la Neste nécessaire à l'évaluation de la stratégie de conduite est réalisé à partir de la méthode de multimodélisation. La démarche de modélisation du canal de la Neste est détaillée dans la troisième section de ce chapitre.

Dans la quatrième section, les paramètres des fonctions composant les modules de

supervision concourante et d'accommodation hybride de la commande sont réglés par simulation. Ces réglages conduisent à l'obtention du meilleur compromis entre les différents objectifs de gestion à satisfaire.

La stratégie de conduite est finalement évaluée sur la totalité du canal de la Neste. Les résultats obtenus permettent de juger de l'efficacité de la stratégie de supervision concourante et de l'accommodation hybride de la commande. Ils sont présentés dans la cinquième partie.

La stratégie de conduite est finalement évaluée dans le cas d'un réseau hydrographique composé d'un confluent et d'un défluent en série. Les résultats sont présentés dans la sixième partie. La généralité de la stratégie de conduite est ainsi illustrée.

4.2 Indicateurs de performance de la stratégie de conduite

Nous avons choisi d'évaluer la stratégie de conduite proposée au chapitre 2 par simulation et par la définition d'indicateurs de performance. Ces derniers sont établis en fonction des objectifs fixés lors de la définition de la problématique de valorisation de la ressource en eau. Dans ce cadre, la gestion optimisée d'un réseau hydrographique consiste d'une part à répartir les écarts de débit entre les vannes en limitant les volumes résiduels en bout de cours d'eau V_T , les volumes manquants V_m et les volumes excédentaires V_M , d'autre part à éviter les assèchements F_{\min} et les débordements F_{\max} en bout de cours d'eau, et finalement à minimiser le nombre de consignes envoyées aux vannes *Bat*. Le critère V_T correspond à la somme cumulée de la valeur absolue des écarts de débit en bout de cours d'eau, c'est à dire à la somme des volumes en manque V_m et des volumes en excès V_M . Les critères F_{\min} et F_{\max} correspondent aux extremums du débit en bout de cours d'eau.

La limitation des erreurs en bout du système hydraulique et la limitation du nombre de consignes envoyées aux vannes sont *a priori* deux objectifs antagonistes. L'augmentation du nombre de consignes envoyées aux vannes mène à une conduite plus réactive et, de ce fait, à une réduction des erreurs en bout de canal. Cependant, elle induit des problèmes d'usure au niveau des organes de commande et implique une maintenance accrue des équipements.

La paramétrisation de la stratégie de supervision et d'accommodation hybride de la commande consiste donc à régler les paramètres de chaque fonction afin de trouver le meilleur compromis pour la satisfaction des objectifs. Les paramètres de réglage de la stratégie de conduite sont les périodes de détection T_d et de commande T_c , les seuils de détection th_i et jp_i , et de diagnostic dth_i .

La période de détection T_d est fixée lors de la mise en place des méthodes de régulation des cours d'eau. Elle est déterminée en fonction de la dynamique des systèmes. La période

de commande T_c , multiple de la période de détection T_d , est également choisie en fonction de la dynamique du système. Nous supposons qu'une fois fixées, elles ne peuvent plus évoluer.

Pour la sélection des autres paramètres de la stratégie de conduite, nous proposons d'adopter une approche de réglage par simulation. Nous l'illustrons dans le cadre de la valorisation de la ressource du canal de la Neste.

4.3 Cas de gestion du réseau Neste

Le canal de la Neste est situé dans le département des Hautes-Pyrénées dans le sud-ouest de la France. Il a été construit entre 1824 et 1862 afin de ré-alimenter les rivières de Gascogne par l'acheminement de volumes d'eau à travers le plateau de Lannemezan. Les rivières de Gascogne ne bénéficient pas naturellement des ressources en eau des Pyrénées (figure 4.1).

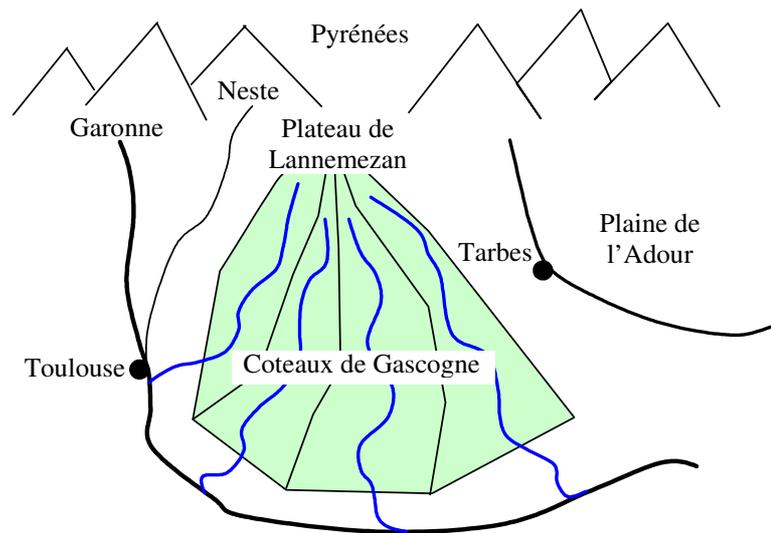


FIG. 4.1 – Réseau hydrographique des coteaux de Gascogne [Parent, 1991].

Le canal de la Neste (figure 4.2) est alimenté au niveau de Sarrancollin par la Neste (G_0) avec un débit maximum de $14 \text{ m}^3/\text{s}$. Il ré-alimente 9 cours d'eau des coteaux de Gascogne (de G_1 à G_9), dont certains alimentent des barrages de coteaux en aval. Le canal est équipé de 9 vannes régulées localement et de 3 limnimètres situés au niveau du seuil d'Escal M_1 , du seuil de Gers M_2 , et du seuil de la Baïsole M_3 , qui fournissent les mesures des hauteurs d'eau. Les vannes sont consignées à distance et les mesures de débits sont transmises grâce à un système de télégestion au centre de gestion de la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne (CACG) situé à Tarbes.

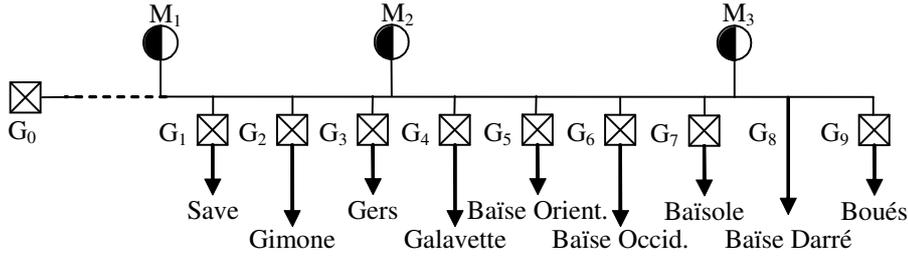


FIG. 4.2 – Schématisation du canal de la Neste.

Le canal de la Neste mesure un peu plus de 28 *km*, et le seuil d’Escala est situé à peu près 20 *km* de Sarrancollin G_0 . Il est composé de 840 profils différents majoritairement de forme trapézoïdale. Le canal de la Neste est un système à écoulement à surface libre qui subit, de ce fait, des perturbations dues aux intempéries. Il est également soumis à des perturbations de l’ordre de $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$, provenant d’activités industrielles en amont de M_1 et en aval de la vanne G_6 .

La gestion du canal de la Neste consiste à garantir, malgré les perturbations, l’alimentation des rivières aux débits objectifs $q_{j_{obj}}$ définis par le gestionnaire. La sélection des priorités λ_j et μ_j associées aux vannes est réalisée à partir des règles décrites au chapitre 1. Trois niveaux de priorité permettant de transcrire les règles d’arbitrage sont ainsi définis. Les priorités peuvent évoluer au cours du temps, mais elles sont en général liées à la structure du réseau hydrographique. De plus, nous considérons qu’elles ne sont remises en cause qu’une fois par semaine.

Les caractéristiques des huit vannes du canal de la Neste sont fixées au niveau du module GCOG. Nous proposons de considérer une situation réelle de gestion du canal, dont les caractéristiques associées aux vannes sont fournies dans le tableau 4.1. Le cours d’eau alimentant la Baïse Darré est assimilée à une vanne fictive G_8 , avec un débit objectif $q_{8_{obj}}$, des débits minimal $q_{8_{min}}$ et maximal $q_{8_{max}}$, mais sans priorité.

L’emploi de la stratégie de conduite réactive nécessite le conditionnement des données mesurées, le réglage des fonctions de détection et de diagnostic. Pour cela, nous avons choisi de proposer une méthode de réglage par simulation. Les caractéristiques du cours d’eau simulé étant celles du canal de la Neste, il doit être modélisé selon l’approche par multimodélisation. Elle est présentée dans la section suivante.

4.4 Multimodélisation du canal de la Neste

Le canal de la Neste est équipé de trois points de mesure qui conduisent à la définition de quatre biefs allant respectivement de G_0 à M_1 , de M_1 à M_2 , de M_2 à M_3 , et de M_3 à G_9 . Dans notre étude, le premier bief n’est pas pris en compte car les perturbations pouvant être réparties sont uniquement mesurées en M_1 .

Vanne	$q_{j \min} [m^3/s]$	$q_{j \max} [m^3/s]$	λ_j	μ_j
G_1	0,02	3,6	10	10
G_2	0,1	4,5	10	4
G_3	0,04	3,5	4	10
G_4	0,04	0,15	1	1
G_5	0,05	0,95	1	4
G_6	0,1	1,5	1	10
G_7	0,09	1,04	10	1
G_8	0,1	0,6	—	—
G_9	0,2	2,5	4	1

TAB. 4.1 – Caractéristiques des vannes.

L'approche de modélisation classique qui consiste à identifier les systèmes hydrauliques par bief n'est pas retenue dans notre cas. Chaque bief étant équipé de plusieurs vannes, le débit en amont du bief et celui en aval ne sont pas identiques même en l'absence de perturbation. Les biefs ne peuvent donc pas, sans une trop grande approximation de leur dynamique, être modélisés par des fonctions de transfert. Nous avons donc été amenés à considérer les tronçons du canal, situés entre un point de mesure et une vanne, entre deux vannes ou entre une vanne et un point de mesure. Chaque tronçon du canal de la Neste est composé de plusieurs profils trapézoïdaux. Il y a 241 profils différents entre le limnimètre M_1 et la vanne aval G_9 . La prise en compte de tous les profils pour la modélisation du canal est complexe. Nous proposons alors de considérer un profil moyen pour chaque tronçon.

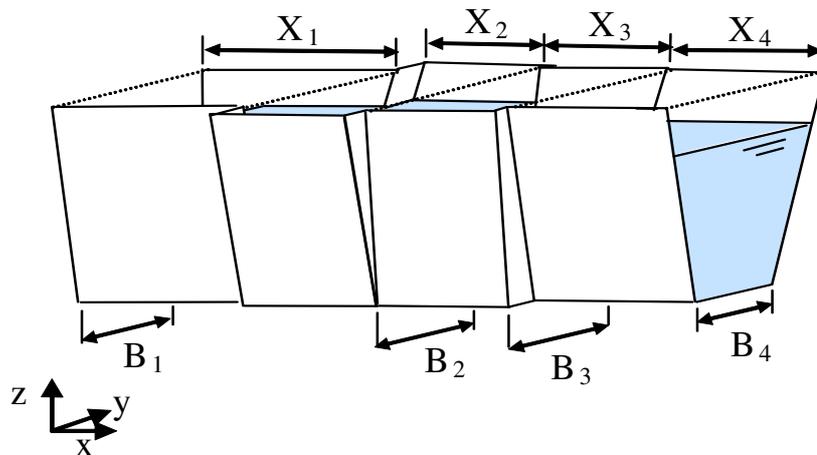


FIG. 4.3 – Profils successifs composant un tronçon de forme trapézoïdale.

Afin de prendre en compte la longueur des profils, nous avons choisi de calculer les caractéristiques physiques des tronçons à partir d'une moyenne pondérée. Pour un profil trapézoïdal, la largeur du miroir B_T est déterminée par :

$$B_T = \frac{\sum_{r=1}^{i_B} (X_r B_r)}{\sum_{r=1}^{i_B} X_r} \quad (4.1)$$

où X_r est la longueur du profil r .

Cette méthode permet de prendre en compte les longueurs des profils dans la détermination des caractéristiques physiques des tronçons et d'identifier leur dynamique de manière plus fine.

Les paramètres physiques des profils ne sont pas connus. Les seules données disponibles sont les relevés topographiques des profils en 5 points (figure 2.35).

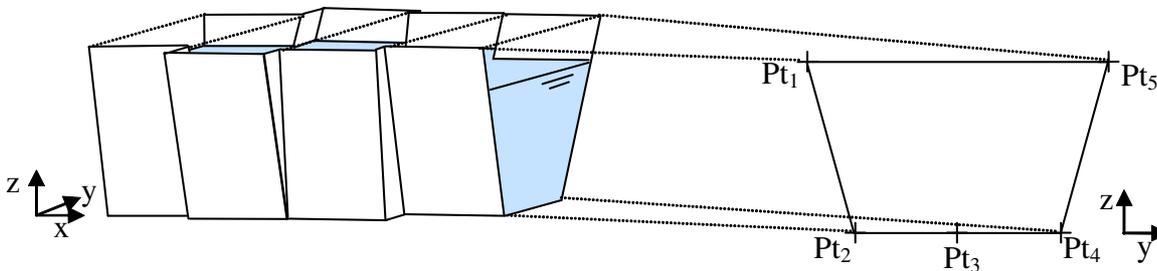


FIG. 4.4 – Cours d'eau composé de plusieurs profils trapézoïdaux définis par 5 points.

Les points de chaque profil composant le deuxième tronçon du canal, situé entre la vanne G_1 et G_2 sont représentés sur la figure 4.5. Ils sont définis par les coordonnées en y et z . Les points Pt_1 sont représentés par le signe "+", les points Pt_2 par "×", les points Pt_3 par "▽", les points Pt_4 par "*" et les points Pt_5 par "★". Nous constatons que les points définissant les profils ont une dispersion importante.

Nous avons appliqué la méthode de la moyenne pondérée sur les coordonnées y et z de la totalité des points de façon à ne conserver uniquement que 5 points définissant le profil moyen du tronçon. Le profil moyen du deuxième tronçon du canal est représenté sur la figure 4.5. Les profils moyens obtenus pour les autres tronçons ainsi que les points de chaque profil les constituant sont fournis en Annexe 2. Les caractéristiques des profils moyens considérés pour chaque tronçon sont données dans le tableau 4.2.

L'identification de la dynamique des tronçons du canal de la Neste est ensuite réalisée à partir de ces caractéristiques géométriques. L'approche de multimodélisation selon les coefficients de célérité est utilisée avec un pourcentage d'erreur sur le coefficient de célérité de $\Pi_C = 7\%$. Elle conduit à l'identification d'un banc de modèles pour chaque tronçon dont les paramètres sont fournis en Annexe 3.

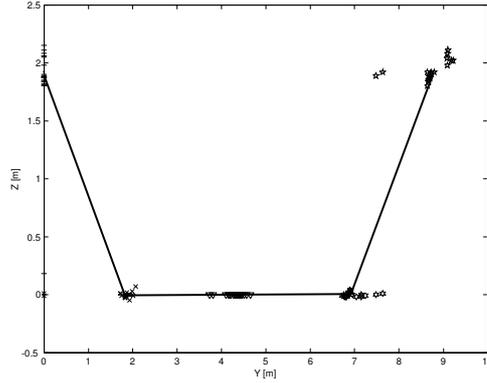


FIG. 4.5 – Profil moyen du tronçon 2 situé entre G_1 et G_2 , et les 5 points de chaque profil.

Tronçon	B [m]	m_b	X [m]	n	i	Q_{\min} [m^3/s]	Q_{\max} [m^3/s]
1	5,73	0,79	204	0,02	0,07 %	0,8	14
2	5,09	0,96	702	0,02	0,07 %	0,8	12
3	5,21	0,95	562	0,02	0,06 %	0,7	10
4	3,72	0,94	1360	0,02	0,05 %	0,6	7
5	3,57	0,96	1632	0,02	0,06 %	0,6	6,5
6	2,85	0,99	1732	0,02	0,13 %	0,5	5,5
7	3,06	0,91	1092	0,02	0,40 %	0,4	4
8	2,53	0,96	1505	0,02	0,11 %	0,3	3
9	2,49	0,43	7	0,02	0,18 %	0,2	2,5

TAB. 4.2 – Caractéristiques géométriques des tronçons du canal de la Neste.

Chaque banc de modèles identifié ainsi que les fonctions de sélection des fonctions de transfert sont implantés sous Matlab/Simulink afin de reproduire le comportement dynamique du canal de la Neste. Le simulateur implanté peut alors être utilisé pour le réglage des paramètres des fonctions de détection et de diagnostic. Dans la section suivante, nous proposons de caractériser les perturbations subies par les signaux et présentons un exemple d'application sur des données réelles.

4.5 Conditionnement

Les données mesurées au niveau des limnimètres M_1 , M_2 et M_3 équipant le canal sont transmises par un réseau téléphonique commuté au centre de gestion de la CACG situé à Tarbes. Les hauteurs d'eau sont transformées en débits grâce à l'utilisation de courbes de tarage (figure 4.6) spécifiques à chaque limnimètre. Lors du rapatriement des données, des erreurs de transmission caractérisées par l'occurrence de valeurs aberrantes, peuvent

apparaître. La détection et la correction de ces valeurs aberrantes est réalisée grâce à une moyenne sur fenêtre glissante. Le nombre de données est choisi en fonction du résultat obtenu et du retard de détection.

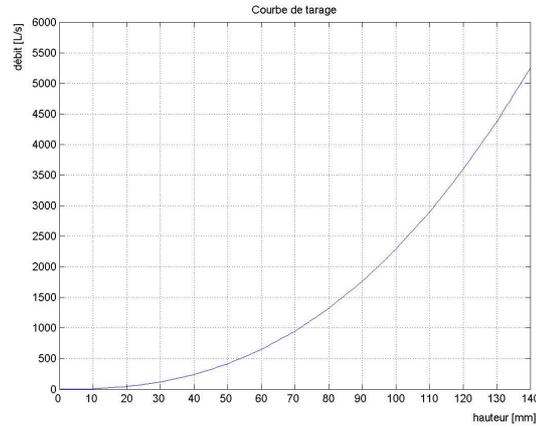


FIG. 4.6 – Courbe de tarage du limnimètre M_3 .

La figure 4.7 permet d'illustrer le filtrage sur fenêtre glissante des mesures réelles de débit au niveau des trois limnimètres du canal. Pour ce jeu de données, le filtrage est réalisé sur une fenêtre glissante de 10 valeurs. Les données brutes sont tracées en trait discontinu (- - -), et les données filtrées en trait continu (—).

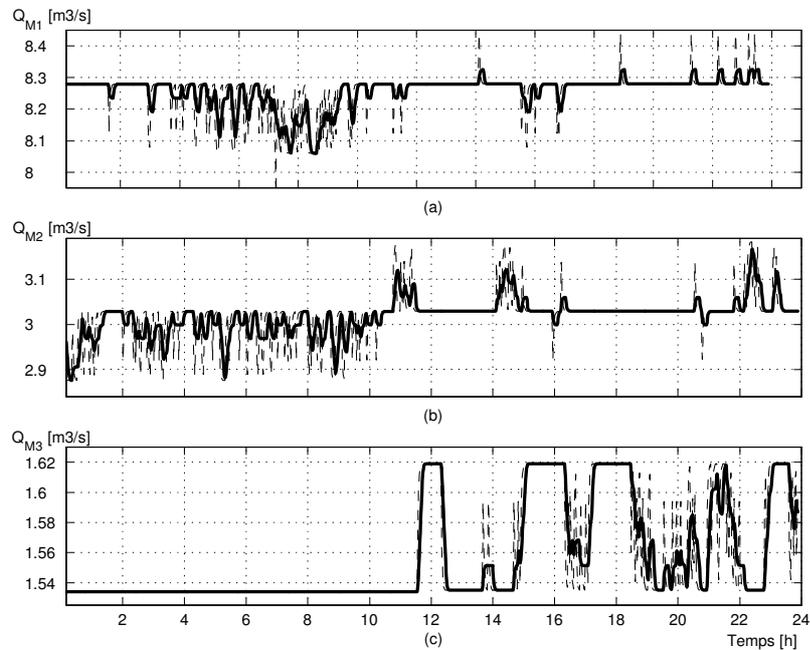


FIG. 4.7 – Débits mesurés et filtrés en trois points de mesure (a) M_1 , (b) M_2 et (c) M_3 .

