

Université de Liège
Faculté des Sciences Appliquées



Optimisation de la gestion de grands barrages, avec prise en compte
du changement climatique

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention
du grade de Master Ingénieur Civil des Constructions
par BRUWIER Martin

Composition du jury:

Prof. Dr ir. M. Pirotton - Promoteur
Prof. Dr ir. B. Dewals - Co-promoteur
Dr ir. P. Archambeau
Prof. Dr ir. A. Dassargues
ir. P. Dierickx

Année académique 2012-2013

Cahier des charges

L'objectif du travail de fin d'étude est de contribuer à une optimisation de la gestion des barrages d'Eupen et de la Gileppe, avec une prise en compte des changements climatiques.

Au commencement du travail de fin d'étude réalisé, un modèle intégré du bassin de la Vesdre était disponible. A partir de données climatiques existantes, aux horizons temporels actuels et futurs, ce modèle permet la détermination des variables hydrauliques de la Vesdre et des réservoirs sur une période donnée. La loi de gestion des barrages a été modélisée, préalablement à ce travail, par le groupe de recherches HECE.

A partir de ces éléments, des indicateurs quantitatifs originaux des objectifs de gestion des barrages sont proposés. Ces quantifications concernent les dommages consécutifs à des crues dans la vallée de la Vesdre, la possibilité de production continue d'eau potable, le soutien aux débits d'étiage et la production hydroélectrique.

Ensuite, sur base d'une première analyse de la modélisation, une modification de la loi de gestion initiale est entreprise, afin d'accroître encore le réalisme de celle-ci.

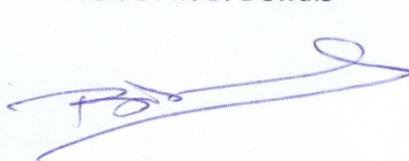
A partir de cette nouvelle loi de gestion modélisée, une analyse de sensibilité des paramètres de gestion des réservoirs est effectuée, en utilisant les indicateurs de performance développés. Cette analyse de sensibilité est réalisée sur la période allant de 1974 à 2004 et a pour vocation de pouvoir identifier l'influence relative de chaque paramètre sur les indicateurs de performance.

Enfin, une fois l'analyse de sensibilité réalisée, des simulations, tenant compte des changements climatiques, sont produites. Sur base des changements observés et à partir de l'analyse de sensibilité effectuée, des adaptations de la loi de gestion sont proposées.

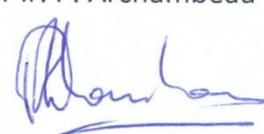
Prof. Dr ir. M. Pirotton



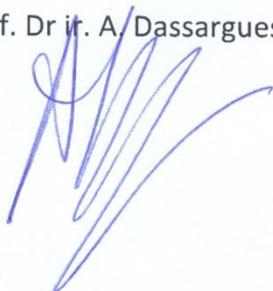
Prof. Dr ir. B. Dewals



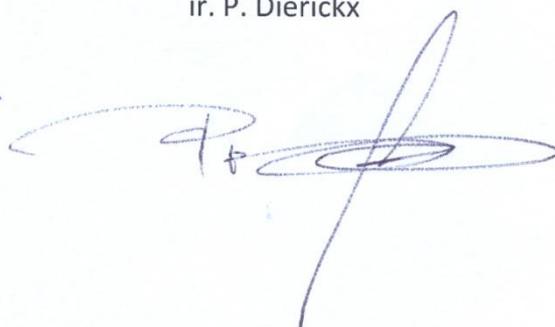
Dr ir. P. Archambeau



Prof. Dr ir. A. Dassargues



ir. P. Dierickx



Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Benjamin Dewals, Pierre Archambeau, Alain Dassargues et Philippe Dierickx d'avoir accepté de faire partie du jury de mon travail de fin d'étude ainsi que Michel Piroton d'en être le promoteur.

Je ne peux passer sous silence les contributions de Benjamin Dewals et Pierre Archambeau. Le premier m'a fourni une écoute et aide précieuses tout au long de mon travail. Le second a accepté de consacrer un temps considérable à m'aider dans la partie numérique de cette étude, indispensable à sa bonne réalisation.

Merci également à Christophe Grifnée, actuel Responsable du District de l'Est au SPW, de m'avoir éclairé sur la gestion réelle des réservoirs et de m'avoir fourni un certain nombre d'informations me faisant défaut.

Je remercie également les personnes suivantes : Richard Turcotte, du centre d'expertise hydrique du Québec, Jacques Huveneers, Ingénieur des Ponts et Chaussées au District de l'Est au SPW et Philippe Pottier, Responsable du secteur de production à Liège à la SWDE.

Ensuite, mes pensées vont à mes parents, à mes grands-parents et à Amandine pour leurs contributions à ce travail.

Pour finir, j'ai une pensée toute particulière pour une personne qui n'est plus là pour voir se concrétiser ces cinq années d'étude. Merci à elle pour le rôle qu'elle a joué dans mes premières années à l'Université de Liège.

Résumé

Les effets du changement climatique sont aussi multiples et divers que la variation du niveau des océans, la migration de certaines espèces,... Ce travail a pour objectif d'étudier les effets de ce changement du climat sur la gestion de barrages.