Le canal est soumis à plusieurs types de perturbations qui doivent être identifiées de manière à être prises en compte ou non lors de la répartition de la ressource. Les perturbations se différencient par leur comportement cyclique, leur amplitude et leur fréquence. Elles sont réparties selon ces critères en deux classes composées de différentes catégories. La caractérisation des perturbations pourra être généralisée aux autres réseaux hydrographiques.

Les perturbations non cycliques sont provoquées par une augmentation ou une diminution du débit d'alimentation en amont du canal, par les eaux de ruissellement issues de pluie, par les infiltrations ou par l'évaporation. Les perturbations non cycliques ont la caractéristique de durer dans le temps. Il est donc souvent nécessaire de les répartir entre les vannes du canal. Pour cette classe de perturbations, il est également possible de distinguer les perturbations de faible et de forte amplitude. Les perturbations seront réparties entre les vannes si leur amplitude dépasse un certain seuil. En dessous de ce seuil, l'écart de débit en bout de canal ne justifie pas une re-consignation des vannes.

Les perturbations cycliques composent la deuxième classe de perturbation. Elles sont provoquées par l'utilisation de l'eau, pompages et rejets des industriels, des agriculteurs et des consommateurs. Les perturbations cycliques caractérisées par leur amplitude et leur fréquence sont classées en trois catégories.

Les perturbations de faible amplitude, quelque soit leur fréquence, constituent la catégorie des perturbations à ne pas répartir.

Les perturbations de grande amplitude et de fréquence élevée doivent être filtrées et moyennées avant d'être réparties. En effet, les perturbations sont d'une part atténuées au fil de l'eau, et d'autre part, une répartition des perturbations de fréquence élevée conduit souvent à une consignation excessive des vannes. Le battement des vannes induit des problèmes de maintenance des équipements.

Finalement, les perturbations de grande amplitude et de faible fréquence constituent la dernière catégorie. La répartition entre les vannes de ces perturbations se fera lorsque la répartition de l'écart de débit sera jugée plus avantageuse que le coût induit par une re-consignation fréquente des vannes.

Sur les débits mesurés aux points M_1 , M_2 et M_3 représentés sur la figure 4.8 en trait discontinu (- - -), il est possible de distinguer, mise à part les données erronées, deux types de perturbations cycliques :

- des perturbations d'amplitude de $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ et de fréquence de l'ordre de 1 mHz ,
- des perturbations d'amplitude de $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ et de fréquence de l'ordre de $0,4 \text{ mHz}$.

Les perturbations d'amplitude de $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ ne doivent pas être réparties entre les vannes car elles sont atténuées naturellement au fil de l'eau. Les perturbations d'amplitude de $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ sont filtrées et moyennées avant d'être réparties, afin de réduire le nombre d'ordres envoyés aux vannes.

Pour ce jeu de données, un filtre passe-bas butterworth d'ordre 3 permet de filtrer

les perturbations de fréquence élevée (figure 4.8), supérieure à $0,55 \text{ mHz}$. Les données brutes sont tracées en trait discontinu (- - -), et les données filtrées en trait continu (—). Pour cet exemple, le filtre a pour caractéristiques une bande passante telle que $Fp = 0,27 \text{ mHz}$ et $Rp = 3$, et une fréquence de coupure telle que $Fs = 0,55 \text{ mHz}$ et $Rs = 15$.

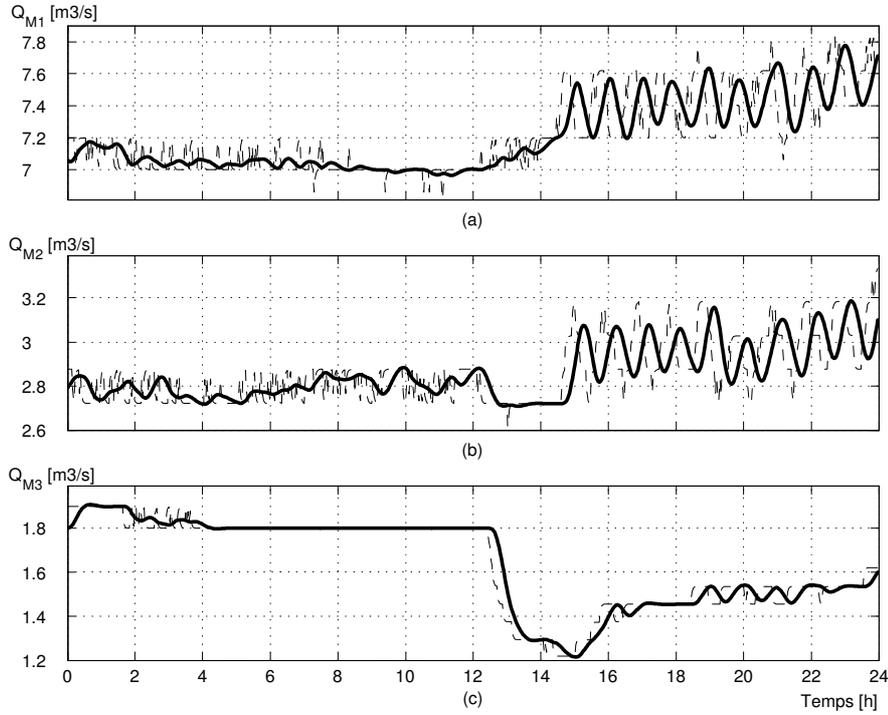


FIG. 4.8 – Débits mesurés et filtrés en trois points de mesure (a) M_1 , (b) M_2 et (c) M_3 .

Les fonctions de transcription en débit des données mesurées au niveau des limnimètres M_1 , M_2 et M_3 , de correction et de filtrage sont réalisées au niveau du Conditionnement. Les données disponibles à la sortie du bloc de conditionnement sont jugées fiables et peuvent servir à la détection des perturbations et au diagnostic de l'état de la ressource.

4.6 Réglage des seuils de détection et de diagnostic

La détection des perturbations et le diagnostic de l'état de la ressource sont réalisés à partir des automates hybrides concourants présentés au chapitre 2. Ils sont implantés sous Matlab/Simulink/Stateflow sous forme de statecharts. Les automates de détection et de diagnostic ont la possibilité d'être réglés grâce à la prise en compte de seuils de détection th_i et jp_i , et de seuils de diagnostic dth_i . Le réglage de ces paramètres est réalisé à l'aide de simulations effectuées sur un modèle de canal équipé d'un seul limnimètre M et de n vannes manœuvrables (figure 4.9). Le canal considéré est donc composé d'un seul bief et de plusieurs tronçons. Les tronçons du canal utilisé pour les simulations sont ceux du

canal de la Neste. Ils sont de forme trapézoïdale et ont été modélisés grâce à l'approche de multimodélisation présentée précédemment.

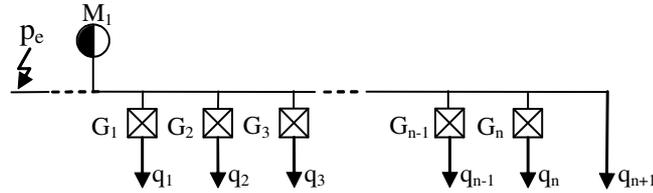


FIG. 4.9 – Canal composé d'un limnimètre M_1 et de n vannes manoeuvrables.

Nous souhaitons tout d'abord comparer les méthodes de détection par seuil fixe (DSF) et par seuil variable (DSV), dans le but de faire un choix de méthode. Pour cela, nous réalisons les tests sur les méthodes de détection en considérant le diagnostic effectué. Le seuil utilisé pour le diagnostic dth_1 est fixé à $2,4 \text{ m}^3/\text{s}^2$.

Le canal considéré pour les simulations est composé de huit vannes ($n = 8$) dont les caractéristiques sont celles du canal de la Neste (tableau 4.1). Pour ce scénario de simulation, le canal, alimenté par un débit objectif $Q_{M_1 obj}$ égal à $4,11 \text{ m}^3/\text{s}$ et soumis à des perturbations en amont de M_1 est représenté sur la figure 4.10.

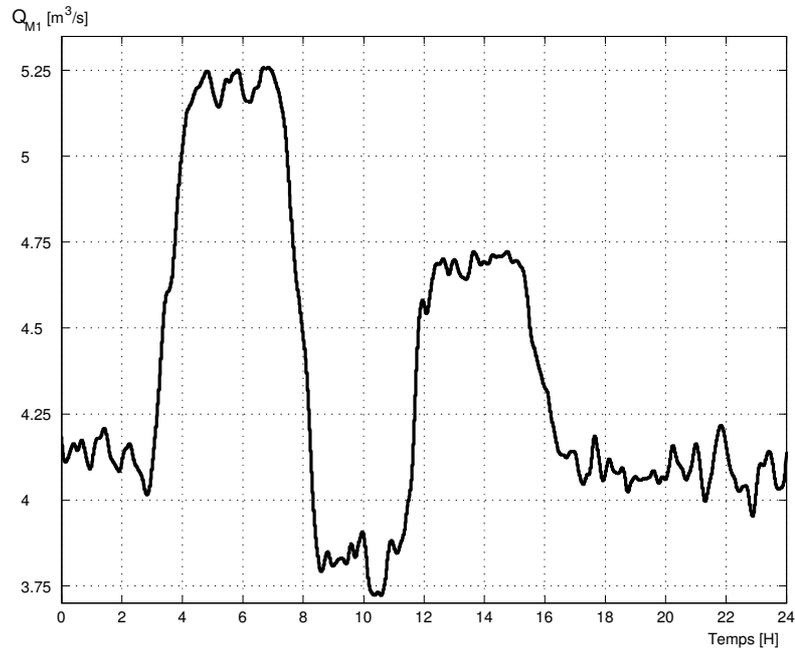


FIG. 4.10 – Débit mesuré en M_1 .

Les débits objectifs des vannes $q_{j obj}$ sont donnés dans le tableau 4.3.

Vanne	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6	G_7	G_8	G_9
$q_{j_{obj}} [m^3/s]$	0,7	1,4	0,9	0,05	0,1	0,15	0,16	0,35	0,3

TAB. 4.3 – Débits de consignes $q_{j_{obj}}$ des vannes.

La moyenne $Q_{M_{1obj}}$ et l'écart type du signal σ_1 , utilisés pour la méthode DSV, sont déterminés à partir de la mesure du débit Q_{M_1} (tableau 4.4). Les probabilités de manque de détection PL_1 et de fausse alarme PF_1 sont fixées à 0,001.

Paramètres DSV	M_1
$Q_{M_{1obj}} [m^3/s]$	4,11
$\sigma_1 [m^3/s]$	0,15
PL_1	0,001
PF_1	0,001

TAB. 4.4 – Valeurs des paramètres pour la méthode DSV.

Les paramètres de réglage sont th_1 pour la méthode DSF et jp_1 pour la méthode DSV. Leur sélection est réalisée grâce à une série de simulations en modifiant la valeur des seuils sur l'intervalle $[0,05 ; 0,5]$ avec des pas de $0,05 m^3/s$. Les critères définis pour juger de l'efficacité de la stratégie de conduite sont obtenus pour chacune des simulations. Un critère supplémentaire τ_d est défini afin de comparer les retards de détection. Les résultats obtenus sont présentés en trait continu pour la méthode DSF et en trait pointillé pour la méthode DSV sur la figure 4.11. Quelque soit la méthode de détection utilisée et le scénario simulé, le retard de détection τ_d (figure 4.11.a) augmente avec le seuil de détection alors que le nombre de consignes envoyées aux vannes *Bat* (figure 4.11.b) diminue. La stratégie de conduite est très réactive lorsque le seuil de détection est faible. Par contre, il est intéressant de constater que les objectifs de limitation du nombre de consignes *Bat* et de l'erreur en bout de canal V_T supposés *a priori* antagonistes, ne le sont pas. Le réglage du seuil de détection à $0,05 m^3/s$ conduit à un grand nombre de commandes envoyées aux vannes qui entraînent une agitation du débit et une erreur importante en bout de canal.

Le critère τ_d (figure 4.11.a) augmente de façon significative pour la méthode DSV à partir de $0,25 m^3/s$, et le critère *Bat* (figure 4.11.b) ne devient acceptable qu'à partir de $0,15 m^3/s$. La considération de ces deux critères permet de limiter la plage de sélection des seuils à l'intervalle $[0,15 ; 0,25]$. Cet intervalle de sélection du seuil de détection correspond également aux suggestions du gestionnaire. Dans cet intervalle, les critères V_m , V_M , V_T , F_M et F_m (figures 4.11.c et 4.11.d) atteignent leur minimum pour un seuil de détection de $0,15 m^3/s$. Par la suite, le seuil de détection sera donc réglé à cette valeur.

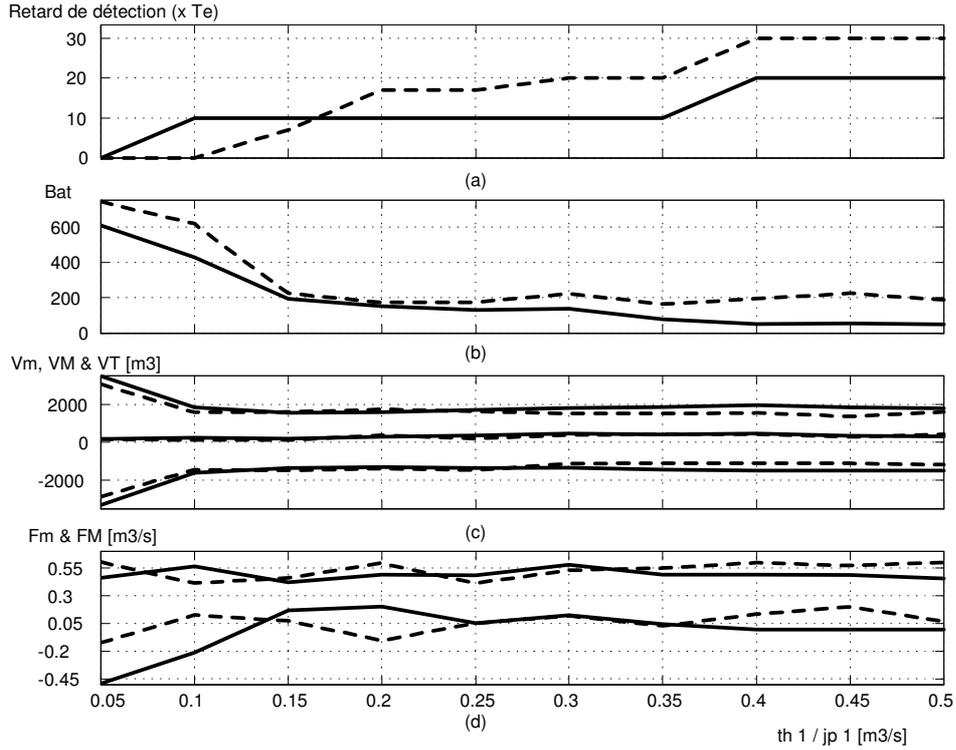


FIG. 4.11 – Retard de détection τ_d (a), nombre de commande envoyées au vannes *Bat* (b), volumes V_m , V_M et V_T (c), débits maximum F_M et minimum F_m en bout de canal selon les méthodes DSF (—) et DSV (- - -).

Les deux méthodes de détection peuvent alors être comparées. Les valeurs des critères obtenus lors de l'utilisation des méthodes DSF et DSV sont fournies dans le tableau 4.5. La répartition du volume d'eau V_T diffère seulement de 3% entre les deux méthodes de détection. L'objectif de répartition de la ressource est atteint de manière équivalente par les méthodes DSV et DSF.

Critères	DSF	DSV
V_T [m^3]	1854	2053
V_M [m^3]	239	271
V_m [m^3]	-1615	-1782
<i>Bat</i>	192	226
F_{\max} [m^3/s]	0,421	0,461
F_{\min} [m^3/s]	0,198	0,073
τ_d	$10 T_e$	$7 T_e$

TAB. 4.5 – Critères obtenus par la méthode DSF et DSV pour un seuil et un saut de 150 l/s .

La méthode DSV permet une détection plus rapide des perturbations que la méthode DSF, et par conséquent une meilleure répartition des excédents d'eau V_M . Bien qu'*a priori* plus adaptée que la méthode DSF, la méthode DSV est plus sensible aux perturbations, ce qui entraîne un nombre plus élevé de consignes envoyées aux vannes *Bat*, et des volumes manquants V_m ainsi qu'une erreur négative en bout de canal F_{\min} très importants. Il serait nécessaire de sélectionner les probabilités de manque de détection PL_1 et de fausse alarme PF_1 de façon à répondre plus efficacement aux objectifs de gestion. Compte tenu de la faible différence entre les résultats obtenus selon les deux méthodes de détection, nous préconisons la méthode DSF qui présente l'avantage d'être plus facilement paramétrable et implantable.

Après avoir choisi la méthode de détection DSF, nous souhaitons régler les paramètres de l'automate de détection (figure 2.9). Nous proposons une méthode de réglage par simulation sur le même canal avec des débits objectifs $q_{j_{obj}}$ identiques (tableau 4.3). Le canal est soumis à scénarios extrêmes de perturbations en amont de M_1 . Elles correspondent à deux périodes de rejets d'amplitudes respectives de $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$ et $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$, et d'une période de prélèvements d'amplitudes de $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ (figure 4.12.a).

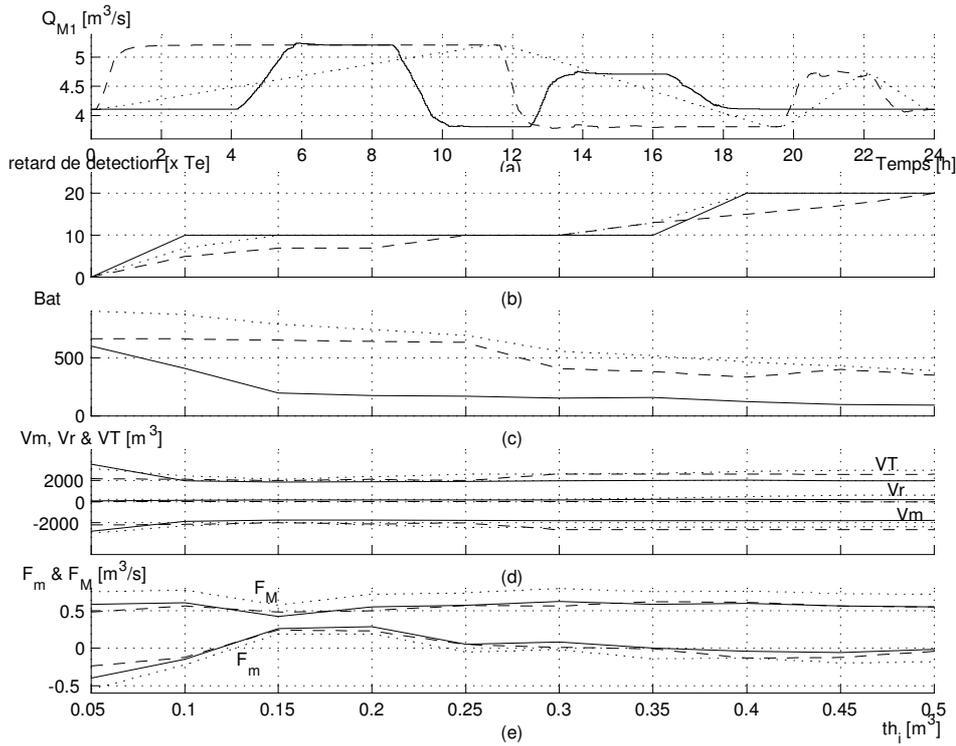


FIG. 4.12 – Débit mesuré en M_1 selon le scénario 1, trait continu (—), selon le scénario 2, trait discontinu (- - -), et selon le scénario 3, trait pointillé (. . .) (a), (b) retard de détection, (c) nombre de commande envoyées au vannes *Bat*, (d) volumes V_m , V_M et V_T , (e) débits maximum F_M et minimum F_m en bout de canal.

Les scénarios se différencient par la durée des perturbations. Le débit du scénario 1 est représenté en trait continu (—), celui du scénario 2 en trait discontinu (- - -), et celui du scénario 3 en trait pointillé (. . .). Les débits Q_{M_1} sont également soumis à des perturbations cycliques de faibles amplitudes dont les caractéristiques ont été déterminées à partir de données réelles.

Quelque soit le scénario de perturbations simulé, nous constatons que le réglage du seuil de détection th à $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$ conduit à un bon compromis entre tous les critères. Le critère τ_d (figure 4.12.b) et le critère Bat (figure 4.12.c) sont acceptables. Par ailleurs, ce choix de th à $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$ permet de limiter les erreurs en bout de canal, *i.e.* les critères V_m , V_M , V_T , F_M et F_m (figures 4.12.d et 4.12.e). Les valeurs des critères obtenus selon les trois scénarios sont fournis dans le tableau 4.6.

Critères	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
$V_r [m^3]$	239	149	225
$V_m [m^3]$	-1615	-1947	-1793
$V_T [m^3]$	1854	2096	2018
Bat	192	792	650
$F_M [m^3/s]$	0,421	0,513	0,572
$F_m [m^3/s]$	0,198	0,206	0,192
$\tau_d [s]$	$10 T_e$	$10 T_e$	$7 T_e$

TAB. 4.6 – Critères obtenus pour des scénarios extrêmes de fonctionnement et un seuil de détection th_1 de $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$.

Finalement, nous souhaitons régler le seuil de diagnostic dth_i . Ce dernier est également réalisé par simulations sur un canal équipé d'un seul point de mesure M_1 et de huit vannes ($n = 8$) en fixant le seuil de détection à $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$. Les caractéristiques de fonctionnement des vannes sont fournies dans le tableau 4.3. Les simulations sont réalisées en utilisant un automate de diagnostic à 5 états et en faisant varier la valeur du paramètre dth_i en fonction du seuil de détection. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 4.7.

Seuils de diagnostic [m^3/s^2]	1, 2	3	6
Bat	271	192	139
$V_T [m^3]$	2015	1977	2063
$F_{\max} [m^3/s]$	0,572	0,421	0,614
$F_{\min} [m^3/s]$	0,14	0,168	0,044

TAB. 4.7 – Critères de comparaison en fonction du seuil de diagnostic.

Des seuils de diagnostic mal adaptés induisent une erreur importante en bout de canal,

parfois accompagnée d'un grand nombre de commandes. Lorsque la valeur du seuil de diagnostic augmente, le système est moins sensible aux variations du débit, ce qui induit une diminution du nombre de commandes, mais provoque une erreur importante en bout de canal. Lorsque la valeur du seuil diminue, le système devient très sensible aux petites variations de débit, et l'augmentation du nombre de commandes provoque le battement des vannes induisant une agitation du débit et une erreur importante en G_8 . Finalement, un seuil de diagnostic correspondant à 15% du seuil de détection offre un bon compromis entre les contraintes de maintenance et d'exploitation.

Les paramètres des fonctions utilisées pour la supervision étant réglés de façon à répondre de manière optimale aux objectifs de gestion de la ressource, la stratégie de conduite peut être testée par simulation sur différents scénarios. Les temps de transfert utilisés lors de l'affectation sont déterminés lors de la multimodélisation. Nous souhaitons évaluer la stratégie de conduite réactive sur un modèle différent de celui qui nous a servi à régler ses fonctions. Nous avons donc choisi d'utiliser le logiciel SIC pour modéliser la dynamique du canal de la Neste et simuler son comportement. Ainsi, nous avons développé un simulateur pour utiliser conjointement Matlab et SIC.

4.7 Implantation du simulateur

Le modèle des cours d'eau est réalisé grâce au logiciel SIC utilisé pour la résolution des EDP de Saint Venant. Ce logiciel peut être utilisé conjointement avec Matlab à partir de liens DDE, *i.e.* liens d'échange dynamique de données. Le logiciel SIC doit être interfacé avec Matlab/Simulink où a été implanté la stratégie de conduite réactive (figure 4.13).

Les deux logiciels fonctionnent avec un pas de temps qu'il leur est propre. Le logiciel SIC peut être utilisé avec un pas de temps très court P_T afin de simuler le comportement hydraulique des cours d'eau en continu. Le logiciel Matlab est utilisé avec un pas de temps plus important correspondant à une période de détection T_d . Les données échangées entre les deux logiciels sont recueillies au niveau de l'espace de travail de Matlab, et ne peuvent pas être directement utilisées par Simulink où a été implanté la stratégie de conduite. Afin d'utiliser Simulink, nous avons développé un fichier matlab permettant la simulation conjointe entre SIC et Matlab/Simulink. Le fichier matlab permet dans un premier temps de recueillir les données de sortie \mathbf{h} issues de SIC à chaque pas de discrétisation et de lancer la simulation sous Simulink pour une durée correspondant à T_d . La simulation sous Simulink est ensuite mise en pause, les données sont transmises au fichier matlab, puis envoyées à SIC avec un pas de temps de commande T_c , avant de rendre la main au logiciel SIC. Les échanges entre SIC et le fichier matlab se font avec un pas de temps correspondant à T_p . La supervision de l'état du cours d'eau n'est réalisée qu'à la période T_d , et les consignes \mathbf{u} envoyées aux actionneurs sous SIC ne sont remises à jour qu'à la période T_c .

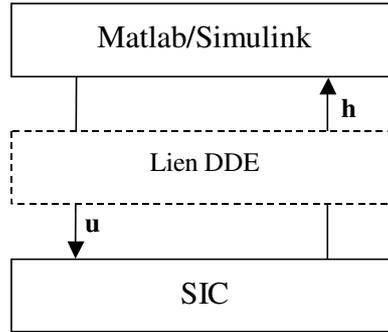


FIG. 4.13 – Interfaçage entre le logiciel SIC et le logiciel Matlab.

Pour des raisons de simplicité, la conception de notre simulateur est illustrée sur un système hydraulique (figure 4.14) composé d'un seul bief de forme trapézoïdale.

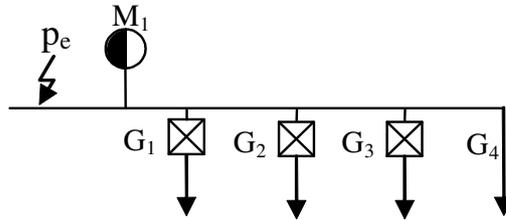


FIG. 4.14 – Bief équipé d'un point de mesure M_1 et de trois prises, G_1 , G_2 et G_3 .

Les caractéristiques des trois premières vannes : leurs débits de consigne $q_{j_{obj}}$ et d'alimentation minimal $q_{j_{min}}$ et maximal $q_{j_{max}}$, ainsi que leurs priorités λ_j et μ_j sont données dans le tableau 4.8. La sortie du canal est considérée comme une vanne fictive G_4 ayant des caractéristiques identiques aux autres vannes à l'exception des priorités.

Vanne	$q_{j_{obj}} [m^3/s]$	$q_{j_{min}} [m^3/s]$	$q_{j_{max}} [m^3/s]$	λ_j	μ_j
G_1	0,75	0,02	4	10	10
G_2	1,4	0,1	4,5	10	4
G_3	0,9	0,04	3,5	4	10
G_4	1,1	0,04	3	—	—

TAB. 4.8 – Caractéristiques des vannes du bief étudié.

La modélisation du bief nécessite la connaissance de ses caractéristiques géométriques, fournies dans le tableau 4.9.

Le scénario mis en œuvre pour illustrer le fonctionnement du simulateur est tel que le débit objectif $Q_{M_1_{obj}}$ est égal à $4,1 m^3/s$. Les débits objectif des vannes sont donnés

Tronçon	B [m]	m_b	X [m]	n	i	Q_{\min} [m^3/s]	Q_{\max} [m^3/s]
1	5,73	0,79	204	0,02	0,07 %	0,02	3,6
2	5,09	0,96	702	0,02	0,07 %	0,1	4,5
3	5,21	0,95	562	0,02	0,06 %	0,04	3,5
4	3,72	0,94	1360	0,02	0,05 %	0,04	3

TAB. 4.9 – Caractéristiques géométriques des tronçons du bief étudié.

dans le tableau 4.8. Les perturbations correspondent à des excédents et des manques autour de Q_{M_1obj} (figure 4.15.a). Les tronçons du canal sont modélisés autour du point de fonctionnement correspondant à Q_{M_1obj} de façon à identifier les temps de transfert utilisés lors de l’accommodation de la commande. La plage de fonctionnement du canal lors de ce scénario est telle qu’un seul modèle est pris en compte pour chaque tronçon.

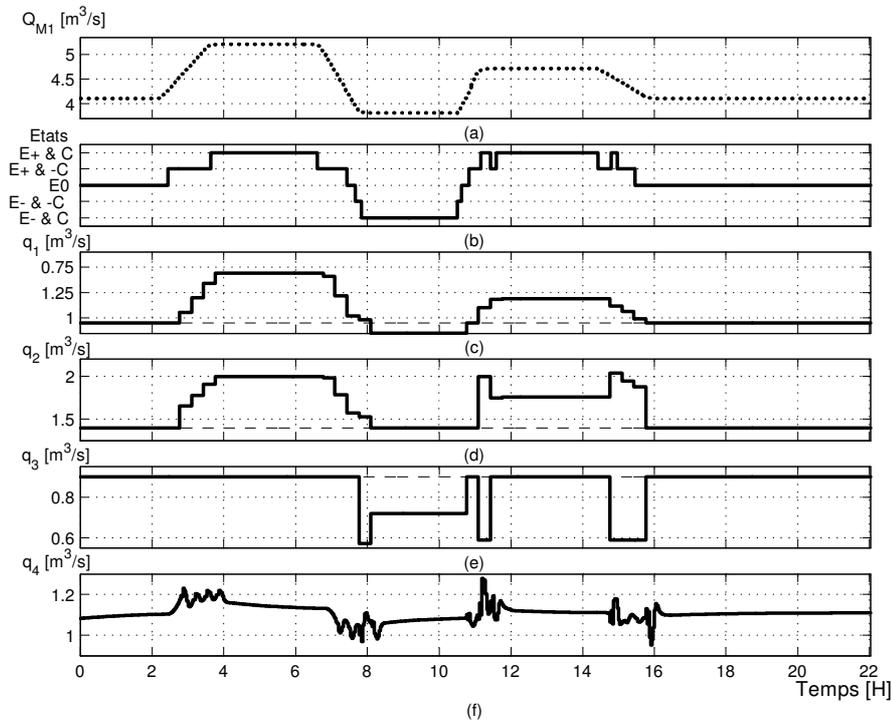


FIG. 4.15 – Débits mesurés au niveau (a) de M_1 , (b) diagnostic de l’état de la ressource, répartition de la ressource sur (c) G_1 , (d) G_2 , et (e) G_3 , et (f) débits en G_4 .

L’état de la ressource en M_1 est diagnostiqué à chaque nouvelle mesure (figure 4.15.b), puis les écarts de débits sont répartis sur les vannes aval en fonction de leurs priorités (figures 4.15.c, 4.15.d et 4.15.e). Le débit résiduel en bout de canal est représenté sur la figure 4.15.f. Les résultats obtenus montrent le bon fonctionnement de notre simulateur, utilisé dans la partie suivante pour évaluer la stratégie de conduite réactive sur le canal

de la Neste.

4.8 Evaluation de la stratégie de conduite réactive du canal de la Neste

Le canal de la Neste (4.16) a été modélisé sous SIC à partir de ses caractéristiques géométriques et des conditions aval correspondant à la courbe de tarage de la vanne G_8 en bout de canal.

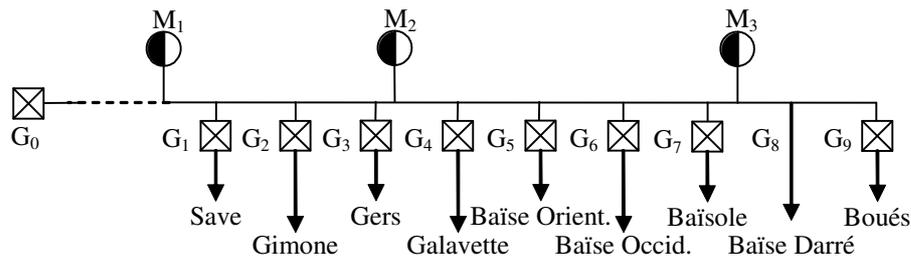


FIG. 4.16 – Schématisation du canal de la Neste.

La stratégie de conduite réactive est implantée sous Matlab/Simulink. La stratégie de conduite réactive est évaluée sur différents scénarios de perturbations caractéristiques du fonctionnement du canal de la Neste, grâce à l'utilisation du simulateur proposé.

Scénario d'évaluation 1

Le débit mesuré en M_1 correspond à un débit de fonctionnement de $11,1 \text{ m}^3/\text{s}$ (figure 4.17.a). Les débits objectifs des vannes et les priorités qui leur sont associées sont donnés dans le tableau 4.10.

Les temps de transfert entre chaque tronçon pour leur point de fonctionnement sont déterminés grâce à la multimodélisation du canal. Ils sont utilisés lors de l'affectation des consignes aux vannes.

Vanne	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6	G_7	G_8	G_9
$q_{j_{obj}} [\text{m}^3/\text{s}]$	2	3,2	1,8	0,1	0,7	1,2	0,8	0,3	1
λ_j	4	4	10	1	1	10	4	–	10
μ_j	10	4	4	1	10	4	10	–	10

TAB. 4.10 – Débits objectifs $q_{j_{obj}}$ et priorités positives λ_j et négatives μ_j des vannes.

Le canal subit dès la deuxième heure de simulation un manque d'eau de $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$, puis un manque d'eau de $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ jusqu'à la huitième heure. Par la suite, un excédent d'eau de $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$ est mesuré jusqu'à la douzième heure. Une deuxième période durant

laquelle l'eau est en excès ($0,4 \text{ m}^3/\text{s}$) se situe entre la quatorzième et la seizième heure. Finalement un manque d'eau de $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$ perturbe le canal jusqu'à la vingtième heure. Les débits mesurés au niveau des limnimètres M_1 , M_2 et M_3 sont présentés, lorsque la stratégie de conduite réactive est utilisée (trait continu) et lorsqu'elle ne l'est pas (trait pointillé), sur la figure 4.17.

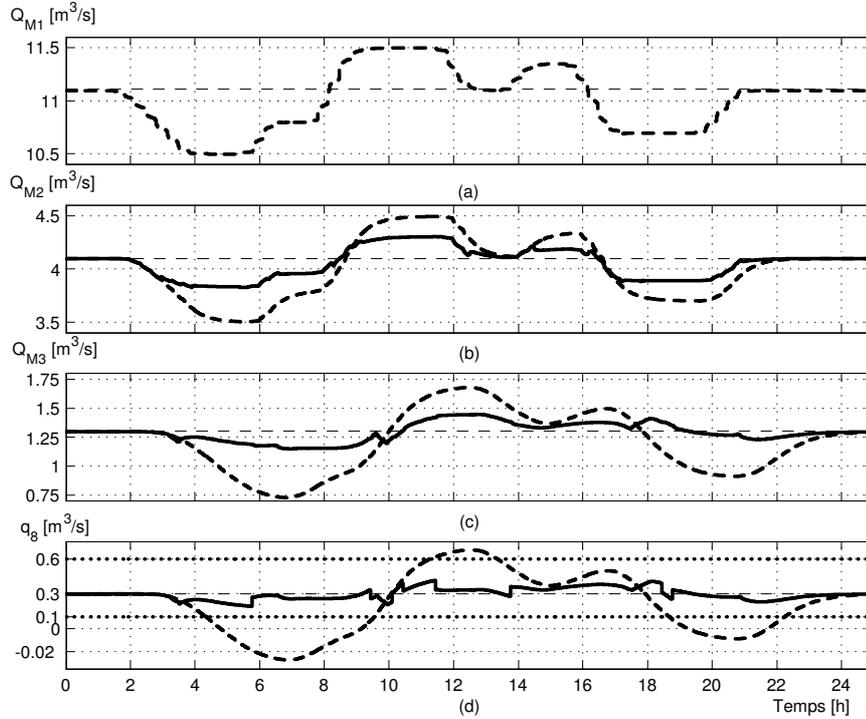


FIG. 4.17 – Débits mesurés avec (—) et sans (- - -) utilisation de la stratégie de conduite au niveau (a) de M_1 , (b) de M_2 , (c) de M_3 et (d) débit en G_8 .

L'utilisation de la stratégie de conduite permet la répartition des perturbations entre les vannes tout en conservant le débit en bout de canal proche de son objectif. Les débordements et les assèchements en bout de canal sont également évités puisque le débit q_8 reste à l'intérieur des débits minimum et maximum (trait discontinu). Lorsqu'aucune stratégie de conduite n'est utilisée, le débit en bout de canal est très éloigné de son objectif. Le canal subit de surcroît deux périodes d'assèchement et une période de débordement. Les débits négatifs représentés sur la figure 4.17.d ne correspondent pas à une réalité physique, et sont issus des résultats de simulation. Dans ce cas, le débit en q_8 correspond à $0 \text{ m}^3/\text{s}$.

La consigne de débit en bout de canal est respectée grâce à l'utilisation de la stratégie de conduite réactive qui permet la supervision de l'état de la ressource et l'accommodation des commandes envoyées aux vannes pour palier aux conséquences des perturbations. Les débits mesurés, le diagnostic de l'état de la ressource et les commandes envoyées aux vannes sont présentés pour chaque bief sur les figures 4.18, 4.19 et 4.20.

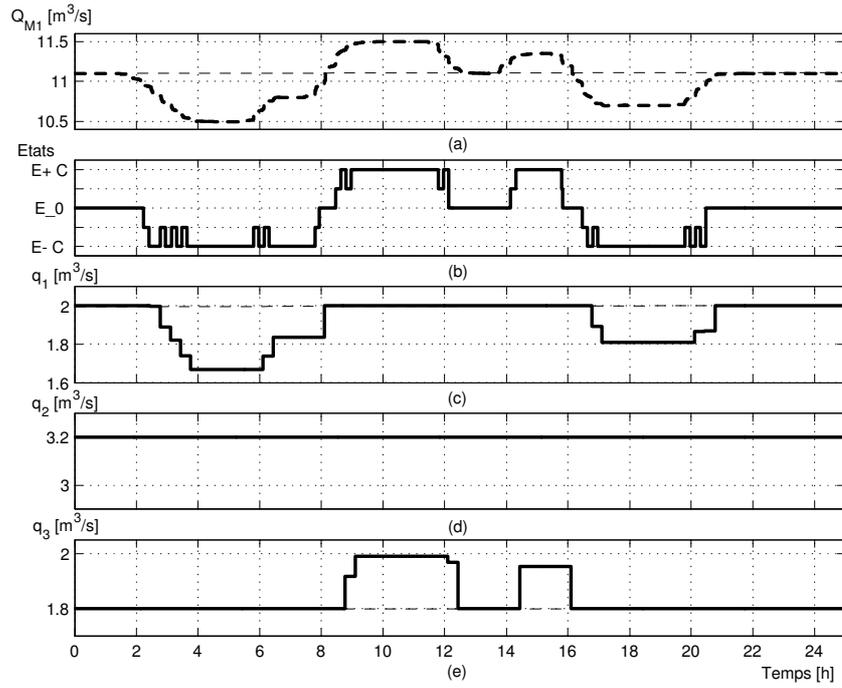


FIG. 4.18 – Débits mesurés au niveau (a) de M_1 , (b) diagnostic de l'état de la ressource, débits de consigne de (c) G_1 , (d) G_2 , et (e) G_3 .

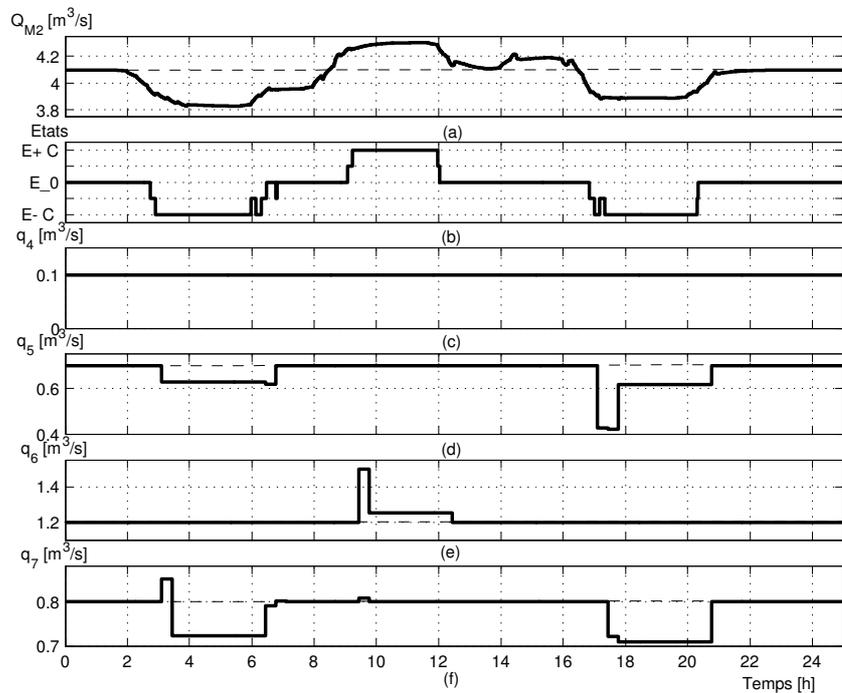


FIG. 4.19 – Débits mesurés au niveau (a) de M_2 , (b) diagnostic de l'état de la ressource, débits de consigne de (c) G_4 , (d) G_5 , (e) G_6 et (f) G_7 .