Cette étude est appliquée à deux ouvrages de rétention d'eau situés dans le bassin de la Vesdre, en Belgique. A partir d'un modèle intégré comprenant un modèle climatique, un modèle hydrologique du bassin versant de la Vesdre, un modèle hydraulique de ce cours d'eau et un modèle de simulation de la gestion des barrages, les variables hydrauliques de la Vesdre et les niveaux d'eau des lacs peuvent être déterminés. A partir de données climatiques alimentant le modèle, une étude de l'influence des divers paramètres constituant la loi de gestion des réservoirs est réalisée, après avoir proposé des indicateurs de performance de la gestion originaux. Ces indicateurs représentent les dommages occasionnés par des crues à l'aval des réservoirs, la production hydroélectrique, le soutien aux débits d'étiage et la possibilité d'assurer une production d'eau potable à tout moment de l'année. Ensuite, sur base de deux scénarios de changement climatique, un sec et un humide, les modifications des indicateurs de performances sont déterminées aux horizons temporels 2020-2050 et 2070-2100. L'analyse de sensibilité, réalisée sur la période 1974-2004, est alors utilisée pour rechercher des adaptations à la loi de gestion afin d'atténuer les effets néfastes calculés.

The effects of climate change are as manifold and various than the variation of the oceans level, the migration of some kind of species,... The goal of this work is to study the effects of climate change on dams management.

This study is applied on two structures located in the Vesdre basin, in Belgium. From an integrated model including a climate model, a hydrological model of the Vesdre watershed, a hydraulic calculation model of this watercourse and a model of dams management, the Vesdre discharges and the lakes levels can be calculated. Thanks to climate data feeding the model, a study of the influence of some parameters of the dam management rule is done, after having defined some original performance indicators. These indicators represent the damages due to floods, the hydropower production, the support of low flows and the production of drinking water throughout the year. Afterwards, from two climate scenarios, a dry and a wet, the changes induced in the Vesdre valley and in the tanks water levels are determined at the time horizons 2020-2050 and 2070-2100. Then, the sensitivity analysis, performed in the period 1974-2004, is used to research adaptations in the management rule to mitigate the effects of climate change.

Table des matières

CAHIER DES CHARGES	1
REMERCIEMENTS	2
RÉSUMÉ	3
TABLE DES MATIÈRES	4
TABLE DES FIGURES	6
TABLE DES TABLEAUX	9
1. INTRODUCTION	11
1.1. CONTEXTE	11
1.2. LA VESDRE ET SES BARRAGES	12
1.3. OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE	15
2. GESTION OPTIMISÉE DE RÉSERVOIRS : REVUE DE LA LITTÉRATURE	17
2.1. LES MULTIPLES FONCTIONS D'UN RÉSERVOIR	17
2.2. MÉTHODES D'OPTIMISATION DE LA GESTION DE RÉSERVOIRS	20
2.3. REVUE DE CAS D'ÉTUDES CONCRETS	21
2.4. ANALYSE DE SENSIBILITÉ LOCALE	23
2.5. REVUE DE LA LITTÉRATURE : QUANTIFICATION DES OBJECTIFS DE GESTION DES RÉSERVOIRS	24
3. MODÈLE INTÉGRÉ DU BASSIN DE LA VESDRE	26
3.1. MODÈLE CLIMATIQUE	27
3.2. MODÈLE HYDROLOGIQUE : MOHICAN	29
3.3. MODÈLE HYDRAULIQUE DE QUANTIFICATION DES INONDATIONS : WOLF 2D	30
3.4. MODÈLE DE CALCUL DES DOMMAGES ET RISQUES INDUITS PAR UNE CRUE	31
3.4.1. <i>Calcul du dommage dû à une crue</i>	32
3.4.2. <i>Calcul du risque d'inondations</i>	33
3.5. MODÈLE HYDRAULIQUE : WOLF 1D	35
3.6. OUTILS DE QUANTIFICATION ET INDICES DE PERFORMANCE	36
4. DESCRIPTION ET MODÉLISATION DE LA PROCÉDURE ACTUELLE DE GESTION	38
4.1. MODE DE GESTION NORMALE	39
4.2. CRITÈRES D'ENTRÉE EN MODE DE GESTION D'EMPOTEMENT	41
4.3. MODE DE GESTION D'EMPOTEMENT	42
4.4. MODE DE GESTION EN ALERTE DE CRUE	44
4.5. MODE DE GESTION DE DÉCRUE	47
4.6. ORGANIGRAMME COMPLET DE LA GESTION DES BARRAGES DE LA VESDRE	48
5. MODIFICATION DE LA LOI DE GESTION INITIALE DES RÉSERVOIRS DE LA VESDRE	49
5.1. INFLUENCE DES NIVEAUX NORMAUX DES RÉSERVOIRS POUR LA GESTION INITIALE	49
5.2. INFLUENCE DES HAUTEURS PLUVIOMÉTRIQUES D'AVERTISSEMENT	51