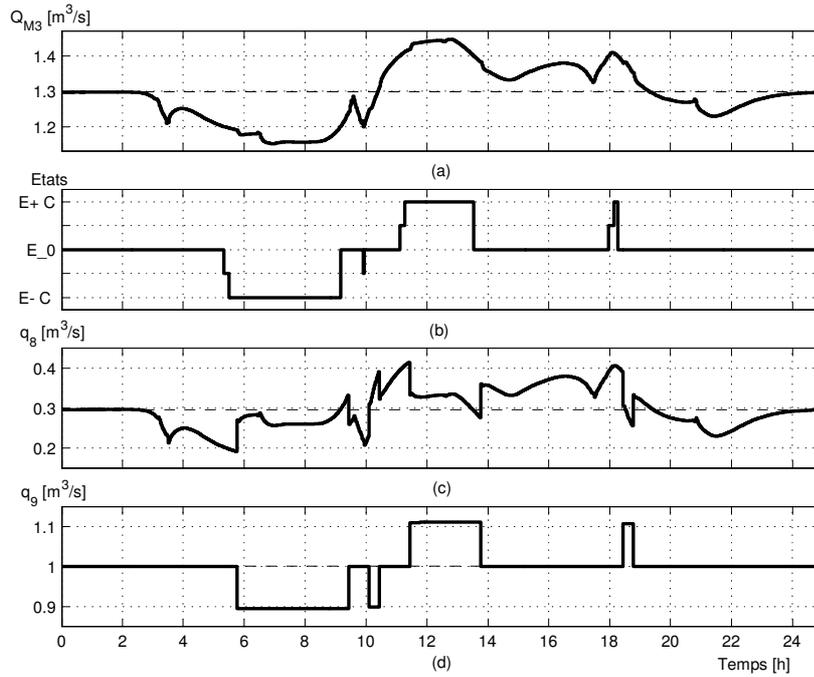


FIG. 4.20 – Débits mesurés au niveau (a) de M_3 , (b) diagnostic de l'état de la ressource, débit en bout de canal (c) G_8 et (d) débit de consigne de G_9 .

Les manques d'eau diagnostiqués à partir de la 2^{ème} heure au niveau de M_1 sont répartis sur les vannes de plus grande priorité négative G_1 , G_5 , G_7 et G_9 , et les excédents d'eau diagnostiqués après la 8^{ème} heure sont répartis sur les vannes de plus grande priorité positives G_3 , G_6 et G_9 . La démarche est identique pour les deux biefs suivants. Ainsi, les manques d'eau diagnostiqués au niveau de M_1 sont répartis sur les vannes G_5 , G_7 et G_9 . Les indicateurs de performances définis précédemment sont calculés à partir des résultats de simulation obtenus afin de juger de l'efficacité de la stratégie de conduite réactive. Ils sont comparés à ceux obtenus lorsqu'aucune stratégie de conduite n'est utilisée (tableau 4.11).

Critères	Sans stratégie	Avec stratégie
Bat	0	135
$V_m [m^3]$	-18600	-3960
$V_M [m^3]$	5760	1913
$V_T [m^3]$	24360	5873
$F_{\max} [m^3/s]$	0,678	0,43
$F_{\min} [m^3/s]$	-0,407	0,2

TAB. 4.11 – Critères de comparaison sans et avec stratégie de conduite.

L'agitation du débit q_8 représenté sur la figure 4.20.c provient, d'une part, de la faible distance entre G_8 et G_9 et d'autre part, au fait que les commandes simulées ne sont pas appliquées progressivement.

L'utilisation de la stratégie de conduite réactive permet une économie d'environ 18500 m^3 d'eau en 25 heures, avec une moyenne de 5 vannes commandées par heure et une absence de débordement et d'assèchement en bout de canal. Les résultats obtenus lors de la simulation de ce scénario de perturbations montre l'efficacité de la stratégie proposée. Nous souhaitons cependant évaluer la stratégie sur un deuxième scénario de perturbations.

Scénario d'évaluation 2

Le canal de la Neste est perturbé en amont de M_1 et en amont de la vanne G_7 par le rejet des eaux utilisées par des industries (figure 4.21). L'occurrence de ces rejets provoque, grâce à la régulation locale des vannes, la fermeture automatique des vannes G_5 et G_6 et induit uniquement un excédent d'eau en aval de G_6 . Cet excédent d'eau ne peut être mesuré qu'en M_3 et donc réparti sur la vanne G_8 . Il serait cependant intéressant d'acheminer cet excédent d'eau vers la vanne G_7 qui alimente la Baïsole et le barrage de coteaux de Puydarrieux en aval, de façon à le stocker et ainsi valoriser la ressource.

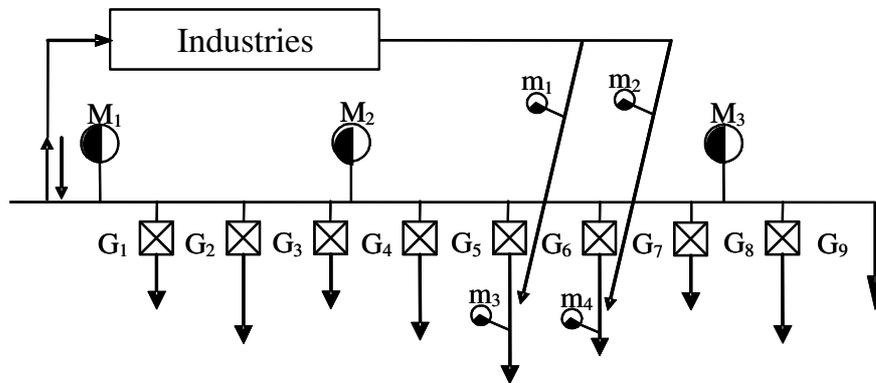


FIG. 4.21 – Canal de la Neste perturbé en amont de M_1 et de G_7 .

Les rejets des activités industrielles sont mesurés au niveau des points de mesure de m_1 à m_4 . Afin de les acheminer vers G_7 , une première méthode consiste à considérer un point de mesure fictif M'_4 en aval de G_6 (figure 4.22). L'avantage de cette approche est de pouvoir utiliser la stratégie de conduite réactive de façon identique pour les débits mesurés en M_1 , M_2 , M'_4 et M_3 .

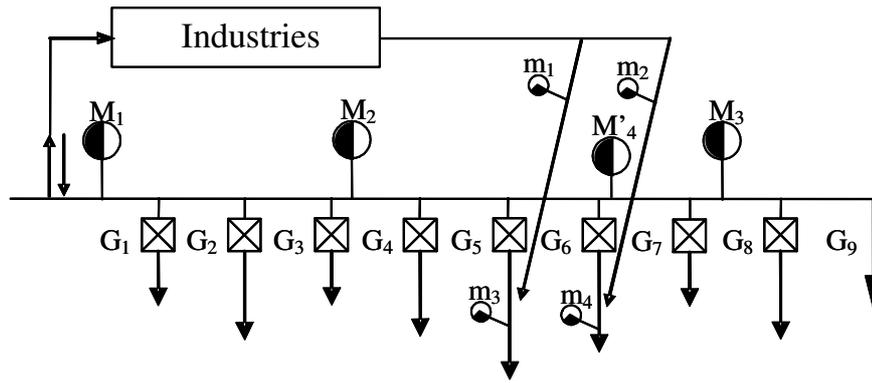


FIG. 4.22 – Canal de la Neste équipé d'un point de mesure fictif M'_4 .

Le point de mesure M'_4 étant un point de mesure fictif, il est nécessaire d'évaluer la valeur des débits qu'il devrait mesurer. L'évaluation de la valeur des débits est réalisée à partir des débits mesurés en M_2 , m_1 , m_2 , m_3 et m_4 , et des consignes appliquées aux vannes G_4 , G_5 et G_6 en tenant compte des temps de transfert (4.2).

$$Q_{M'_4,k} = \left(Q_{M_2,(k-T_{M_2,6})} - \sum_{r=4}^6 q_{r,(k-T_{qr,6})} \right) + q_{m_1,(k-T_{m_1,5})} + q_{m_2,(k-T_{m_2,6})} \quad (4.2)$$

où $T_{i,j}$ est le temps de transfert entre le point i et le point j .

L'utilisation d'un point de mesure fictif est intéressante car elle ne nécessite aucune adaptation de la stratégie de conduite. Elle rencontre cependant une difficulté qui réside dans l'évaluation de la valeur des débits en M'_4 . En effet, cette évaluation est soumise aux imprécisions sur toutes les mesures, sur les valeurs des consignes des vannes, et surtout sur les temps de transfert. Compte tenu de l'imprécision importante rencontrée lors de l'évaluation des débits en M'_4 , cette méthode n'a pas été implantée.

Une deuxième approche consiste à considérer un affluent fictif permettant l'acheminement des excédents d'eau vers G_7 (figure 4.23).

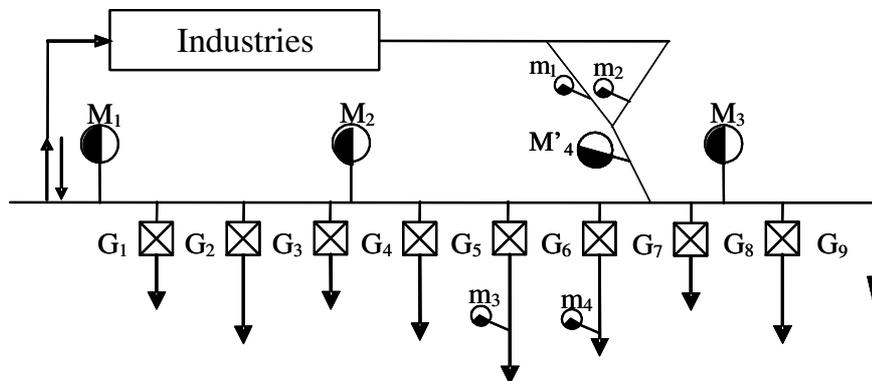


FIG. 4.23 – Implantation d'un affluent fictif en amont de G_7 .

Les excédent d'eau sont mesurés au niveau du seuil de mesure fictif M'_4 et les règles de répartition de la ressource définies pour le cas de confluence de deux cours d'eau présentées au chapitre 2, peuvent être appliquées. Les écarts de débit mesurés en M_1 sont répartis sur les vannes de plus haute priorité de G_1 à G_8 , ceux mesurés en M_2 sont répartis sur les vannes de G_4 à G_8 , ceux mesurés en M_3 sont répartis sur G_8 , et finalement ceux mesurés en M'_4 sont répartis sur les vannes de G_7 et G_8 . Les consignes issues de la répartition des écarts de débit à partir de M_1 et M_2 sont additionnées avec celles issues de la répartition des écarts de débit à partir de M'_4 pour les vannes G_7 et G_8 . De même, les consignes issues de la répartition des écarts de débit à partir de M_3 sont additionnées avec celles issues de la répartition des écarts de débit à partir de M'_4 pour la vanne G_8 .

Pour ce scénario, le débit mesuré en M_1 correspond à un point de fonctionnement de $4,11 \text{ m}^3/\text{s}$. Il est présenté sur la figure 4.24.a. Les débits objectifs des vannes et leurs priorités sont présentées dans le tableau 4.12. Ces paramètres ont été volontairement choisis différents de ceux du scénario 1 afin de tester la stratégie de conduite réactive dans une autre configuration.

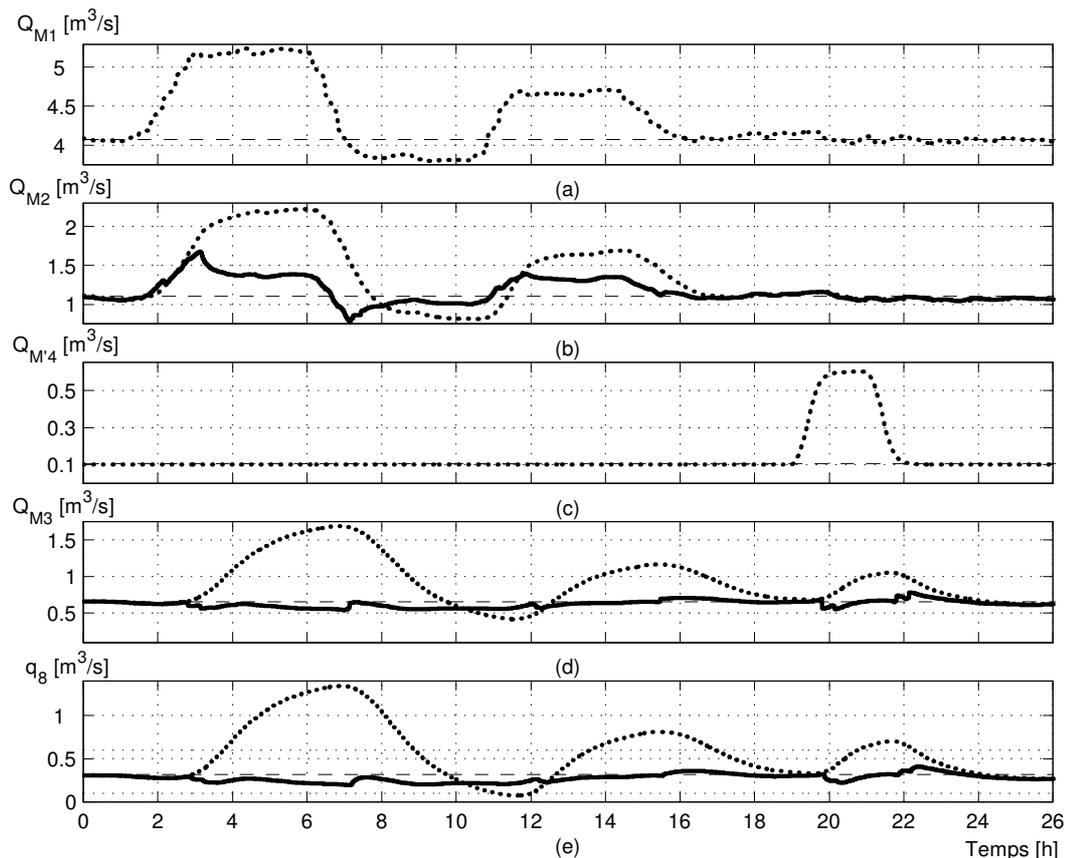


FIG. 4.24 – Débits mesurés avec (—) et sans (- -) utilisation de la stratégie de conduite au niveau (a) de M_1 , (b) de M_2 , (c) de M'_4 , (d) de M_3 et (e) débit en bout de canal en G_8 .

Vanne	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6	G_7	G_8	G_9
$q_{j_{obj}} [m^3/s]$	0,7	1,4	0,9	0,05	0,1	0,15	0,16	0,35	0,3
λ_j	10	10	4	10	1	1	10	—	4
μ_j	10	4	10	1	4	10	1	—	4

TAB. 4.12 – Débits objectifs $q_{j_{obj}}$ et priorités positives λ_j et négatives μ_j des vannes.

Le canal est soumis à un premier lâcher de $1,1 m^3/s$ entre la troisième et la huitième heure, et à un deuxième de $0,6 m^3/s$ entre la douzième et la dix-septième heure. Un prélèvement de $0,3 m^3/s$ est également réalisé entre la huitième et la douzième heure. Finalement, un rejet des eaux utilisées par des industries de $0,5 m^3/s$ est réalisé entre la dix-huitième heure et la vingt-et-unième heure.

Les débits mesurés au niveau des limnimètres M_2 , M'_4 et M_3 sont représentés respectivement sur la figure 4.24. b, 4.24. c et 4.24. d, en trait continu lorsque la stratégie de conduite réactive est utilisée et en trait pointillé lorsqu'elle ne l'est pas. La même convention de représentation est utilisée pour le débit en bout de canal q_8 sur la figure 4.24. e.

Les résultats de simulation de ce second scénario montrent de nouveau l'efficacité de la stratégie de conduite réactive proposée. Les quantités d'eau en manque et en excès sont réparties sur toutes les vannes de façon à éviter l'assèchement et le débordement du canal au niveau de G_8 . Le débit q_8 reste proche de son objectif durant toute la simulation. Les rejets des industries sont également répartis sur la vanne G_7 , ce qui contribue à la diminution de l'amplitude du débit mesuré en M_3 .

Lorsqu'aucune stratégie n'est utilisée, le canal subit trois périodes de débordement et une période d'assèchement en bout de canal. Pour chaque bief, les débits mesurés, le diagnostic de l'état de la ressource et les commandes envoyées aux vannes sont présentés sur les figures 4.25, 4.26 et 4.28.

Le débit mesuré au niveau du point de mesure fictif M'_4 , le diagnostic de la ressource ainsi que les débits de consigne calculés sont représentés sur la figure 4.27. Sur la figure 4.26.f, les débits de consigne issus de la répartition à partir de M_2 et de M'_4 sont présentés respectivement en trait discontinu et en trait alterné. Le débit de consigne envoyé à la vanne q_7 est représentée sur la figure 4.26.g. Ce dernier est égal à la somme des deux autres. L'excédent d'eau provenant des rejets des industries est acheminé vers la vanne G_7 (figure 4.27.c).

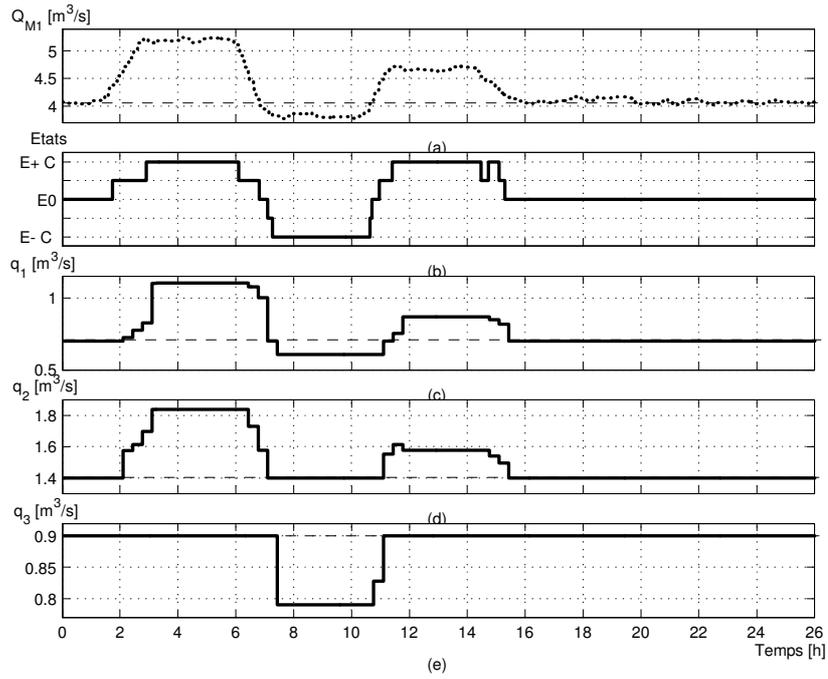


FIG. 4.25 – Débits mesurés au niveau (a) de M_1 , (b) diagnostic de l'état de la ressource, répartition de la ressource sur (c) G_1 , (d) G_2 , et (e) G_3 .