5.3.	INFLUENCE D'UNE PREMIÈRE MODIFICATION DANS LE MODE DE GESTION NORMALE	54
5.4.	INFLUENCE D'AUTRES MODIFICATIONS DANS LES MODES DE GESTION D'ALERTE ET DE GESTION NORMALE.....	56
5.5.	CONCLUSION CONCERNANT LES MODIFICATIONS DE LA LOI DE GESTION INITIALE.....	57
5.6.	COMPARAISON ENTRE LA NOUVELLE SIMULATION, LA SIMULATION INITIALE ET LES MESURES DISPONIBLES	57
6.	ANALYSE DE SENSIBILITÉ DES PARAMÈTRES DE LA LOI DE GESTION	61
6.1.	ANALYSE DE SENSIBILITÉ DES PARAMÈTRES EXTRINSÈQUES AU MODE DE GESTION DE CRUE.....	62
6.1.1.	<i>Caractérisation de la première situation de référence.....</i>	<i>62</i>
6.1.2.	<i>Influence de la durée du turbinage normal</i>	<i>65</i>
6.1.3.	<i>Influence des niveaux normaux des consignes.....</i>	<i>67</i>
6.1.4.	<i>Influence des amplitudes des consignes.....</i>	<i>69</i>
6.1.5.	<i>Influence du volume prélevé pour la production d'eau potable</i>	<i>72</i>
6.1.6.	<i>Influence des débits de by-pass des réservoirs</i>	<i>74</i>
6.1.7.	<i>Influence des capacités de turbinage maximales.....</i>	<i>75</i>
6.1.8.	<i>Influence des débits lâchers en mode de décrue.....</i>	<i>76</i>
6.1.9.	<i>Influence de l'ouverture du tunnel de la Helle en gestion de décrue.....</i>	<i>76</i>
6.1.10.	<i>Influence des débits d'alerte en aval [2].....</i>	<i>77</i>
6.2.	ANALYSE DE SENSIBILITÉ DES PARAMÈTRES INTRINSÈQUES AU MODE DE GESTION DE CRUE	78
6.2.1.	<i>Caractérisation de la seconde situation de référence</i>	<i>78</i>
6.2.2.	<i>Influence de la fenêtre temporelle pour le calcul du volume entrant aux réservoirs</i>	<i>80</i>
6.2.3.	<i>Influence des débits seuils en aval [19], [25] et [15].....</i>	<i>82</i>
6.2.4.	<i>Influence de la Réserve supplémentaire à Rmax [18] en mode d'alerte de crue.....</i>	<i>82</i>
6.3.	MATRICE DE SENSIBILITÉ LOCALE APPLIQUÉE À LA GESTION DES RÉSERVOIRS DE LA VESDRE.....	83
7.	ETUDE DE LA PROCÉDURE DE GESTION AVEC PRISE EN COMPTE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE	89
7.1.	EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE À L'HORIZON TEMPOREL 2070-2100	91
7.2.	EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE À L'HORIZON TEMPOREL 2020-2050	96
7.3.	RECHERCHE D'ADAPTATIONS DE LA LOI DE GESTION	98
7.3.1.	<i>Adaptations relatives au scénario sec (Adaptations A et B)</i>	<i>99</i>
7.3.2.	<i>Adaptation relative au scénario humide (Adaptation C)</i>	<i>101</i>
8.	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	102
8.1.	CONCLUSIONS.....	102
8.2.	PERSPECTIVES.....	106
9.	ANNEXES	108
9.1.	INFORMATIONS TECHNIQUES SUR LES BARRAGES	108
9.2.	INFLUENCE D'AUTRES MODIFICATIONS DANS LES MODES DE GESTION D'ALERTE ET DE GESTION NORMALE.....	110
9.3.	INFLUENCE DE LA DURÉE DU TURBINAGE NORMAL.....	110
9.4.	INFLUENCE DU VOLUME PRÉLEVÉ POUR LA PRODUCTION D'EAU POTABLE.....	111
9.5.	INFLUENCE DES DÉBITS DE BY-PASS DES RÉSERVOIRS.....	113
9.6.	INFLUENCE DES DÉBITS SEUILS EN AVAL [19], [25] ET [15]	113
9.7.	EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE À L'HORIZON 2070-2100.....	114
9.8.	EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE À L'HORIZON 2020-2050.....	117
	BIBLIOGRAPHIE.....	118

Table des figures

FIGURE 1-1 : VALLÉE DE LA VESDRE DU BARRAGE D’EUPEN À LA CONFLUENCE AVEC L’OURTHE ET LA MEUSE (DEWALS, ET AL., 2011).....	13
FIGURE 1-2 : REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DU RÉSEAU HYDROLOGIQUE DE LA VESDRE, DE SA SOURCE JUSQU’À SA CONFLUENCE AVEC LA HÛEGNE	14
FIGURE 2-1 : ILLUSTRATION DE LA FONCTION D’ÉCRÊTAGE DE CRUE DES BARRAGES DE LA VESDRE SUR L’HYDROGRAMME DE CRUE EN AVAL DES OUVRAGES DE RÉTENTION.....	18
FIGURE 2-2 : VARIABLES ET VALEURS SEUILS INFLUENÇANT LES OPÉRATIONS DE GESTION D’UN OUVRAGE DE RETENUE D’EAU (BIERI, ET AL., 2013)	19
FIGURE 3-1 : GÉNÉRATION DE SCÉNARIOS CLIMATIQUES À PARTIR DE LA MÉTHODE DU CHANGEMENT DELTA (DROGUE, ET AL., 2010).....	27
FIGURE 3-2 : TENDANCES SAISONNIÈRES DES PRÉCIPITATIONS ET TEMPÉRATURES, SELON LE SCÉNARIO UTILISÉ, ET POUR LES HORIZONS TEMPORELS 2020-2050 (FONCÉ) ET 2070-2100 (CLAIR) (DROGUE, ET AL., 2010).....	28
FIGURE 3-3 : PRINCIPE DU CHANGEMENT DELTA ILLUSTRÉ SUR LES DÉBITS À CHAUDFONTAINE EN SEPTEMBRE 1998.....	28
FIGURE 3-4 : COMPARAISON ENTRE LES APPORTS AU BARRAGE D’EUPEN MESURÉS ET SIMULÉS.....	29
FIGURE 3-5 : INONDATIONS À VERVIERS. EN BLEU : Q_{100} , JAUNE : $Q_{100} + 15\%$ ET EN ROUGE : $Q_{100} + 30\%$ (DETREMBLEUR, ET AL., 2012)	31
FIGURE 3-6 : PARAMÈTRES NÉCESSAIRES AU CALCUL DU DOMMAGE CONSÉCUTIF À UNE CRUE (SINABA, ET AL., 2011).....	32
FIGURE 3-7 : COURBES DE RISQUES D’INONDATIONS ACTUALISÉES AUX HORIZONS 2020-2050 (BLEU) ET 2070-2100 (ROUGE) (DETREMBLEUR, ET AL., 2012)	34
FIGURE 3-8 : DIVISION DE LA VESDRE EN TROIS ZONES, CHACUNE REPRÉSENTÉE PAR TROIS POINTS DE RÉFÉRENCE (BÉTHANE, VERVIERS ET CHAUDFONTAINE) (DETREMBLEUR, ET AL., 2012)	34
FIGURE 4-1 : RÉSUMÉ DE LA MODÉLISATION INITIALE DE LA LOI DE GESTION DES BARRAGES DE LA VESDRE.....	39
FIGURE 4-2 : MODE DE GESTION NORMALE	41
FIGURE 4-3 : MODE DE GESTION D’EMPOTEMENT.....	43
FIGURE 4-4 : TESTS PRÉLIMINAIRES À LA GESTION D’ALERTE D’UNE CRUE	44
FIGURE 4-5 : MODE DE GESTION D’ALERTE DE CRUE	46
FIGURE 4-6 : MODE DE GESTION DE DÉCRUE.....	47
FIGURE 4-7 : ORGANIGRAMME COMPLET DE LA SIMULATION INITIALE DE LA GESTION DES BARRAGES DE LA VESDRE	48
FIGURE 5-1 : INFLUENCE DES NIVEAUX NORMAUX DES RÉSERVOIRS POUR LA GESTION INITIALE – NIVEAUX DES LACS	50
FIGURE 5-2 : INFLUENCE DES NIVEAUX NORMAUX DES RÉSERVOIRS POUR LA GESTION INITIALE – LÂCHERS EN JANVIER-FÉVRIER 1986	51
FIGURE 5-3 : INFLUENCE DES HAUTEURS PLUVIOMÉTRIQUES D’AVERTISSEMENT- NIVEAUX D’EAU AU BARRAGE D’EUPEN... 52	52
FIGURE 5-4 : INFLUENCE DES HAUTEURS PLUVIOMÉTRIQUES D’AVERTISSEMENT – POTENTIEL DE PRODUCTION HYDROÉLECTRIQUE PAR RAPPORT À LA SITUATION 1	53
FIGURE 5-5 : MODIFICATION DE LA LOI DE GESTION.....	54
FIGURE 5-6 : PREMIÈRE MODIFICATION DANS LE MODE DE GESTION NORMALE – NIVEAUX D’EAU AU BARRAGE D’EUPEN	55