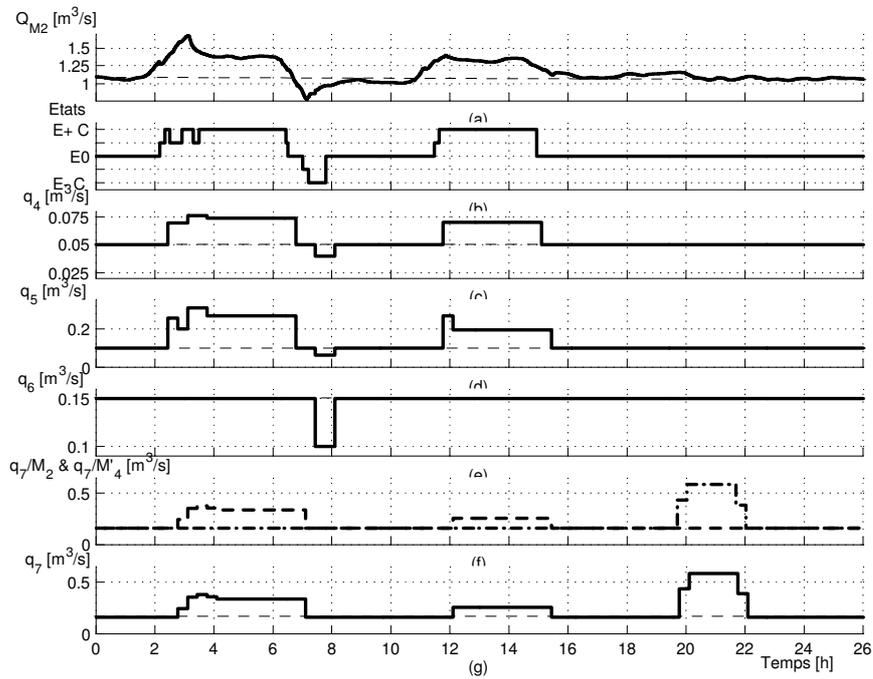


FIG. 4.26 – Débits mesurés au niveau (a) de M_2 , (b) diagnostic de l'état de la ressource, répartition de la ressource sur (c) G_4 , (d) G_5 , (e) G_6 , (f) répartition de l'écart de débit depuis M_2 (- -) et depuis M'_4 (-.-) et répartition de la ressource sur (g) G_7 .

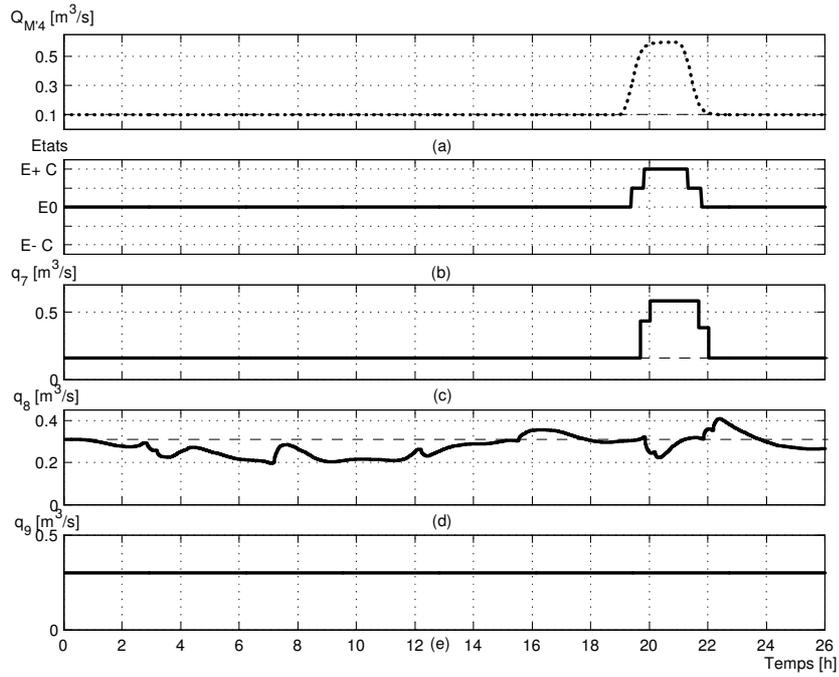


FIG. 4.27 – Débits mesurés au niveau (a) de M'_4 , (b) diagnostic de l'état de la ressource, (c) répartition de la ressource sur G_7 , (d) débit résiduel en G_8 et (e) répartition de la ressource sur G_9 .

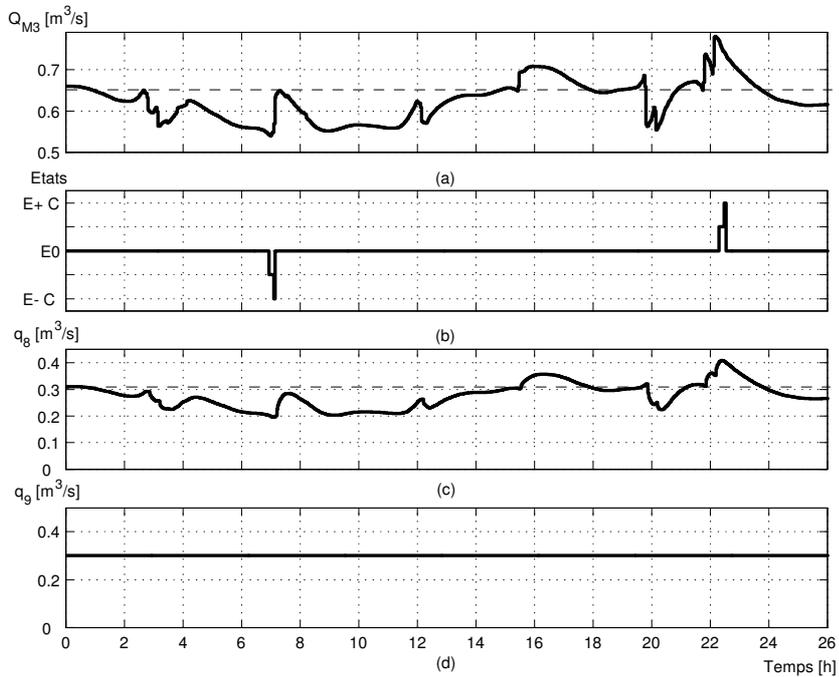


FIG. 4.28 – Débits mesurés au niveau (a) de M_3 , (b) diagnostic de l'état de la ressource, (c) débit résiduel en G_8 et (d) répartition de la ressource sur G_9 .

Les indicateurs de performances sont calculés à partir des résultats de simulation obtenus (tableau 4.13).

Critères	Sans stratégie	Avec stratégie
Bat	0	61
$V_m [m^3]$	-1718	-3061
$V_M [m^3]$	25591	850
$V_T [m^3]$	27309	3911
$F_{\max} [m^3/s]$	1,36	0,42
$F_{\min} [m^3/s]$	0,05	0,21

TAB. 4.13 – Critères de comparaison sans et avec stratégie de conduite.

Lors de ce scénario, l'utilisation de la stratégie de conduite réactive conduit à une économie d'environ $23500 m^3$ d'eau en 26 heures, avec une moyenne de 2 vannes commandées par heure et une absence de débordement et d'assèchement en bout de canal. L'implantation de l'affluent fictif conduit également à l'acheminement vers la vanne G_7 de près de 80% des rejets des industries, soit une économie d'environ $3,5 m^3$ d'eau sur les $4,5 m^3$ d'eau rejetée pendant cette période.

Les résultats de simulation obtenus permettent de conclure sur les apports de la stratégie de conduite pour la valorisation de la ressource en eau. Il serait cependant préférable de la tester sur d'autres scénarios de fonctionnement du canal avant d'envisager son implantation sur le système réel. Le simulateur associant Matlab et SIC que nous avons conçu est assez facilement paramétrable. Ainsi, il offre la possibilité de simuler d'autres scénarios de fonctionnement du canal et de perturbations.

Dans la partie suivante, la stratégie de conduite est utilisée dans le cadre d'un réseau hydrographique plus complexe composé d'un confluent et d'un défluent. L'évaluation de la stratégie pour ce système permettra de conclure sur l'efficacité de la stratégie proposée dans un cadre générique de systèmes hydrographiques.

4.9 Cas d'un réseau intégrant un confluent et un défluent

Nous souhaitons maintenant évaluer la stratégie de supervision et d'accommodation de la commande sur un réseau hydrographique plus complexe que le canal de la Neste. Nous avons vu au chapitre 2 que le maillage d'un réseau hydrographique peut être décrit en considérant les confluent et les défluent. L'exemple d'un canal composé d'un confluent puis d'un défluent est pris en considération (figure 4.29).

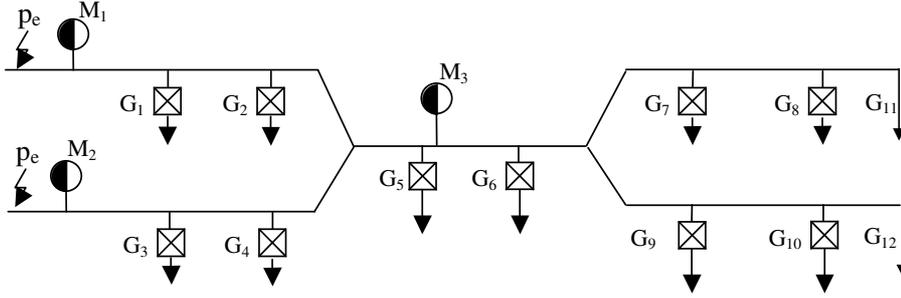


FIG. 4.29 – Réseau hydrographique composé d'un confluent et d'un défluent.

Le réseau est équipé de 10 vannes, de G_1 à G_{10} , et de 3 points de mesure M_1 , M_2 et M_3 . Il est perturbé en amont de M_1 et de M_2 . Les perturbations en amont de M_1 sont réparties sur toutes les vannes exceptées G_3 et G_4 , et les perturbations en amont de M_2 sont réparties sur toutes les vannes exceptées G_1 et G_2 . Le débit en aval de la vanne G_6 alimente le bras équipé des vannes G_7 et G_8 selon une proportion w_{d_1} et le bras équipé des vannes G_9 et G_{10} selon une proportion w_{d_2} . La proportion w_{d_1} est choisie égale à 0,75 et celle w_{d_2} à 0,25 de telle façon que leur somme soit égale à 1. Les écarts de débits détectés en M_3 sont répartis sur les vannes de G_6 à G_{10} en tenant compte des proportions w_{d_1} pour les vannes G_7 et G_8 et w_{d_2} pour les vannes G_9 et G_{10} .

Les caractéristiques des dix vannes du canal, leurs débits objectif et d'alimentation minimal $q_{j \min}$ et maximal $q_{j \max}$, ainsi que leurs priorités sont fournies dans le tableau 4.14. Les extrémités du canal sont considérées comme des vannes fictives G_{11} et G_{12} . Elles ont des caractéristiques aux vannes manœuvrables.

Vanne	$q_{j \text{obj}}$ [l/s]	$q_{j \min}$ [l/s]	$q_{j \max}$ [l/s]	λ_j	μ_j
G_1	300	50	850	10	4
G_2	400	100	900	4	10
G_3	500	150	1200	4	4
G_4	600	100	1400	10	10
G_5	400	100	900	10	10
G_6	500	50	1800	10	10
G_7	300	50	750	4	4
G_8	400	100	800	10	10
G_9	100	50	600	10	10
G_{10}	100	50	500	4	4
G_{11}	275	50	600	–	–
G_{12}	125	50	300	–	–

TAB. 4.14 – Caractéristiques des vannes.

Les profils de chacune des branches du réseau sont de forme trapézoïdale. Pour les raisons évoquées lors de la modélisation du canal de la Neste, il est nécessaire de considérer les tronçons de canal. Les 15 tronçons pris en compte pour la modélisation sont présentés sur la figure 4.30. leurs caractéristiques sont données dans le tableau 4.15.

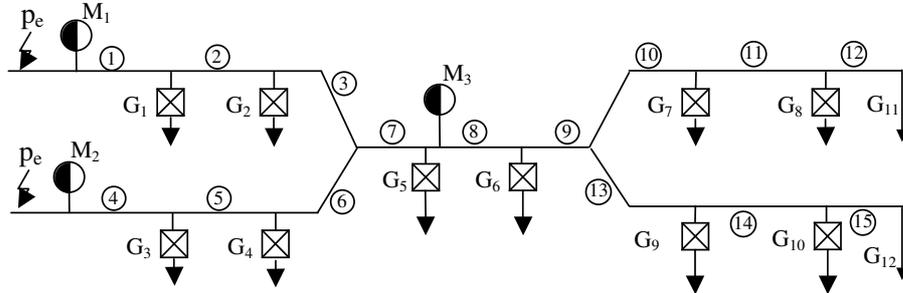


FIG. 4.30 – Tronçons considérés pour la modélisation du réseau hydrographique.

Tronçon	B [m]	m_b	X [m]	n	i	Q_{\min} [m^3/s]	Q_{\max} [m^3/s]
1	4	0,94	1500	0,02	0,10 %	0,5	7
2	4	0,94	1000	0,02	0,10 %	0,4	6,5
3	4	0,94	800	0,02	0,10 %	0,4	6
4	4,5	0,9	1000	0,02	0,15 %	0,7	8
5	4,5	0,9	1500	0,02	0,15 %	0,7	7,5
6	4,5	0,9	600	0,02	0,15 %	0,5	6,7
7	6	0,95	500	0,02	0,12 %	0,6	5,5
8	5,8	0,95	2000	0,02	0,15 %	0,5	4,5
9	5,8	0,95	500	0,02	0,15 %	0,3	3,5
10	3	0,95	750	0,02	0,05%	0,2	2
11	3	0,95	1000	0,02	0,05%	0,2	1,5
12	3	0,95	250	0,02	0,05%	0,1	0,6
13	2	0,9	800	0,02	0,07%	0,2	1,5
14	2	0,9	1500	0,02	0,07%	0,2	1
15	2	0,9	200	0,02	0,07%	0,1	0,3

TAB. 4.15 – Caractéristiques géométriques des tronçons du réseau.

L'approche de multimodélisation selon les coefficients de célérité permet l'identification de la dynamique des tronçons par des bancs de modèles (chapitre 3). Les résultats sont présentés en Annexe 3. Le pourcentage d'erreur sur le coefficient de célérité est pris comme étant égal à $\Pi_C = 10$ %.

La dynamique du réseau hydrographique étant modélisée, il a été soumis à des perturbations en amont de M_1 (figure 4.31.a) et en amont de M_2 (figure 4.31.b). La stratégie de conduite a été utilisée afin de valoriser la ressource en eau. Les résultats obtenus par simulation sont présentés sur la figure 4.31 en trait continu (—) lorsque la stratégie de conduite est utilisée et en trait pointillé (...) lorsqu'elle ne l'est pas. Une partie des perturbations est répartie sur les vannes de G_1 à G_5 (figure 4.31.c). L'utilisation de la stratégie de conduite permet de conserver les débits en bout de canal, q_{11} et q_{12} proches de leur objectif (figure 4.31.d et 4.31.e), tout en évitant les débordements et les assèchements. Les débits en bout de canal q_{11} et q_{12} restent à l'intérieur de leurs débits limites. Ce n'est pas le cas lorsqu'aucune stratégie de conduite n'est utilisée.

Le réseau hydrographique subit alors deux périodes de débordement et une période d'assèchement à ses extrémités. Les débits mesurés, le diagnostic de l'état de la ressource et les commandes envoyées aux vannes lorsque la stratégie de conduite est utilisée sont présentés sur les figures 4.32, 4.33 et 4.34 pour chaque bief. L'état de la ressource en M_1 est diagnostiqué, puis les écarts de débit sont répartis sur les vannes G_1 , G_2 et G_5 .

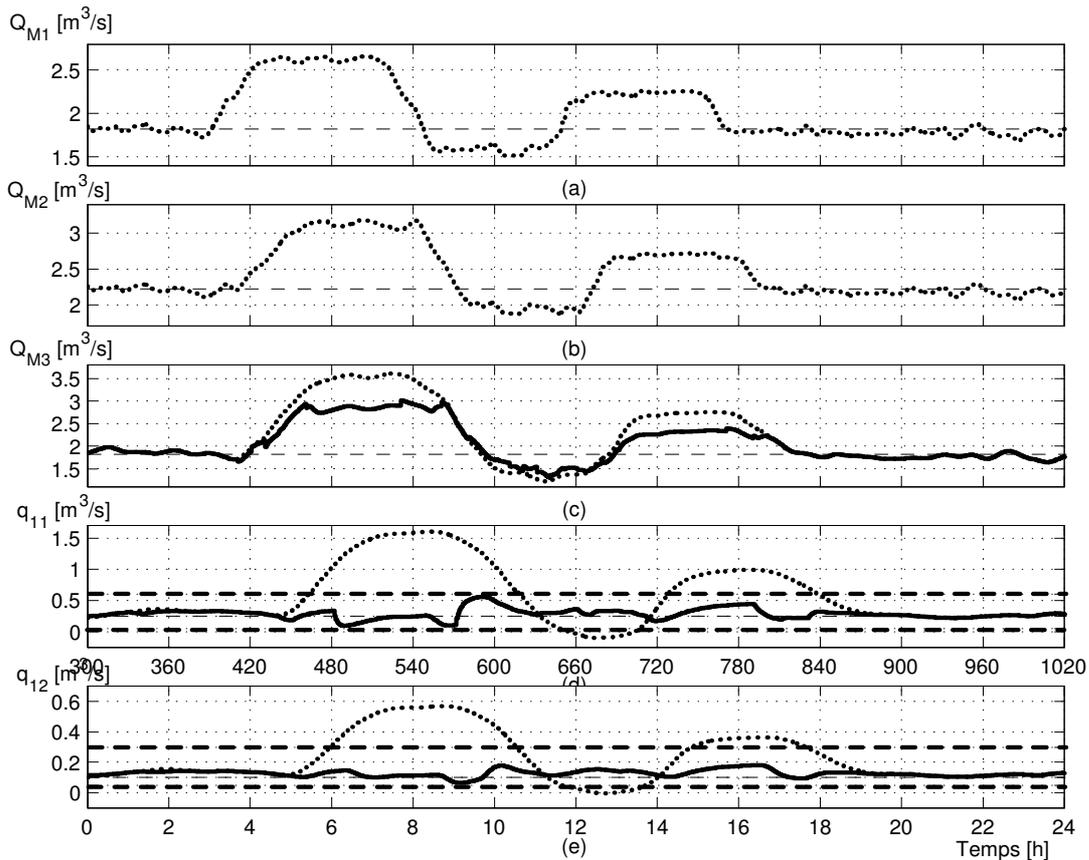


FIG. 4.31 – Débits mesurés avec (—) et sans (- - -) utilisation de la stratégie de conduite au niveau (a) de M_1 , (b) de M_2 , (c) de M_3 et débits résiduels (d) en G_{11} et (e) en G_{12} .

Les consignes envoyées sur la vanne G_5 ont la particularité d'être issues de la répartition à partir de M_1 et de M_2 . Ainsi, les consignes issues de la répartition à partir de M_1 sont représentées en trait discontinu (- - -) sur la figure 4.32.e. De la même façon, l'état de la ressource en M_2 est diagnostiqué, puis les écarts de débit sont répartis sur les vannes G_3 , G_4 et G_5 . Les consignes issues de la répartition à partir de M_2 sont représentées en trait discontinu sur la figure 4.33.e.

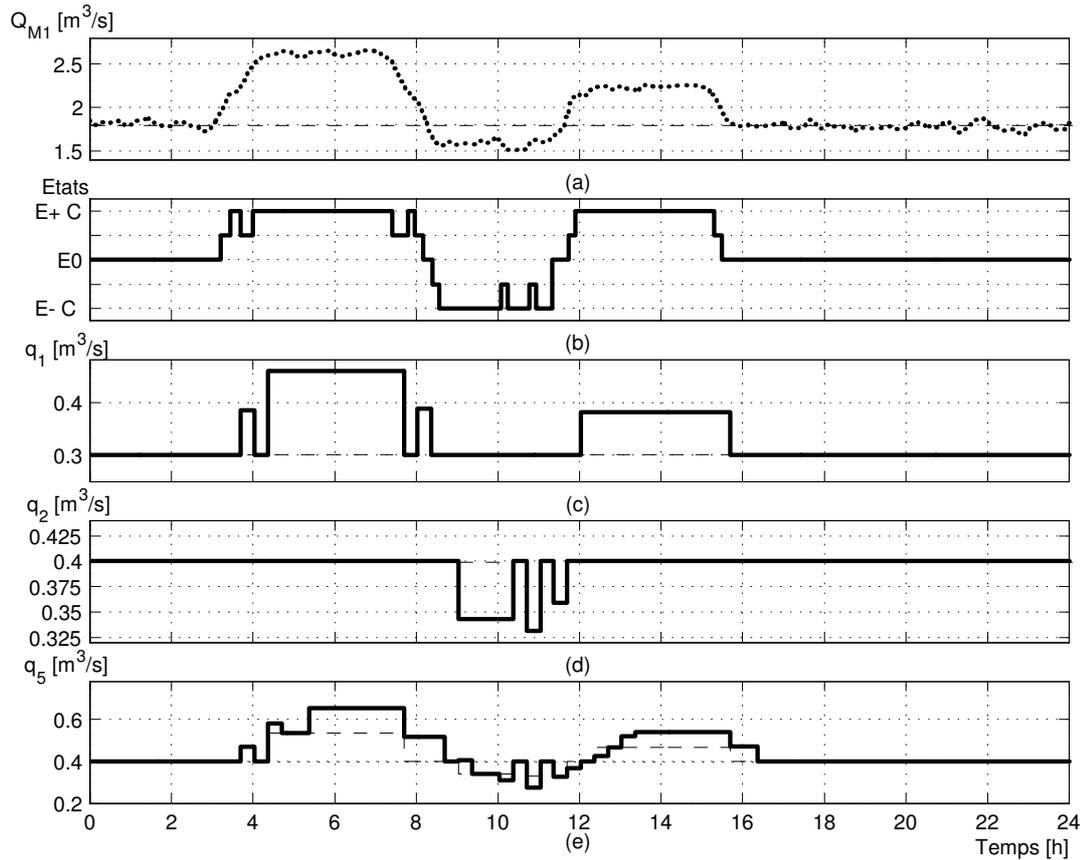


FIG. 4.32 – Débits mesurés au niveau (a) de M_1 , (b) diagnostic de l'état de la ressource, répartition de la ressource sur (c) G_1 , sur (d) G_2 et sur (e) G_5 .

Les consignes envoyées à la vanne G_5 en trait continu sur les figures 4.32.e et 4.33.e, résultent de l'addition des consignes calculées à partir de M_1 et de M_2 . Le débit mesuré en M_3 est diagnostiqué, puis les écarts de débit sont répartis sur les vannes de G_8 à G_{10} en tenant compte des proportions de débit alimentant chacun des deux bras. A la 5^{ème} heure, l'état de la ressource étant non constant, l'écart de débit est réparti sur la vanne G_8 selon une proportion de 0,75% et sur le vanne G_9 du deuxième bras selon une proportion de 0,25%.

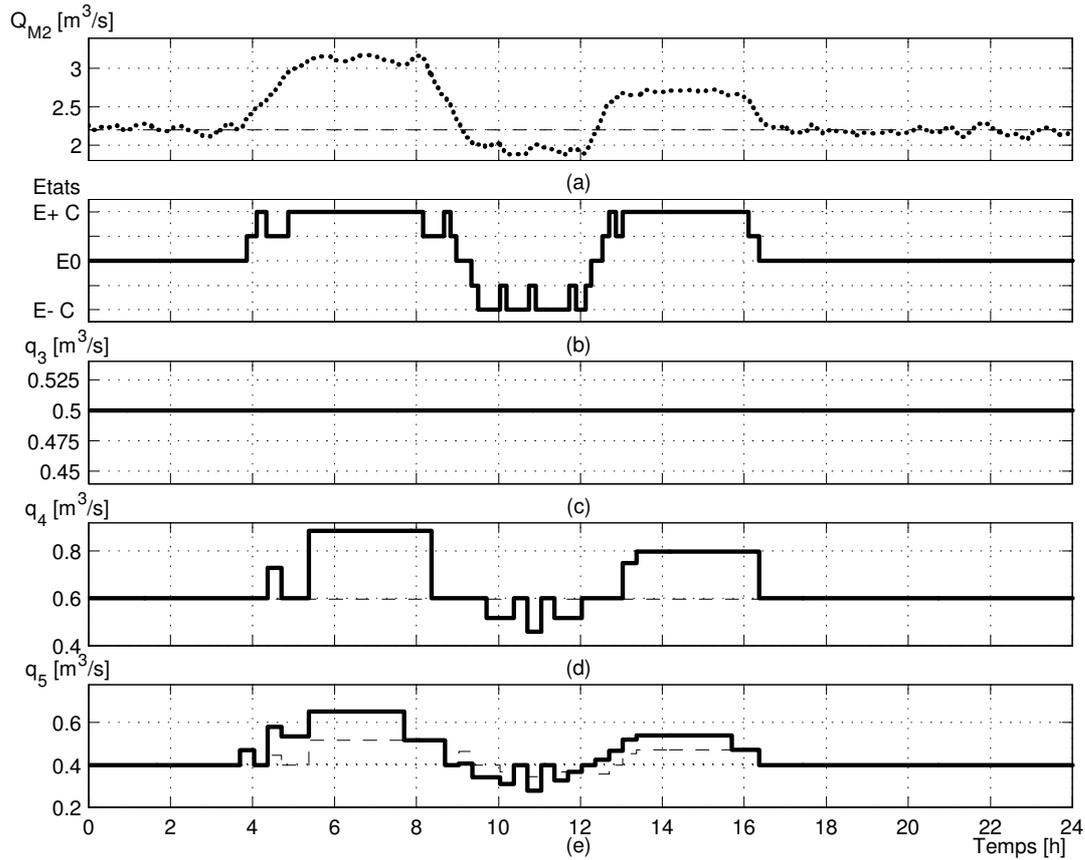


FIG. 4.33 – Débits mesurés au niveau (a) de M_2 , (b) diagnostic de l'état de la ressource, répartition de la ressource sur (c) G_3 , sur (d) G_4 et sur (e) G_5 .

Les critères permettant de juger de l'efficacité de la stratégie de conduite sont calculés pour cette simulation et comparés à ceux obtenus lorsqu'aucune stratégie de conduite n'est utilisée (tableau 4.16).

Critères	Sans stratégie			Avec stratégie		
	G_{11}	G_{12}	Total	G_{11}	G_{12}	Total
Bat	–	–	0	–	–	172
$V_T [m^3]$	20676	8023	28699	10721	3861	14582
$V_M [m^3]$	18242	7315	25557	8776	3228	12004
$V_m [m^3]$	–2434	–708	–3142	–1945	–633	–2578
$F_{\max} [m^3/s]$	1,604	0,569	–	0,557	0,181	–
$F_{\min} [m^3/s]$	–0,103	–0,003	–	0,090	0,064	–

TAB. 4.16 – Critères de comparaison sans et avec stratégie de conduite pour le réseau hydrographique.

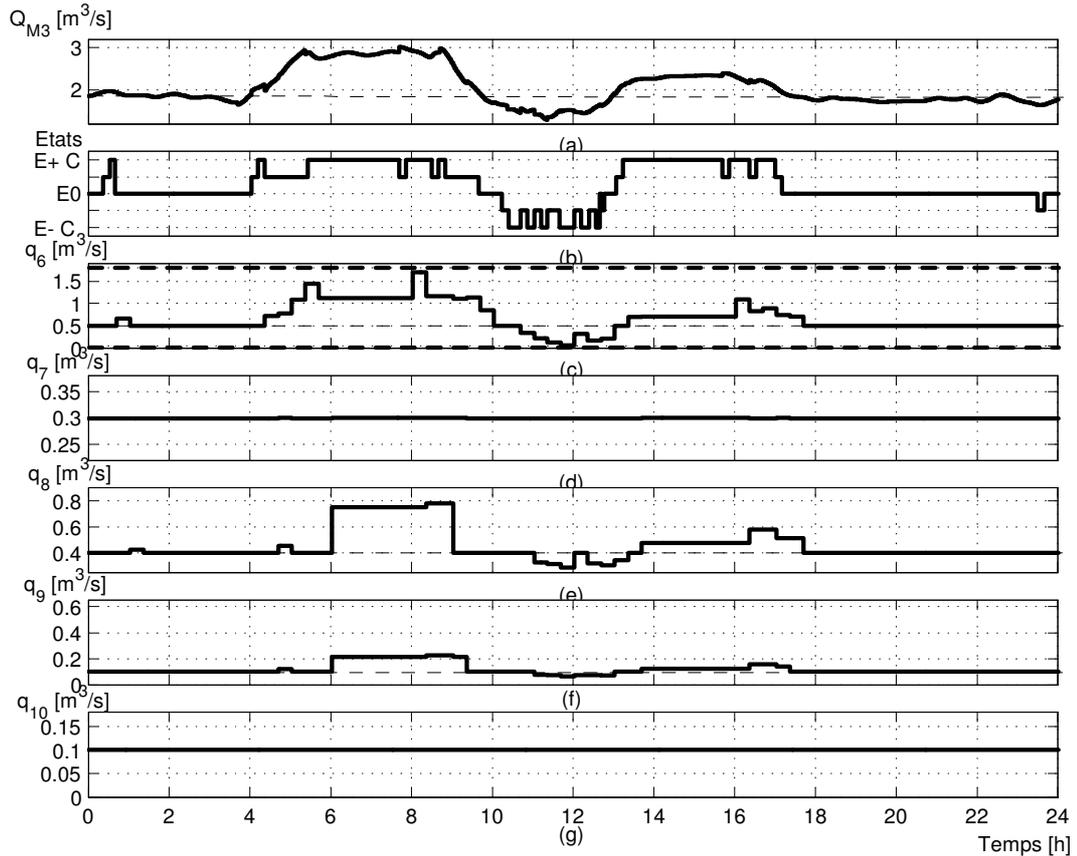


FIG. 4.34 – Débits mesurés au niveau (a) de M_3 , (b) diagnostic de l'état de la ressource, répartition de la ressource sur (c) G_6 , sur (d) G_7 , sur (e) G_8 , sur (f) G_9 et sur (g) G_{10} .

Une économie de 14000 m^3 d'eau en 24 heures est réalisée lorsque la stratégie de conduite est utilisée, avec une moyenne de 7 vannes commandées par heure et une absence de débordement et d'assèchement en bout de canal. Le nombre important de commandes envoyées aux vannes, qui est égal à 172, provient de la répartition de l'écart de débit lorsque l'état de la ressource est non constant. En effet, dans le cas où l'une des vannes de G_7 à G_{10} est sélectionnée pour absorber l'écart de débit, une autre vanne appartenant à l'autre cours d'eau aval est également consignée. Le nombre de commandes envoyées aux vannes est par conséquent plus important que dans le cas d'un réseau sans défluent.

L'application de la stratégie de supervision concourante et d'accommodation hybride de la commande sur un réseau hydrographique composé des configurations élémentaires existantes, à savoir la confluence et la déflueuse, a conduit à une valorisation de la ressource en eau. Les particularités de ces deux configurations de cours d'eau ont été prises en compte lors de la répartition de la ressource, et permettent d'envisager l'application de la stratégie de conduite réactive sur des réseaux hydrographiques réels composés de plusieurs confluent et défluent.

4.10 Conclusion

La stratégie de conduite réactive a été proposée afin de répondre à la problématique de valorisation de la ressource en eau. Elle a été évaluée dans ce chapitre, par simulation dans le cadre de la gestion du canal de la Neste. Le canal de la Neste réalimentant des rivières est équipé de plusieurs capteurs et d'actionneurs. Les capteurs sont utilisés pour réaliser la supervision de l'état de la ressource en différents points du canal. Lorsqu'une différence est détectée entre les débits souhaités et les mesures, une accommodation hybride de la commande est réalisée. Elle permet la génération de nouvelles consignes pour les actionneurs de canal de façon à acheminer ou à répartir la ressource disponible. L'évaluation de la stratégie de conduite a nécessité la proposition d'un simulateur de la dynamique du système. Nous avons opté pour l'utilisation d'un logiciel de résolution numérique des équations de Saint-Venant. Les paramètres des fonctions utilisées pour la supervision et l'accommodation de la commande ont été sélectionnés par simulation afin d'obtenir le meilleur compromis entre la valorisation de la ressource et la limitation de la sollicitation des équipements.

La stratégie de conduite utilisée pour la valorisation de la ressource du canal de la Neste conduit à une économie importante de l'eau et à l'absence de périodes de manques d'eau ou de débordements pour les scénarios testés. L'évaluation par simulation permet de conclure sur l'efficacité de la stratégie de supervision et d'accommodation hybride de la commande. Il est cependant nécessaire de poursuivre cette évaluation sur d'autres scénarios avant d'envisager de l'implanter et de la valider sur le système réel.

D'autre part, la stratégie de conduite a été évaluée sur un réseau hydrographique composé d'un confluent et d'un défluent. Les résultats de simulation obtenus permettent de juger de son efficacité et de son caractère générique. L'adaptation de la stratégie de conduite à des réseaux hydrographiques plus complexes nécessiterait alors seulement une démarche structurelle pour représenter les réseaux et y appliquer les règles de répartition de la ressource et d'affectation proposées. En effet, il est nécessaire de déterminer sur quelles branches et avec quelles proportions les écarts de débit mesuré doivent être répartis.

Conclusion

Nous avons décrit les problèmes de conduite de systèmes dynamiques étendus. Ceux-ci véhiculent des flux sur de grandes distances pour satisfaire les usages liés à l'activité humaine. Ils sont caractérisés par des non-linéarités et des temps de transfert importants. Aujourd'hui, les enjeux économiques liés aux flux transportés imposent une gestion efficace des systèmes dynamiques étendus. Cette gestion consiste en une économie des ressources contenues dans les réserves, une gestion prévisionnelle des demandes, une répartition équitable des manques et un stockage des excédents. Bien que les techniques de régulation et les méthodes d'optimisation proposées dans la littérature permettent de satisfaire les deux premiers objectifs, nous avons établi qu'elles ne sont pas conçues pour une valorisation des manques et des excédents de ressource. Ainsi avons-nous conçu une stratégie de conduite réactive basée sur des méthodes de supervision des systèmes dynamiques hybrides et sur des techniques de diagnostic. Cette stratégie présente l'originalité de pouvoir traiter les systèmes étendus dans leur ensemble, en appliquant les actions de compensation nécessaires à la satisfaction des objectifs de gestion en fonction de l'état de la ressource. La stratégie de conduite réactive est particulièrement bien adaptée aux systèmes étendus équipés d'un grand nombre des capteurs et d'actionneurs, puisqu'elle permet leur supervision de manière concurrente et l'accommodation de la commande des actionneurs de façon indépendante. L'implantation modulaire de cette stratégie permet l'utilisation conjointe de plusieurs outils, et l'intégration de méthodes proposées dans la littérature ou développées spécifiquement pour les systèmes dynamiques étudiés. Sa modularité contribue à la généralité de la stratégie proposée.

La supervision de la ressource est réalisée de manière concurrente au niveau de chaque capteur du réseau. La détermination simultanée de l'état de la ressource en plusieurs points conduit à une gestion plus réactive des systèmes dynamiques étendus. La supervision concurrente se compose d'une fonction de conditionnement des données mesurées à partir de techniques de filtrage, d'une fonction de détection de l'instant où les objectifs de gestion ne sont plus respectés, et d'une fonction de diagnostic de l'état de la ressource. La détection des erreurs et le diagnostic de l'état de la ressource sont réalisés grâce à des automates à états, des techniques de détection par seuils fixes ou variables, et des techniques de caractérisation qualitative des signaux.

L'accommodation hybride de la commande conduit à la répartition de la ressource

disponible en tenant compte des règles d'arbitrage du gestionnaire et de l'état de la ressource diagnostiqué. Lorsque l'état de la ressource le nécessite, les actions de compensation sont appliquées sur les actionneurs de façon indépendante. Les caractéristiques liées à la dynamique des systèmes étendus sont prises en compte au niveau de l'affectation de la ressource. La détermination de la valeur de ces caractéristiques ainsi que de leur domaine de validité est réalisée grâce à une méthode de multimodélisation. L'utilisation des méthodes de répartition et d'affectation de la ressource permet de garantir une répartition équitable des ressources disponibles et un ré-acheminement des ressources excédentaires vers les lieux de stockage.

La stratégie de supervision et d'accommodation hybride de la commande a été employée pour la valorisation des ressources en eau des réseaux hydrographiques équipés de prises latérales. Nous avons proposé une méthode de multimodélisation des systèmes hydrauliques à surface libre, basée sur la linéarisation du modèle de l'onde diffusante. La simplification de sa mise en œuvre et la rapidité des réponses obtenues sont les critères déterminants de l'utilisation de l'approche par multimodélisation pour le réglage et l'évaluation de la stratégie de conduite réactive.

Finalement, la stratégie de conduite réactive a été mise en œuvre pour répondre à la problématique de répartition de la ressource d'un canal permettant la ré-alimentation en eau de rivières. La dynamique de ce canal a été modélisée par l'approche de multimodélisation selon le coefficient de célérité afin de régler des fonctions de conditionnement, détection et diagnostic. La stratégie proposée a ensuite été évaluée grâce à la proposition d'un simulateur couplant Matlab/Simulink à un modèle de résolution numérique des équations de Saint-Venant. Pour les scénarios simulés, la stratégie de conduite réactive conduit à une économie importante des ressources en eau et à l'absence de périodes de manques et de débordements en bout de canal. Par ailleurs, nous avons montré le caractère générique de la stratégie proposée dans le cadre d'un système hydrographique dont la structure est composée d'un confluent et d'un défluent. Les résultats de simulation ont permis de conclure sur l'efficacité de la stratégie de conduite réactive.

Lors de l'affectation de la ressource, nous avons pris en compte les temps de transfert. Une amélioration possible des performances de la stratégie de conduite réactive passe par la prise en compte d'autres caractéristiques liées à la dynamique des réseaux hydrographiques, telle que l'atténuation naturelle des débits au fil de l'eau. Il serait alors nécessaire de répercuter cette atténuation sur les nouvelles consignes calculées. D'autre part, les contraintes de communication pourraient être étudiées pour la résolution de conflits de transmission, en fonction des protocoles de communication.

Le simulateur de la stratégie de conduite réactive que nous avons conçu présente l'avantage d'être facilement paramétrable. Il permet la mise en place d'une campagne de tests par simulation sur différents scénarios de fonctionnement, nécessaire à l'implantation de la stratégie sur des systèmes réels.

Nous avons été amené à proposer la stratégie de conduite réactive sous la forme d'une structure modulaire basée sur une interaction entre états continus et états discrets. En effet, la recherche sur les systèmes dynamiques hybrides ne fait pas émerger, à ce jour, d'algorithmes hybrides de simulation qui permettraient l'évaluation de la stratégie directement sous un formalisme hybride.

Plus généralement, le principe de la stratégie de supervision concourante et d'accommodation hybride de la commande pourrait être utilisé pour les systèmes dynamiques étendus de plus grande complexité et avec un grand nombre de composants. La stratégie proposée permettrait la détection de situations anormales de façon concourante, puis l'emploi de procédures d'accommodation de la commande en fonction des situations diagnostiquées.

Par ailleurs, notre démarche de multimodélisation est une première approche des systèmes dynamiques étendus à retards variables qui constituent, compte tenu de leur complexité, un domaine de recherche croissant d'intérêt pour la modélisation et la conduite.

Annexe 1 : Coefficients de célérité et de diffusion des profils étudiés

1.1 Expression du coefficient de célérité C

Le paramètre C est donné par la relation :

$$C = \frac{1}{L^2 \frac{\partial J}{\partial Q}} \left[\frac{\partial L}{\partial x} - \frac{\partial J L}{\partial z} \right]. \quad (1.21)$$

D'après la relation de Manning-Strickler :

$$J = \frac{Q^2 n_M^2 P^{\frac{4}{3}}}{S^{\frac{10}{3}}}, \quad (1.22)$$

il vient : $\frac{\partial J}{\partial Q} = \frac{\partial}{\partial Q} \left(\frac{Q^2 n_M^2 P^{\frac{4}{3}}}{S^{\frac{10}{3}}} \right),$

$$\frac{\partial J}{\partial Q} = \frac{2Q n_M^2 P^{\frac{4}{3}}}{S^{\frac{10}{3}}},$$

$$\frac{\partial J}{\partial Q} = \frac{2J}{Q}. \quad (1.23)$$

La largeur du miroir L étant considérée identique sur tout le bief, $\frac{\partial L}{\partial x} = 0$, l'expression du paramètre C devient :

$$C = \frac{Q}{L^2} \left[-\frac{1}{2} \frac{\partial L}{\partial z} - \frac{L}{2J} \frac{\partial J}{\partial z} \right], \quad (1.24)$$

où la dérivée $\frac{\partial L}{\partial z}$ dépend directement du profil du cours d'eau. Ce terme est explicité pour plusieurs profils plus bas.