FIGURE 5-7 : NIVEAUX D'EAU AU BARRAGE DE LA GILEPPE À PARTIR DE VALEURS ENTRE 1982 À 2004 (LES TRAITS DISCONTINUS REPRÉSENTENT LES MESURES, LES TRAITS PLEINS REPRÉSENTENT LES RÉSULTATS DE L'ANCIENNE SIMULATION ET LES POINTILLÉS REPRÉSENTENT LES RÉSULTATS DE LA NOUVELLE SIMULATION)	58
FIGURE 6-1 : NOUVELLE LOI DE GESTION DE RÉFÉRENCE POUR L'ANALYSE DE SENSIBILITÉ DES PARAMÈTRES.....	61
FIGURE 6-2 : INFLUENCE DE LA DURÉE DU TURBINAGE - NIVEAUX D'EAU DES RÉSERVOIRS.....	65
FIGURE 6-3 : INFLUENCE DE LA DURÉE DU TURBINAGE – COURBES DE RISQUES POUR LA ZONE DE BÉTHANE	66
FIGURE 6-4 : INFLUENCE DES NIVEAUX NORMAUX DES CONSIGNES – NIVEAUX DES LACS	68
FIGURE 6-5 : INFLUENCE DES NIVEAUX NORMAUX DES CONSIGNES – DOMMAGES MOYENS ANNUELS DUS AUX CRUES DANS LA VALLÉE DE LA VESDRE	68
FIGURE 6-6 : INFLUENCE DES AMPLITUDES DES CONSIGNES - NIVEAUX D'EAU DES RÉSERVOIRS.....	70
FIGURE 6-7 : EFFETS D'UNE MODIFICATION D'AMPLITUDE DE LA CONSIGNE AU BARRAGE D'ÉUPEN SUR LES FAIBLES NIVEAUX D'EAU DU LAC	71
FIGURE 6-8 : INFLUENCE DU VOLUME PRÉLEVÉ POUR LA PRODUCTION D'EAU POTABLE - NIVEAUX D'EAU DES RÉSERVOIRS.....	72
FIGURE 6-9 : INFLUENCE DU VOLUME PRÉLEVÉ POUR LA PRODUCTION D'EAU POTABLE - NIVEAUX D'EAU AU BARRAGE DE LA GILEPPE ENTRE 1974 ET 2004.....	73
FIGURE 6-10 : INFLUENCE DES DÉBITS DE BY-PASS – MAM7 MINIMUM	74
FIGURE 6-11 : COMPARAISON DES DEUX SIMULATIONS DE RÉFÉRENCE - FRÉQUENCE DES NIVEAUX D'EAUX AUX RÉSERVOIRS D'ÉUPEN ET DE LA GILEPPE	78
FIGURE 6-12 : COMPARAISON DES SIMULATIONS DE RÉFÉRENCE – DOMMAGES MOYENS ANNUELS DUS AUX CRUES DANS LA VALLÉE DE LA VESDRE	79
FIGURE 6-13 : GESTION DE LA CRUE DE 1983 AVEC LE SECOND MODÈLE DE LOI DE GESTION DE RÉFÉRENCE	80
FIGURE 6-14 : INFLUENCE DE LA FENÊTRE TEMPORELLE – DOMMAGES MOYENS ANNUELS DUS AUX CRUES DANS LA VALLÉE DE LA VESDRE	81
FIGURE 6-15 : INFLUENCE DE LA FENÊTRE TEMPORELLE – FRÉQUENCE DES NIVEAUX D'EAUX AUX RÉSERVOIRS D'ÉUPEN ET DE LA GILEPPE	81
FIGURE 6-16 : COMPARAISON ADIMENSIONNELLE DE L'INFLUENCE RELATIVE DES SEIZE PARAMÈTRES SUR L'INDICATEUR DES DOMMAGES DUS AUX INONDATIONS	85
FIGURE 6-17 : COMPARAISON ADIMENSIONNELLE DE L'INFLUENCE RELATIVE DES SEIZE PARAMÈTRES SUR LES INDICATEURS DES FAIBLES NIVEAUX D'EAU DES RÉSERVOIRS.....	85
FIGURE 6-18 : COMPARAISON ADIMENSIONNELLE DE L'INFLUENCE RELATIVE DES SEIZE PARAMÈTRES SUR LES INDICATEURS DE PRODUCTION HYDROÉLECTRIQUE ET DE FAIBLES DÉBITS.....	86
FIGURE 6-19 : COMPARAISON ADIMENSIONNELLE DE L'INFLUENCE RELATIVE DES SEIZE PARAMÈTRES SUR CHACUN DES CINQ INDICATEURS DE PERFORMANCE.....	87
FIGURE 6-20 : COMPARAISON DES ÉLÉMENTS DE LA MATRICE DE SENSIBILITÉ DSS.....	88
FIGURE 6-21 : <i>COMPOSITE SCALED SENSITIVITIES (CSS)</i>	88
FIGURE 7-1 : AU DESSUS : REPRÉSENTATION SYNOPTIQUE DE L'HISTORIQUE DES DÉBITS ENTRE 1974 ET 2004. AU MILIEU ET AU DESSOUS : REPRÉSENTATION SYNOPTIQUE À L'HORIZON 2100 POUR LES SCÉNARIOS SEC ET HUMIDE.....	90
FIGURE 7-2 : EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE À L'HORIZON 2070-2100 – NIVEAUX DES LACS.....	91
FIGURE 7-3 : EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE À L'HORIZON 2070-2100 – FRÉQUENCES D'APPARITION DES HAUTS NIVEAUX DES LACS	92

FIGURE 7-4 : EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE À L'HORIZON 2070-2100 – DÉBITS CARACTÉRISTIQUES À CHAUDFONTAINE SUIVANT UNE COURBE DE WEIBULL.....	93
FIGURE 7-5 : EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE À L'HORIZON 2070-2100 – COURBES DE RISQUES POUR LA ZONE DE CHAUDFONTAINE.....	94
FIGURE 7-6 : EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE À L'HORIZON 2070-2100 – DOMMAGES MOYENS ANNUELS DUS AUX CRUES DANS LA VALLÉE DE LA VESDRE.....	94
FIGURE 7-7 : GESTION D'UN ÉPISODE DE CRUE À L'HORIZON 2070-2100, SCÉNARIO HUMIDE	95
FIGURE 7-8 : EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE À L'HORIZON 2020-2050 – COURBES DE RISQUES POUR LA ZONE DE CHAUDFONTAINE.....	97
FIGURE 9-1 : INFORMATIONS TECHNIQUES CONCERNANT LE BARRAGE DE LA GILEPPE (MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS, 1986)	108
FIGURE 9-2 : INFORMATIONS TECHNIQUES CONCERNANT LE BARRAGE D'EUPEN (MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS, 1986)	109
FIGURE 9-3 : INFLUENCE DES MODIFICATIONS DANS LES MODES DE GESTION D'ALERTE ET DE GESTION NORMALE – POTENTIEL DE PRODUCTION HYDROÉLECTRIQUE.....	110
FIGURE 9-4 : INFLUENCE DE LA DURÉE DU TURBINAGE NORMAL –DCE.....	110
FIGURE 9-5 : INFLUENCE DE LA DURÉE DU TURBINAGE NORMAL – CLASSIFICATION DES DÉBITS PAR RAPPORT À DES DÉBITS CIBLES.....	111
FIGURE 9-6 : INFLUENCE DU VOLUME PRÉLEVÉ POUR LA PRODUCTION D'EAU POTABLE – DCE.....	111
FIGURE 9-7 : INFLUENCE DU VOLUME PRÉLEVÉ POUR LA PRODUCTION D'EAU POTABLE – POTENTIEL DE PRODUCTION HYDROÉLECTRIQUE	112
FIGURE 9-8 : INFLUENCE DU VOLUME PRÉLEVÉ POUR LA PRODUCTION D'EAU POTABLE – DOMMAGES MOYENS ANNUELS DUS AUX CRUES DANS LA VALLÉE DE LA VESDRE.....	112
FIGURE 9-9 : INFLUENCE DES DÉBITS DE BY-PASS – NIVEAUX D'EAU DES LACS	113
FIGURE 9-10 : INFLUENCE DES DÉBITS SEUILS EN AVAL – DOMMAGES MOYENS ANNUELS DANS LA VALLÉE DE LA VESDRE	113
FIGURE 9-11 : EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE À L'HORIZON 2070-2100 – CLASSIFICATION DES DÉBITS PAR RAPPORT À DES DÉBITS CIBLES.....	114
FIGURE 9-12 : EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE À L'HORIZON 2070-2100 – COURBE DES DÉBITS CLASSÉS.....	114
FIGURE 9-13 : EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE À L'HORIZON 2070-2100 – DCE.....	115
FIGURE 9-14 : EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE À L'HORIZON 2070-2100 – POTENTIEL DE PRODUCTION HYDROÉLECTRIQUE	115
FIGURE 9-15 : EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE À L'HORIZON 2070-2100 – DÉBITS CARACTÉRISTIQUES À BÉTHANE SUIVANT UNE COURBE DE WEIBULL.....	116
FIGURE 9-16 : EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE À L'HORIZON 2070-2100 – DÉBITS CARACTÉRISTIQUES À VERVIERS SUIVANT UNE COURBE DE WEIBULL.....	116
FIGURE 9-17 : EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE À L'HORIZON 2020-2050 – CLASSIFICATION DES DÉBITS PAR RAPPORT À DES DÉBITS CIBLES.....	117
FIGURE 9-18 : EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE À L'HORIZON 2020-2050 – COURBE DES DÉBITS CLASSÉS.....	117

Table des Tableaux

TABLEAU 3-1 : MUNICIPALITÉS CORRESPONDANT AUX TROIS POINTS DE RÉFÉRENCE	35
TABLEAU 3-2 : DÉBITS POUR LESQUELS LE DOMMAGE DÛ AUX CRUES EST CONNU	35
TABLEAU 3-3 : DÉBITS CIBLES UTILISÉS POUR CLASSER DES DÉBITS DANS LA VESDRE	37
TABLEAU 3-4 : INDICES DE PERFORMANCE GLOBAUX	37
TABLEAU 4-1 : CRITÈRES DE DÉPASSEMENT D'UNE HAUTEUR PLUVIOMÉTRIQUE	42
TABLEAU 4-2 : CRITÈRES DE DÉPASSEMENT D'UN DÉBIT OU D'UNE HAUTEUR LIMNIMÉTRIQUE	42
TABLEAU 5-1 : PARAMÈTRES D'ÉTUDE DE L'INFLUENCE DES NIVEAUX NORMAUX DES RÉSERVOIRS POUR LA GESTION INITIALE	49
TABLEAU 5-2 : PARAMÈTRES D'ÉTUDE DE L'INFLUENCE DES HAUTEURS PLUVIOMÉTRIQUES D'AVERTISSEMENT	52
TABLEAU 5-3 : INFLUENCE DES HAUTEURS PLUVIOMÉTRIQUES D'AVERTISSEMENT – POURCENTAGE DE RISQUE TOTAL D'INONDATIONS PAR RAPPORT À LA SITUATION 1	53
TABLEAU 5-4 : INFLUENCES DE MODIFICATIONS DANS LES MODES D'ALERTE ET DE GESTION NORMALE – POURCENTAGE DU RISQUE TOTAL D'INONDATIONS PAR RAPPORT AU SCÉNARIO 7	56
TABLEAU 5-5 : COMPARAISON DES DÉBITS CARACTÉRISTIQUES MESURÉS ET SIMULÉS À CHAUDFONTAINE	59
TABLEAU 5-6 : CRITÈRES DE PERFORMANCE APPLIQUÉS AUX DÉBITS À CHAUDFONTAINE ET AUX NIVEAUX D'EAU DES RETENUES D'EUPEN ET DE LA GILEPPE	60
TABLEAU 6-1 : INDICATEURS DE PERFORMANCES DANS LA PREMIÈRE SITUATION DE RÉFÉRENCE	62
TABLEAU 6-2 : PREMIÈRE SITUATION DE RÉFÉRENCE – DISTRIBUTION DES DOMMAGES MOYENS ANNUELS CONSÉCUTIFS À UNE CRUE	63
TABLEAU 6-3 : PREMIÈRE SITUATION DE RÉFÉRENCE – DISTRIBUTION DU POTENTIEL DE PRODUCTION HYDROÉLECTRIQUE ENTRE LES DEUX BARRAGES.....	63
TABLEAU 6-4 : RÉDUCTION MAXIMALE DES DOMMAGES MOYENS ANNUELS DUS AUX CRUES DANS LA PREMIÈRE SITUATION DE RÉFÉRENCE ET DOMMAGES MOYENS ANNUELS DUS AUX CRUES EN L'ABSENCE DE BARRAGES	64
TABLEAU 6-5 : POTENTIEL DE PRODUCTION HYDROÉLECTRIQUE MOYEN ANNUEL EXTRÊME	64
TABLEAU 6-6 : PARAMÈTRES D'ÉTUDE DE L'INFLUENCE DE LA DURÉE DU TURBINAGE NORMAL.....	65
TABLEAU 6-7 : INFLUENCE DE LA DURÉE DU TURBINAGE NORMAL – ÉLÉMENTS DE LA MATRICE DE SENSIBILITÉ	67
TABLEAU 6-8 : PARAMÈTRES D'ÉTUDE DE L'INFLUENCE DES NIVEAUX NORMAUX DES RÉSERVOIRS.....	67
TABLEAU 6-9 : INFLUENCE DU NIVEAU NORMAL À LA EUPEN – ÉLÉMENTS DE LA MATRICE DE SENSIBILITÉ	69
TABLEAU 6-10 : INFLUENCE DU NIVEAU NORMAL À LA GILEPPE – ÉLÉMENTS DE LA MATRICE DE SENSIBILITÉ.....	69
TABLEAU 6-11 : PARAMÈTRES D'ÉTUDE DE L'INFLUENCE DE L'AMPLITUDE DE LA CONSIGNE	69
TABLEAU 6-12 : INFLUENCE DE L'AMPLITUDE À EUPEN – ÉLÉMENTS DE LA MATRICE DE SENSIBILITÉ.....	71
TABLEAU 6-13 : INFLUENCE DE L'AMPLITUDE À LA GILEPPE – ÉLÉMENTS DE LA MATRICE DE SENSIBILITÉ.....	71
TABLEAU 6-14 : PARAMÈTRES D'ÉTUDE DE L'INFLUENCE DE LA PRODUCTION D'EAU POTABLE.....	72
TABLEAU 6-15 : INFLUENCE DU VOLUME PRÉLEVÉ POUR LA PRODUCTION D'EAU POTABLE À EUPEN – ÉLÉMENTS DE LA MATRICE DE SENSIBILITÉ.....	73