En considérant la relation 1.22, la dérivée $\frac{\partial J}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{Q^2 n_M^2 P^{\frac{4}{3}}}{S^{\frac{10}{3}}} \right),$

$$\frac{\partial J}{\partial z} = Q^2 n_M^2 \frac{\frac{4}{3} S^{\frac{10}{3}} P^{\frac{1}{3}} \frac{\partial P}{\partial z} - \frac{10}{3} S^{\frac{7}{3}} P^{\frac{4}{3}} \frac{\partial S}{\partial z}}{S^{\frac{20}{3}}},$$

$$\frac{\partial J}{\partial z} = \frac{1}{3}Q^2 n_M^2 \frac{P^{\frac{1}{3}}}{S^{\frac{10}{3}}} \left(4 \frac{\partial P}{\partial z} - 10 \frac{P}{S} \frac{\partial S}{\partial z} \right),$$

$$\frac{\partial J}{\partial z} = \frac{2}{3} \frac{J}{P} \left(2 \frac{\partial P}{\partial z} - 5 \frac{P}{S} \frac{\partial S}{\partial z} \right). \quad (1.25)$$

Finalemment, le coefficient de célérité C s'exprime :

$$C = \frac{Q}{L^2} \left[-\frac{1}{2} \frac{\partial L}{\partial z} - \frac{L}{3P} \left(2 \frac{\partial P}{\partial z} - 5 \frac{P}{S} \frac{\partial S}{\partial z} \right) \right]. \quad (1.26)$$

Y. Kovacs exprime, dans [Kovacs, 1988], le coefficient C (1.26) sous la forme d'une somme de deux termes (1.27), et considère ensuite le terme Tf négligeable devant Cs .

$$C = \underbrace{-\frac{1}{2} \frac{Q}{L^2} \frac{\partial L}{\partial z}}_{Tf} + \underbrace{\frac{Q}{3LP} \left(2 \frac{\partial P}{\partial z} - 5 \frac{P}{S} \frac{\partial S}{\partial z} \right)}_{Cs}, \quad (1.27)$$

1.2 Expression du coefficient de diffusion D

Le paramètre D est donné par la relation :

$$D_e = \frac{1}{L \frac{\partial J}{\partial Q_e}}. \quad (1.28)$$

En considérant la relation 1.23, l'expression du paramètre D devient :

$$D_e = \frac{Q}{2LJ}. \quad (1.29)$$

1.3 Coefficient de célérité C pour différents profils

Afin d'exprimer le paramètre C , il est nécessaire d'exprimer pour chaque profil considéré, la largeur du miroir L , la section mouillée S et le périmètre mouillé P .

1.3.1 Profil rectangulaire

$$S(z) = Lh,$$

$$P(z) = 2h + L.$$

Les dérivées nécessaires à l'expression de C sont :

$$\frac{\partial L}{\partial z} = 0,$$

$$\frac{\partial S}{\partial z} = L,$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = 2.$$

Ainsi, $Tf = 0$, et $Cs = -\frac{Q}{3LP} \left(4 - 5\frac{P}{S}L \right)$

$$Cs = \frac{Q}{3L} \left(\frac{5}{h} - \frac{4}{P} \right),$$

d'où

$$C = \frac{Q}{3L} \left(\frac{5}{h} - \frac{4}{P} \right). \quad (1.30)$$

1.3.2 Profil trapézoïdal

$$L = B + 2m_b h,$$

$$S(z) = (B + m_b h)h,$$

$$P(z) = B + 2h\sqrt{1 + m_b^2}.$$

Les dérivées nécessaires à l'expression de C sont :

$$\frac{\partial L}{\partial z} = 2m_b,$$

$$\frac{\partial S}{\partial z} = B + m_b h,$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = 2\sqrt{1 + m_b^2}.$$

Ainsi, $Tf = -\frac{Qm_b}{L^2}$, et $Cs = -\frac{Q}{3LP} \left(4\sqrt{1 + m_b^2} - 5\frac{P}{S}(B + m_b h) \right)$

$$Cs = -\frac{Q}{3LP} \left(2\frac{(P - B)}{h} - 5\frac{P}{S}L \right),$$

$$Cs = \frac{Q}{3L} \left(\frac{2B}{Ph} + \frac{5L}{S} - \frac{2}{h} \right),$$

d'où

$$C = -\frac{Qm_b}{L^2} + \frac{Q}{3L} \left(\frac{2B}{Ph} + \frac{5L}{S} - \frac{2}{h} \right),$$

$$= \frac{Q}{L^2} \left[-m_b + \frac{L}{3} \left(\frac{2B}{Ph} + \frac{5L}{S} - \frac{2}{h} \right) \right]. \quad (1.31)$$

1.3.3 Profil triangulaire

$$L = 2m_b h,$$

$$S(z) = m_b h^2,$$

$$P(z) = 2h\sqrt{1 + m_b^2}.$$

Les dérivées nécessaires à l'expression de C sont :

$$\frac{\partial L}{\partial z} = 2m_b,$$

$$\frac{\partial S}{\partial z} = 2m_b h,$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = 2\sqrt{1 + m_b^2}.$$

Ainsi, $Tf = -\frac{Qm_b}{L^2}$, et $Cs = -\frac{Q}{3LP} \left(4\sqrt{1 + m_b^2} - 10\frac{P}{S}m_b h \right)$

$$Cs = -\frac{Q}{3LP} \left(2\frac{P}{h} - 5\frac{P}{S}L \right),$$

$$C_s = \frac{Q}{3L} \left(\frac{5L}{S} - \frac{2}{h} \right),$$

d'où

$$\begin{aligned} C &= -\frac{Qm_b}{L^2} + \frac{Q}{3L} \left(\frac{5L}{S} - \frac{2}{h} \right), \\ &= \frac{Q}{L^2} \left[-m_b + \frac{8L}{3h} \right]. \end{aligned} \quad (1.32)$$

1.3.4 Profil circulaire

$$\theta = 2 \cos^{-1} \left(\frac{R-h}{R} \right)$$

$$L = 2\sqrt{2Rh - h^2},$$

$$S(z) = \frac{R^2}{2}(\theta - \sin \theta) = \frac{1}{2}R^2\theta - L\frac{R-h}{2},$$

$$P(z) = R\theta.$$

Les dérivées nécessaires à l'expression de C sont :

- la dérivée de L par rapport à z , telle que : $\frac{\partial L}{\partial z} = \frac{4(R-h)}{L}$,

- la dérivée de S par rapport à z , telle que : $\frac{\partial S}{\partial z} = \frac{1}{2}R^2 \left[2\frac{1}{R} \left(1 - \left(\frac{R-h}{R} \right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \right] -$

$$\begin{aligned} &\frac{R-h}{2} \frac{\partial L}{\partial z} + \frac{L}{2}, \\ \frac{\partial S}{\partial z} &= \frac{L}{2} + \frac{2h}{L} (2R-h), \end{aligned}$$

- la dérivée de P par rapport à z , telle que : $\frac{\partial P}{\partial z} = R \left[2\frac{1}{R} \left(1 - \left(\frac{R-h}{R} \right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \right],$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{4R}{L}.$$

Ainsi, $Tf = -\frac{2Q(R-h)}{L^3}$, et $C_s = -\frac{Q}{3LP} \left[\frac{8R}{L} - 5\frac{P}{S} \left(\frac{L}{2} + \frac{2h}{L} (2R-h) \right) \right],$

$$C_s = \frac{Q}{3LP} \left[5\frac{P}{S} \left(\frac{L}{2} + \frac{2h}{L} (2R-h) \right) - \frac{8R}{L} \right],$$

d'où

$$\begin{aligned} C &= -\frac{2Q(R-h)}{L^3} + \frac{Q}{3LP} \left[5\frac{P}{S} \left(\frac{L}{2} + \frac{2h}{L} (2R-h) \right) - \frac{8R}{L} \right], \\ &= \frac{Q}{L^2} \left[-\frac{2(R-h)}{L} + \frac{1}{3P} \left[5\frac{P}{S} \left(\frac{L^2}{2} + 4Rh - 2h^2 \right) - 8R \right] \right]. \end{aligned} \quad (1.33)$$

Annexe 2 : Profils moyens des tronçons du canal de la Neste

Nous avons réalisé une étude visant à définir les profils moyens pour les différents tronçons du canal de la Neste, situé entre la vanne M_1 et G_9 . Les paramètres physiques des profils ne sont pas connus. Les seules données disponibles sont les relevés topographiques des profils en 5 points (figure 2.35). Nous avons appliqué la méthode de la moyenne pondérée sur les coordonnées y et z de la totalité des points de façon à ne conserver uniquement que 5 points définissant le profil moyen du tronçon.

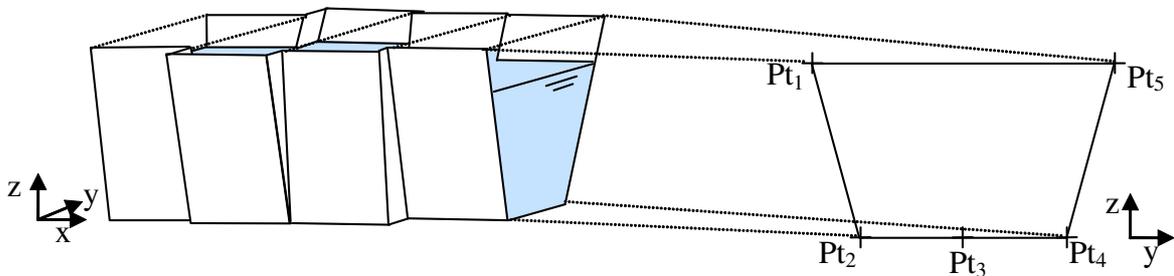


FIG. 2.35 – Cours d'eau composé de plusieurs profils trapézoïdaux définis par 5 points.

Les points de chaque profil sont représentés sur les figures avec les conventions suivantes : le point Pt_1 est représenté par le signe "+", le point Pt_2 par "×", le point Pt_3 par "▽", le point Pt_4 par "*" et le point Pt_5 par "★".

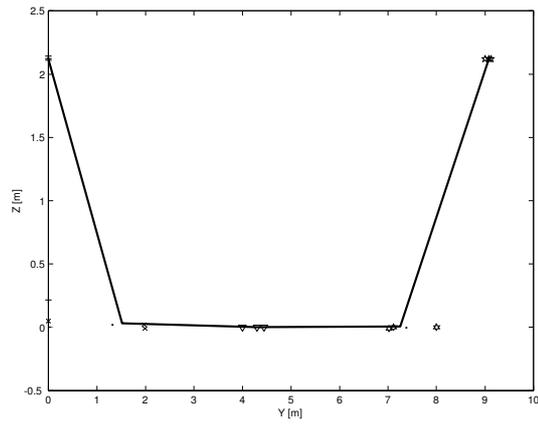


FIG. 2.36 – Profil moyen du tronçon 1 et les 5 points de chaque profil.

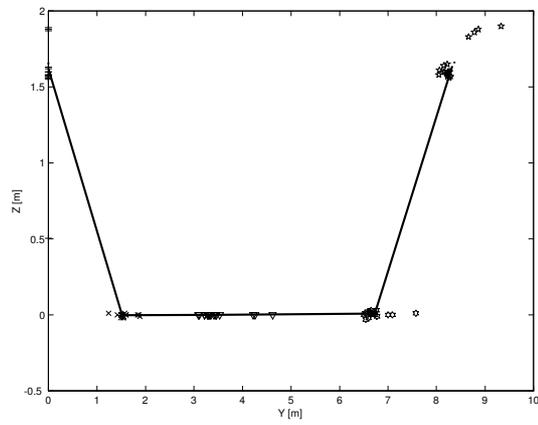


FIG. 2.37 – Profil moyen du tronçon 3 et les 5 points de chaque profil.

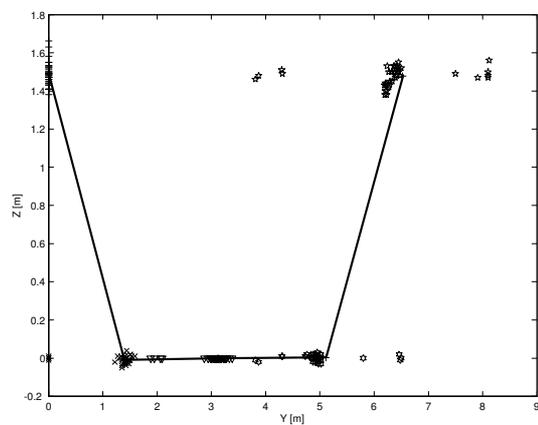


FIG. 2.38 – Profil moyen du tronçon 4 et les 5 points de chaque profil.

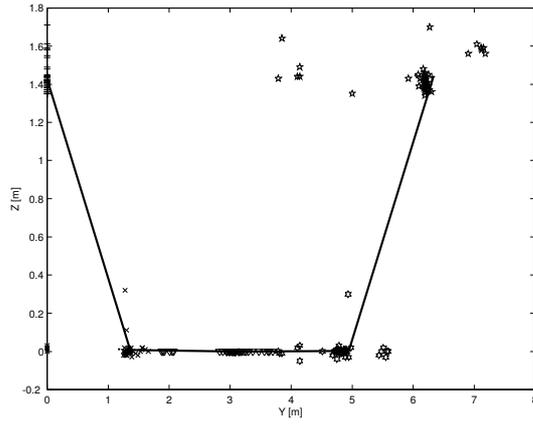


FIG. 2.39 – Profil moyen du tronçon 5 et les 5 points de chaque profil.

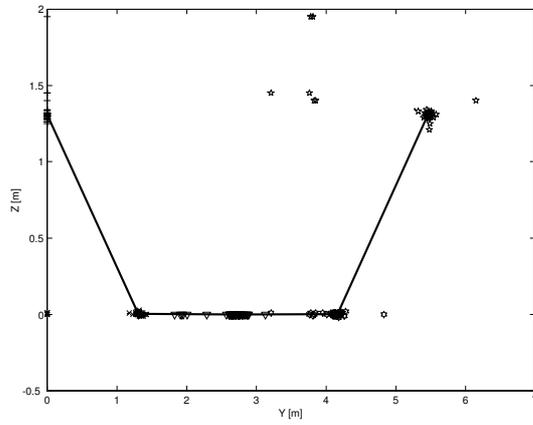


FIG. 2.40 – Profil moyen du tronçon 6 et les 5 points de chaque profil.

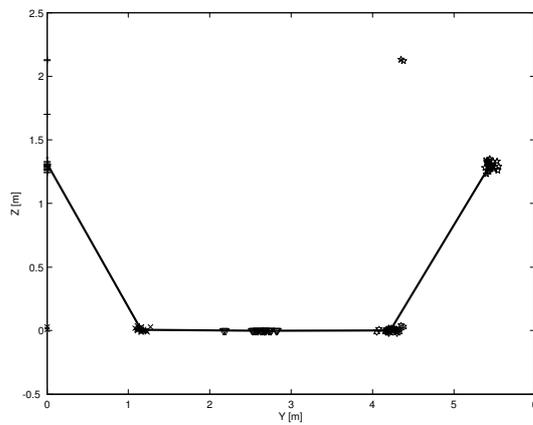


FIG. 2.41 – Profil moyen du tronçon 7 et les 5 points de chaque profil.

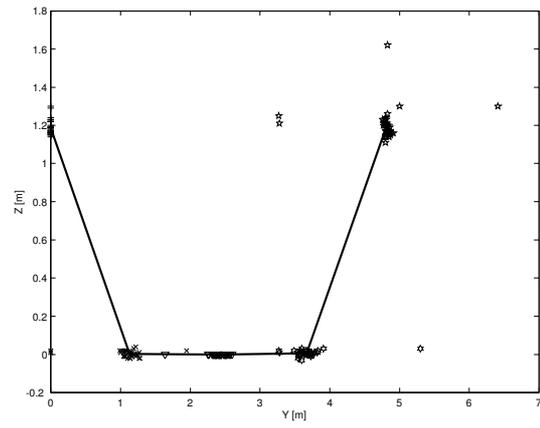


FIG. 2.42 – Profil moyen du tronçon 8 et les 5 points de chaque profil.

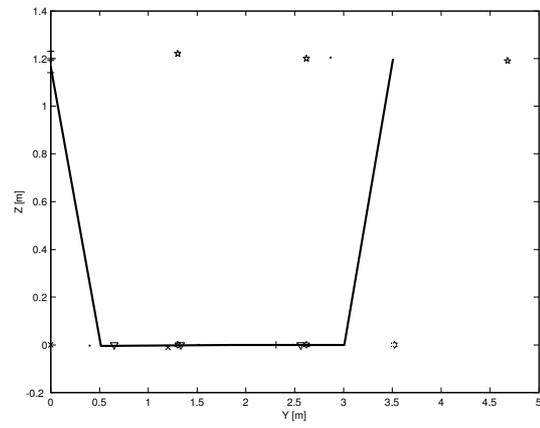


FIG. 2.43 – Profil moyen du tronçon 9 et les 5 points de chaque profil.

Annexe 3 : Multimodélisation

3.1 Canal de la Neste

La dynamique du canal de la Neste a été modélisée selon l'approche de multimodélisation présentée au chapitre 3. La démarche présentée au chapitre 4 conduit à des bancs de modèles pour chaque tronçon du canal. Le tableau 3.17 regroupe les paramètres pour le premier bief du canal, et le tableau 3.18 ceux pour les deux biefs suivants. Le choix de Π_C réalisé en fonction de la précision voulue et du nombre de modèles identifiés est égal à 7 %.

Tronçon	Ω_Q [m^3/s]	Q [m^3/s]	z [mm]	C [m/s]	D [m^2/s]	a_1	a_2 ($\times 10^3$)	τ [s]
1	[0, 8 ; 1, 2[	1	294	0, 9	112	237	0	0
	[1, 2 ; 1, 8[	1, 5	381	1	168	206	0	0
	[1, 8 ; 2, 9[	2, 3	500	1, 1	256	179	0	0
	[2, 9 ; 4, 8]	3, 8	669	1, 3	398	156	0	0
	[4, 8 ; 8, 3]	6, 4	917	1, 5	634	135	0	0
	[8, 3 ; 14]	11, 3	1295	1, 7	1040	117	0	0
2	[0, 8 ; 1[	0, 8	285	0, 8	104	636	73	260
	[1 ; 1, 6[	1, 3	372	0, 9	158	518	0	230
	[1, 6 ; 2, 6[	2	493	1, 1	243	510	0	132
	[2, 6 ; 4, 4[	3, 4	668	1, 3	382	507	0	40
	[4, 4 ; 7, 9[	5, 9	927	1, 4	615	484	0	0
	[7, 9 ; 12]	10, 8	1321	1, 7	1013	421	0	0
3	[0, 7 ; 0, 9[	0, 7	271	0, 7	105	530	0	221
	[0, 9 ; 1, 4[	1, 1	353	0, 9	158	527	0	126
	[1, 4 ; 2, 2[	1, 8	465	1	241	526	0	39
	[2, 2 ; 3, 7[	2, 9	626	1, 1	377	493	0	0
	[3, 7 ; 6, 5[	5	863	1, 3	602	427	0	0
	[6, 5 ; 10]	8, 9	1220	1, 5	987	373	0	0

TAB. 3.17 – Paramètres d'identification des modèles pour les tronçons du bief 1.

Tronçon	$\Omega_Q [m^3/s]$	$Q [m^3/s]$	$z [mm]$	$C [m/s]$	$D [m^2/s]$	a_1	$a_2 (\times 10^3)$	$\tau [s]$
4	[0,6 ; 0,9[	0,7	358	0,7	169	1345	459	768
	[0,9 ; 1,6[	1,2	484	0,9	265	1261	0	516
	[1,6 ; 2,8[	2,1	672	1	427	1191	0	280
	[2,8 ; 7]	3,9	958	1,1	704	1130	0	57
5	[0,6 ; 0,9[	0,7	331	0,8	136	1368	475	716
	[0,9 ; 1,5[	1,1	446	0,9	212	1305	378	506
	[1,5 ; 2,6[	1,9	617	1	341	1173	188	402
	[2,6 ; 6,5]	3,5	876	1,2	560	1038	0	330
6	[0,5 ; 0,8[	0,6	280	1	69	748	166	953
	[0,8 ; 1,3[	1	380	1,2	109	744	159	734
	[1,3 ; 2,4[	1,8	529	1,3	176	742	151	542
	[2,4 ; 5,5]	3,3	755	1,6	289	736	137	380
7	[0,4 ; 0,6[	0,5	172	1,4	19	199	12,5	572
	[0,6 ; 1[	0,8	225	1,6	29	196	12	474
	[1 ; 1,6[	1,3	298	1,9	44	195	11,7	387
	[1,6 ; 4]	2,1	403	2,2	69	194	11,6	311
8	[0,3 ; 0,7[	0,5	286	0,9	76	824	195	801
	[0,7 ; 1,1[	0,9	392	1	121	817	183	596
	[1,1 ; 3]	1,6	551	1,2	197	808	165	420
9	[0,2 ; 2,5[	0,8	163	2,9	8	2	0	0

TAB. 3.18 – Paramètres d'identification des modèles pour les tronçons du bief 2 et du bief 3.

3.2 Réseau hydrographique intégrant un confluent et un défluent

La dynamique du réseau hydrographique intégrant un confluent et un défluent a également été modélisée selon l'approche de multimodélisation proposée. Les tableaux 3.19 et 3.20 regroupent les paramètres d'identification de chaque tronçon considéré, calculés avec un pourcentage d'erreur Π_C égal à 10 %.