TABLEAU 6-16 : INFLUENCE DU VOLUME PRÉLEVÉ POUR LA PRODUCTION D'EAU POTABLE À LA GILEPPE – ÉLÉMENTS DE LA MATRICE DE SENSIBILITÉ.....	73
TABLEAU 6-17 : PARAMÈTRES D'ÉTUDE DE L'INFLUENCE DES DÉBITS DE BY-PASS DES RÉSERVOIRS.....	74
TABLEAU 6-18 : INFLUENCE DES DÉBITS DE BY-PASS – ÉLÉMENTS DE LA MATRICE DE SENSIBILITÉ.....	74
TABLEAU 6-19 : PARAMÈTRES D'ÉTUDE DE LA CAPACITÉ DE TURBINAGE MAXIMALE	75
TABLEAU 6-20 : INFLUENCE DE LA CAPACITÉ DE TURBINAGE MAXIMALE À EUPEN – ÉLÉMENTS DE LA MATRICE DE SENSIBILITÉ	75
TABLEAU 6-21 : INFLUENCE DE LA CAPACITÉ DE TURBINAGE MAXIMALE À LA GILEPPE – ÉLÉMENTS DE LA MATRICE DE SENSIBILITÉ	75
TABLEAU 6-22 : PARAMÈTRES D'ÉTUDE DE L'INFLUENCE DES DÉBITS DE DÉCRUE.....	76
TABLEAU 6-23 : INFLUENCE DES DÉBITS DE DÉCRUE – ÉLÉMENTS DE LA MATRICE DE SENSIBILITÉ.....	76
TABLEAU 6-24 : INFLUENCE DE L'OUVERTURE DU TUNNEL DE LA HELLE EN GESTION DE DÉCRUE – ÉLÉMENTS DE LA MATRICE DE SENSIBILITÉ.....	76
TABLEAU 6-25 : PARAMÈTRES D'ÉTUDE DE L'INFLUENCE DES DÉBITS D'ALERTE	77
TABLEAU 6-26 : INFLUENCE DES DÉBITS D'ALERTE – ÉLÉMENTS DE LA MATRICE DE SENSIBILITÉ.....	77
TABLEAU 6-27 : PARAMÈTRES D'ÉTUDE DE L'INFLUENCE DE LA FENÊTRE TEMPORELLE	80
TABLEAU 6-28 : INFLUENCE DE LA FENÊTRE TEMPORELLE – ÉLÉMENTS DE LA MATRICE DE SENSIBILITÉ	81
TABLEAU 6-29 : PARAMÈTRES D'ÉTUDE DE L'INFLUENCE DES DÉBITS SEUILS.....	82
TABLEAU 6-30 : INFLUENCE DES DÉBITS SEUILS – ÉLÉMENTS DE LA MATRICE DE SENSIBILITÉ	82
TABLEAU 6-31 : PARAMÈTRES D'ÉTUDE DE L'INFLUENCE DU VOLUME ADDITIONNEL EN MODE D'ALERTE DE CRUE.....	83
TABLEAU 6-32 : INFLUENCE DU VOLUME ADDITIONNEL EN MODE D'ALERTE DE CRUE – ÉLÉMENTS DE LA MATRICE DE SENSIBILITÉ	83
TABLEAU 6-33 : NUMÉROTATION DES PARAMÈTRES DE GESTION ÉTUDIÉS	84
TABLEAU 7-1 : EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE À L'HORIZON 2070-2100 – INDICATEURS DES FAIBLES NIVEAUX DES LACS	92
TABLEAU 7-2 : DÉBITS CENTENNAUX À L'HORIZON 2070-2100	93
TABLEAU 7-3 : RÉDUCTION MAXIMALE DES DOMMAGES MOYENS ANNUELS DUS AUX CRUES, À L'HORIZON 2070-2100, DANS LE SCÉNARIO HUMIDE.....	95
TABLEAU 7-4 : DÉBITS CENTENNAUX À L'HORIZON 2020-2050	96
TABLEAU 7-5 : EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE À L'HORIZON 2020-2050 – DOMMAGES MOYENS ANNUELS DUS AUX CRUES DANS LA VALLÉE DE LA VESDRE.....	97
TABLEAU 7-6 : VARIATION DES INDICATEURS DE PERFORMANCE À L'HORIZON 2020-2050	98
TABLEAU 7-7 : ADAPTATION DE LA LOI DE GESTION ACTUELLE.....	99
TABLEAU 7-8 : EFFETS DES ADAPTATIONS A ET B SUR LES FAIBLES DÉBITS À L'HORIZON 2070-2100 EN SCÉNARIO SEC	100
TABLEAU 7-9 : EFFETS DES ADAPTATIONS A ET B SUR LES FAIBLES NIVEAUX DES LACS À L'HORIZON 2070-2100 EN SCÉNARIO SEC.....	100