Tronçon	$\Omega_Q [m^3/s]$	$Q [m^3/s]$	a_1	$a_2 (\times 10^3)$	$\tau [s]$
1	$[0, 5 ; 1, 4[$	1	810	182	630
	$[1, 4 ; 3[$	2	780	153	398
	$[3 ; 7]$	4, 5	721	95	243
2	$[0, 4 ; 1, 2[$	0, 8	638	106	371
	$[1, 2 ; 2, 4[$	1, 7	596	78	229
	$[2, 4 ; 6]$	3, 7	462	0	213
3	$[0, 4 ; 1, 2[$	0, 8	550	74	256
	$[1, 2 ; 2, 4[$	1, 7	495	42	165
	$[2, 4 ; 6]$	3, 7	413	0	127
4	$[0, 7 ; 1, 8[$	1, 3	432	52	352
	$[1, 8 ; 3, 6[$	2, 6	415	44	227
	$[3, 6 ; 8]$	5, 4	388	30	137
5	$[0, 7 ; 1, 8[$	1, 3	547	88	629
	$[1, 8 ; 3, 6[$	2, 6	539	79	429
	$[3, 6 ; 7, 5]$	5, 4	520	68	268
6	$[0, 5 ; 1, 4[$	1	321	27	181
	$[1, 4 ; 2, 8[$	2	298	19	113
	$[2, 8 ; 6, 7]$	4, 2	229	0	108
7	$[0, 6 ; 1, 4[$	1, 1	337	27	142
	$[1, 4 ; 2, 7[$	2	294	14	98
	$[2, 7 ; 5, 6]$	3, 8	243	0	77

TAB. 3.19 – Paramètres d'identification des modèles pour les deux premiers biefs du réseau hydrographique.

Tronçon	$\Omega_Q [m^3/s]$	$Q [m^3/s]$	a_1	$a_2 (e^3)$	$\tau [s]$
8	$[0, 5 ; 1, 2[$	0, 9	642	127	1206
	$[1, 2 ; 2, 3[$	1, 7	621	116	891
	$[2, 3 ; 4, 7]$	3, 2	604	106	633
9	$[0, 3 ; 0, 9[$	0, 7	301	25	220
	$[0, 9 ; 1, 6[$	1, 2	281	20	146
	$[1, 6 ; 3, 5]$	2, 2	256	14	93
10	$[0, 2 ; 1, 4[$	0, 6	845	0	220
	$[1, 4 ; 2]$	1, 4	813	0	0
11	$[0, 2 ; 0, 7[$	0, 5	1074	141	378
	$[0, 7 ; 1, 5]$	1, 1	965	0	223
12	$[0, 1 ; 0, 6]$	0, 4	390	0	0
13	$[0, 2 ; 1, 5]$	0, 5	734	50	278
14	$[0, 2 ; 1]$	0, 4	1291	435	747
15	$[0, 1 ; 0, 3]$	0, 2	271	0	0

TAB. 3.20 – Paramètres d'identification des modèles pour les deux derniers biefs du réseau hydrographique.

Bibliographie

- [Akhenak *et al.* , 2004] Akhenak, A., Chadli, M., Ragot, J., & Maquin, D. 2004. Estimation D'état et D'entrées Inconnues D'un Système Non Linéaire, Représenté Sous Forme Multimodèle. *Conference Internationale Francophone d'Automatique (CIFA 2004)*, 22-24 novembre 2004, Douz, Tunisie.
- [Antsaklis *et al.* , 1998] Antsaklis, P., Koutsoukos, X., & Zaytoon, J. 1998. On Hybrid Control of Complex Systems : A Survey. *APII-JESA*, **32**(9-10), 1023–1045.
- [Baliarsingh & Kumar, 2002] Baliarsingh, F., & Kumar, D. Nagesh. 2002. Folded Dynamic Programming for Optimal Operation of Multireservoir System. *International Conference on Advances in Civil Engineering, Kharagpur, India, January 3-5*, **1**, 251–258.
- [Barford *et al.* , 1999] Barford, L., Manders, E. J., Biswas, G., Mosterman, P. J., Ram, V., & Barnett, J. 1999. Derivative Estimation for Diagnosis. *IEEE International Workshop on Emerging Technologies (EmTech'99)*, Venice, Italy, May, 9–12.
- [Barkai, 1999] Barkai, J. 1999. Automatic Generation of a Diagnostic Expert System from Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) Information. *Society of Automotive Engineers (SAE), International Congress and Exposition, Detroit, Michigan, Mars 1-4*.
- [Basseville & Nikiforov, 1993] Basseville, M., & Nikiforov, I. V. 1993. *Detection of Abrupt Changes : Theory and Application*. P T R Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- [Bolea *et al.* , 2004] Bolea, Y., Puig, V., Blesa, J., Gomez, M., & Rodellar, J. 2004. An LPV Model for Canal Control. *10th IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, 30 August - 2 September, Miedzydroje, Poland, **1**, 659–664.
- [Boyd *et al.* , 1994] Boyd, S., Ghaoui, L. El, Feron, E., & Balakrishnan, V. 1994. *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia.
- [Branicky, 1995] Branicky, M. 1995. *Studies in Hybrid Systems : Modeling, Analysis, and Control*. Thèse de doctorat, Laboratory for Information and Decision Systems (LIDS) Massachusetts Institute of Technology, USA.
- [Brunet *et al.* , 1990] Brunet, J., Jaume, D., Labarrere, M., Rault, A., & Verge, M. 1990. *Détection et Diagnostic de Pannes*. Editions hermes edn. Hermes.

- [Bruzelius, 2004] Bruzelius, F. 2004. Linear Parameter-Varying System. Thèse de doctorat, Chalmers University of Technology, Sweden.
- [Champagnat *et al.* , 1998] Champagnat, R., Pingaud, H., Alla, H., Roubinet, C. Valentin, Flaus, J-M., & Valette, R. 1998. A Gas Storage Examples as a Benchmark for Hybrid Modeling : A Comparative Study. *European Journal of Automation*, **32**, 1233–1253.
- [Chombart, 1997] Chombart, A. 1997. Commande Supervisée de Systèmes Hybrides. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- [Chow *et al.* , 1988] Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. 1988. *Applied Hydrology*. New York, Paris : McGraw-Hill.
- [Cocquempot *et al.* , 2003] Cocquempot, V., Staroswiecki, M., & Mazyani, T. EL. 2003. Switching Time Estimation and Fault Detection For Hybrid System Using Structured Parity Residuals. *International Federation of Automatic Control (IFAC) Conference Safeprocess'03, Washington, USA*, 681–687.
- [Cocquempot *et al.* , 2004] Cocquempot, V., Mezyani, T. El, & Staroswiecki, M. 2004. Surveillance Des Systèmes Hybrides Non Linéaires À L'aide de Relations de Redondance Analytiques. *Conference Internationale Francophone d'Automatique (CIFA 2004), 22-24 novembre 2004, Douz, Tunisie*.
- [Colomer *et al.* , 1997] Colomer, J., Melendez, J., de la Rosa, J. Ll., & Aguilar-Martin, J. 1997. A Qualitative/Quantitative Representation of Signals for Supervision of Continuous Systems. *European Control Conference (ECC 97), Brussels, 1-4 july*.
- [Deltour & Sanfilippo, 1998] Deltour, J.-L., & Sanfilippo, F. 1998. Introduction of Smith Predictor Into Dynamic Regulation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **124**, 47–52.
- [Duviella, 2001] Duviella, E. 2001. Gestion Des Volumes D'un Réseau Hydrographique. Memoire de DEA, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [Duviella *et al.* , 2003a] Duviella, E., Chiron, P., & Charbonnaud, P. 2003a. Hybrid Control Accommodation by Resource Allocation and Setpoint Assignment. *IFAC Conference on Analysis and Design of Hybrid Systems (ADHS'03), Saint Malo, France, 16-18 juin*, 175–180.
- [Duviella *et al.* , 2003b] Duviella, E., Chiron, P., & Charbonnaud, P. 2003b. Monitoring, Diagnosis and Water Asset Management of a Canal. *Multiconference on Computational Engineering in Systems Applications (CESA'2003), sponsored by CNRS, in cooperation with the IMACS and IEEE/SMC Society, Lille, France, 9-11 juillet*.
- [Duviella *et al.* , 2004] Duviella, E., Chiron, P., & Charbonnaud, P. 2004. Diagnostic Concourant de L'état Des Ressources Pour la Gestion Optimisée de Canaux. *Conference Internationale Francophone d'Automatique (CIFA 2004), 22-24 novembre 2004, Douz, Tunisie*.

- [Elfawal-Mansour, 1999] Elfawal-Mansour, H. 1999. Modélisation et Gestion Optimale D'un Système D'irrigation Complexe : Le Canal de la Bourne. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- [Engell *et al.* , 2001] Engell, S., Fritz, M., & Wollhaf, K. 2001. Object-Oriented Modeling and Simulation of Multipurpose Batch Plants. *Chap. 6 of : Computer-Integrated Manufacturing*. Boca Raton, Florida : CRC Press.
- [Faye, 1999] Faye, R.-M. 1999. Une Approche Intégrée Pour la Gestion Des Ressources En Eau Faisant Appel Aux Techniques Floues et Neuronales. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse.
- [Funiak *et al.* , 2004] Funiak, S., Blackmore, L. J., & Williams, B. C. 2004. Gaussian Particle Filtering for Concurrent Hybrid Models with Autonomous Transitions. *submitted to Journal of Artificial Intelligence Research*.
- [Georges & Litrico, 2002] Georges, D., & Litrico, X. (eds). 2002. *Automatique Pour la Gestion Des Ressources En Eau*. Lavoisier : Hermès Science Publications.
- [Ghaoui & Niculescu, 2000] Ghaoui, L. El, & Niculescu, S-L. 2000. *Advances in Linear Matrix Inequality Methods in Control*. Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), Philadelphia.
- [Hamscher *et al.* , 1992] Hamscher, W., Console, L., & de Kleer, J. 1992. *Readings in Model-Based Diagnosis*. Morgan Kaufmann Publishers, Inc.
- [Hennet, 1997] Hennet, J.-C. 1997. *Fonctionnement et Architecture de Systèmes de Commande Hybrides*. Vol. Partie III.
- [Hocine *et al.* , 2004] Hocine, A., Maquin, D., & Ragot, J. 2004. Observateurs À Mémoire Finie Pour Les Systèmes À Commutations : Application À la Détection de Défauts. *Conference Internationale Francophone d'Automatique (CIFA 2004), 22-24 novembre 2004, Douz, Tunisie*.
- [Hofbaur & Williams, 2004] Hofbaur, M., & Williams, B. C. 2004. Hybrid Estimation of Complex Systems. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, **34**(5), 2178–2191.
- [Hofbaur & Williams, 2002a] Hofbaur, M. W., & Williams, B. C. 2002a. Hybrid Diagnosis with Unknown Behaviorla Modes. *International Workshop on Principles of Diagnosis (Dx-02), Semmering, Austria, May 2-4*, 97–105.
- [Hofbaur & Williams, 2002b] Hofbaur, M. W., & Williams, B.C. 2002b. Mode Estimation of Probabilistic Hybrid Systems. *Hybrid Systems : Computation and Control (HSCC 2002)*, 253–266.
- [Hristu, 1999] Hristu, D. 1999. Optimal Control with Limited Communication. Thèse de doctorat, Harvard University, Cambridge, Massachusetts, USA.

- [Hristu-Varsakelis & Brockett, 2002] Hristu-Varsakelis, D., & Brockett, R. W. 2002. Experimenting with Hybrid Control. *IEEE Control Systems Magazine*, **22** (1), 82–95.
- [Hurand, 1994] Hurand, P. 1994. Water Management in the Neste System (France). Kluwer Academic Publishers.
- [Hurand & Kosuth, 1993] Hurand, P., & Kosuth, P. 1993. Régulations En Rivière. *La Houille Blanche*, 143–149.
- [I.Guenova *et al.* , 2004] I.Guenova, Litrico, X., & Georges, D. 2004. Modeling and Robust PID Control of an Irrigation Canal Pool. *International Association of Science and Technology for Development (IASTED) Conference on Modelling, Identification and Control, Grindelwald, Switzerland, 23-25 Février*.
- [Jain *et al.* , 2002] Jain, R., Simsek, T., & Varaiya, P. 2002. Control under Communication Constraints. *Proceedings of the 41st IEEE Conference on decision and control, Las Vegas, Nevada*, 3209–3216.
- [Kamen, 1996] Kamen, E.W. 1996. *Fundamentals of Linear Time-Varying Systems*. W.s. levine edn. IEEE Press.
- [Kosuth, 1994] Kosuth, P. 1994. Technique de Régulation Automatique Des Systèmes Complexes : Application Aux Systèmes Hydrauliques À Surface Libre. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.
- [Kovacs, 1988] Kovacs, Y. 1988. Modèles de Simulation D'écoulement Transitoire En Réseau D'assainissement. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC) - Centre d'Enseignement et de Recherche sur la Gestion des Ressources Naturelles et de l'Environnement (CERGRENE).
- [Kutija & Hewett, 2002] Kutija, V., & Hewett, C.-J.-M. 2002. Modelling Of Supercritical Flow Conditions Revisited; NewC Scheme. *Journal of hydraulic research*, **40**(2), 145–152.
- [Lamacq, 1997] Lamacq, S. 1997. Coordination Entre L'offre et la Demande En Eau sur un Périmètre Irrigué. Des Scénarios, Des Systèmes, et Des Hommes. Thèse de doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Montpellier.
- [Litrico, 1999] Litrico, X. 1999. Modélisation, Identification et Commande Robuste de Systèmes Hydrauliques À Surface Libre. Thèse de doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Montpellier.
- [Litrico & Georges, 1999a] Litrico, X., & Georges, D. 1999a. Robust Continuous-Time and Discrete-Time Flow Control of a Dam-River System. (I) Modelling. *Applied Mathematical Modelling* **23**, 809–827.
- [Litrico & Georges, 1999b] Litrico, X., & Georges, D. 1999b. Robust Continuous-Time and Discrete-Time Flow Control of a Dam-River System. (II) Controller Design. *Applied Mathematical Modelling* **23**, 829–846.

- [Lund & Palmer, 1997] Lund, J.R., & Palmer, R.N. 1997. Water Resource System Modeling for Conflict Resolution. *Water Resources Update*, **3**(108), 70–82.
- [Malaterre, 1994] Malaterre, P. O. 1994. Modélisation, Analyse et Commande Optimale LQR D’un Canal D’irrigation. Thèse de doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Montpellier.
- [Malaterre & Baume, 1998] Malaterre, P.-O., & Baume, J.-P. 1998. Modeling and Regulation of Irrigation Canals : Existing Applications and Ongoing Researches. *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC 98), San Diego, California, 11-14 Octobre*, **4**, 3850–3855.
- [Malaterre *et al.* , 1998] Malaterre, P.O., Rogers, D.C., & Schuurmans, J. 1998. Classification of Canal Control Algorithms. *Journal of irrigation and drainage engineering*, **124**(1), 3–10.
- [Morari & Zafiriou, 1989] Morari, M., & Zafiriou, E. 1989. *Robust Process Control*. PTR Prentice Hall Englewood Cliffs, New Jersey.
- [Mosterman & Biswas, 1999] Mosterman, P. J., & Biswas, G. 1999. Diagnosis of Continuous Valued Systems in Transient Operating Regions. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, **29**(9), 554–565.
- [Nandalal & Sakthivadivel, 2002] Nandalal, K.D.W., & Sakthivadivel, R. 2002. Planning and Management of a Complex Water Resource System : Case of Samanalawewa and Udawalawe Reservoirs in the Walawe River, Sri Lanka. *Agricultural Water Management*, **57**, 207–221.
- [Nerode & Kohn, 1993] Nerode, A., & Kohn, W. 1993. Models for Hybrid Systems : Automata, Topologies, Controllability, Observability. *Pages 317–356 of : Grossman, R.L., Nerode, A., Ravn, A.P., & Rischel, H. (eds), Hybrid Systems, Lecture Notes in Computer Science*, vol. 736. Springer Verlag.
- [Ooi *et al.* , 2003] Ooi, S. Ki, Krutzen, M.P.M., & Weyer, E. 2003. On Physical and Data Driven Modelling of Irrigation Channels. *Control Engineering Practice*, **13**, 461–471.
- [Palmor, 1996] Palmor, Z.J. 1996. *Time Delay Compensation - Smith Predictor and its Modifications*. W.s. levine edn. IEEE Press.
- [Parent, 1991] Parent, E. 1991. Elaboration Des Consignes de Gestion Des Barrages - Réservoirs. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC) - Centre d’Enseignement et de Recherche sur la Gestion des Ressources Naturelles et de l’Environnement (CERGRENE).
- [Peleties & Decarlo, 1993] Peleties, P., & Decarlo, R. 1993. A Modeling Strategy for Hybrid Systems Based on Event Structures. *Discrete Event Dynamics Systems : Theory and Applications*, **3**, 39–69.

- [Pettersson, 1999] Pettersson, S. 1999. Analysis and Design of Hybrid Systems. Thèse de doctorat, Chalmers Univ. of Technology, Sweden.
- [Raj & Kumar, 1999] Raj, P.A., & Kumar, D.N. 1999. Ranking Alternatives with Fuzzy Weights Using Maximizing Set and Minimizing Set. *Fuzzy Sets and Systems*, **105**, 365–375.
- [Ramadge & Wonham, 1987] Ramadge, P.J., & Wonham, W. M. 1987. Supervisory Control of a Class of Discrete Event Processes. *Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), Control and Optimization*, **25**, 206–230.
- [Rehbinder & Sanfridson, 2003] Rehbinder, H., & Sanfridson, M. 2003. Scheduling of a Limited Communication Channel for Optimal Control. *Automatica*, **40**, 491–500.
- [Rutz *et al.* , 1998] Rutz, V.-M., Ruiz, C., & Ramirez, L. 1998. Predictive Control in Irrigation Canal Operation. *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, San Diego, CA, USA*, **4**, 3897–3901.
- [Sawadogo, 1992] Sawadogo, S. 1992. Modélisation, Commande Prédictive et Supervision D’un Système D’irrigation. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse.
- [Sawadogo *et al.* , 2001] Sawadogo, S., Faye, R., & Mora-Camino, F. 2001. Decentralized Adaptive Predictive Control of Multireach Irrigation Canal. *International Journal of Systems Science*, **32**(10), 1287–1296.
- [Schaft & Schumacher, 2000] Schaft, A. Van Der, & Schumacher, H. 2000. *An Introduction to Hybrid Dynamical Systems*. Berlin Heidelberg, New York : Springer-Verlag.
- [Tatikonda & Mitter, 2004] Tatikonda, S., & Mitter, S. 2004. Control under Communication Constraints. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **49**(7), 1056–1068.
- [Tittus, 1995] Tittus, M. 1995. Control Synthesis for Batch Processes. Thèse de doctorat, Chalmers Univ. of Technology, Sweden.
- [Trave-Massuyès *et al.* , 1997] Trave-Massuyès, L., Dague, P., & Guerrin, F. 1997. *Le Raisonnement Qualitatif Pour Les Sciences de L’ingénieur (Coll. Diagnostic et Maintenance)*. Editions Hermès.
- [Uppal *et al.* , 2002] Uppal, F. J., Patton, R. J., & Palade, V. 2002. Neuro-Fuzzy Based Fault Diagnosis Applied to an Electro-Pneumatic Valve. *Proc. of the 15th IFAC World Congress, Barcelona-Spain, 21-26 July*, 2483–2488.
- [Valiron, 1988] Valiron, F. 1988. *Gestion Des Eaux - Automatisation, Informatisation, Télégestion*. Vol. 3. Presses de l’école nationale des ponts et chaussées.
- [Valiron, 1990] Valiron, F. 1990. *Gestion Des Eaux - Principes, Moyens, Structures*. Vol. 1. Presses de l’école nationale des ponts et chaussées.
- [Xuanyin *et al.* , 2001] Xuanyin, W., Lei, Gao, & Guoliang, T. 2001. Research on Fuzzy Neural Net Fault Diagnosis of Pneumatic System of Automatic Production Line. *Fifth*

International Conference on Fluid Power Transmission and Control (ICFP 2001), 3-5 April, Hangzhou, China.

[Zaytoon, 2001] Zaytoon, J. (ed). 2001. *Systèmes Dynamiques Hybrides*. Lavoisier, 11 rue Lavoisier, 75008 Paris : Hermès Science Publications.

[Zhao *et al.* , 2001] Zhao, F., Koutsoukos, X. D., Haussecker, H. W., Reich, J., Cheung, P., & Picardi, C. 2001. Distributed Monitoring of Hybrid Systems : A Model-Directed Approach. *17th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 2001)*, Seattle, WA, San Francisco, USA, 4-10 Aout, **1**, 557–564.