1. Introduction

1.1. Contexte

« Le réchauffement du système climatique est sans équivoque. [...] La poursuite des émissions de GES ¹ au rythme actuel ou à un rythme plus élevé devrait accentuer le réchauffement et modifier profondément le système climatique au XXI^e siècle » (GIEC, 2007).

Le climat de la Terre est en fluctuation constante et le réchauffement climatique annoncé ne représente pas quelque chose de fondamentalement nouveau. Ce qui est nouveau, c'est la connaissance qu'a l'homme des changements qui s'opèrent et sa possibilité d'agir en conséquence des changements annoncés.

L'hydrologie, dans les différentes parties du monde, sera plus ou moins affectée par les modifications attendues des températures et des précipitations et ce, de manières diverses selon la position géographique. Dans l'Europe de l'Ouest, il est attendu un accroissement de la fréquence et de l'amplitude des crues en hiver, ainsi qu'une sécheresse plus prononcée en été, conduisant à des augmentations à la fois du nombre des faibles débits et de la demande en eau (Bates, et al., 2008).

Dans la suite de ces changements augurés, le projet AMICE (Adaptation of the Meuse to the Impacts of Climate Evolutions), financé par le programme européen INTERREG IV B, regroupe les quatre pays traversés par la Meuse. Sur base d'une étude des évolutions climatiques sur tout le bassin de la Meuse aux horizons temporels 2020-2050 et 2070-2100, l'objectif de ce projet est de développer des stratégies de réponse aux impacts du réchauffement climatique. En particulier, le programme de l'Action 3 est dédié à des simulations climatiques sur tout le bassin de la Meuse, ainsi qu'à la détermination des variables hydrauliques de la Meuse et de ses affluents aux horizons temporels précités (Drogue, et al., 2010).

Il s'avère que les ouvrages de retenue d'eau sont les moyens les plus efficaces d'atténuation des désastres hydrologiques ; ils peuvent être utilisés soit pour créer une réserve d'empotement permettant l'écrêtage d'une crue soit pour constituer une réserve d'eau en période d'étiage. Il est donc naturel de réfléchir à une gestion optimale de ces ouvrages, afin de limiter les dégradations des gestions de ceux-ci, suite aux modifications du climat (Dewals, et al., 2011).

¹ GES : Gaz à effet de serre

La gestion actuelle des barrages de la Vesdre, situés dans la partie liégeoise de la Belgique, est adaptée au climat de ces dernières années. Il convient d'étudier si cette gestion reste d'application dans un contexte de changement climatique et, dans le cas contraire, de réfléchir aux adaptations les plus opportunes à réaliser. Pour cela, une modélisation de la gestion des réservoirs est effectuée, en essayant de représenter au mieux la gestion réalisée, dans les faits, par le gestionnaire des ouvrages.

Ce travail de fin d'étude concerne l'optimisation de la gestion des deux barrages situés dans le bassin de la Vesdre, dans le but de limiter les risques en termes d'inondations à l'aval, en période de crue, et de pénuries d'eau, en période d'étiage, tout en maximisant la production hydroélectrique réalisée et ce, avec prise en compte du changement climatique. Il fait suite aux développements du projet AMICE.

1.2. La Vesdre et ses barrages

La Vesdre prend sa source dans les Hautes Fagnes et se jette dans l'Ourthe après un parcours de près de 70 kilomètres en région liégeoise (Figure 1-1). Le débit annuel moyen de la Vesdre à son exutoire (près de Chaudfontaine) est de $11 \text{ m}^3/\text{s}$ et son bassin versant a une superficie totale de 700 km^2 (Ministère de la Région wallonne, 2005). Précédemment décrite comme « *la plus ravissante vallée qu'il y ait au monde* » par Victor Hugo, la vallée de la Vesdre est aujourd'hui fortement polluée suite à son riche passé industriel. Ce passé prospère a également contribué à concentrer habitats et industries le long de ce cours d'eau, principalement entre Verviers et Liège (Aubin, 2007). Peu après Verviers, la Hoëgne se jette dans la Vesdre, à Pepinster. Malgré un bassin versant plus petit, le débit de la Hoëgne, en période de crue, a une importance considérable sur les inondations entre Pepinster et Chaudfontaine, suite à l'absence d'ouvrage de retenue d'eau sur celle-ci.

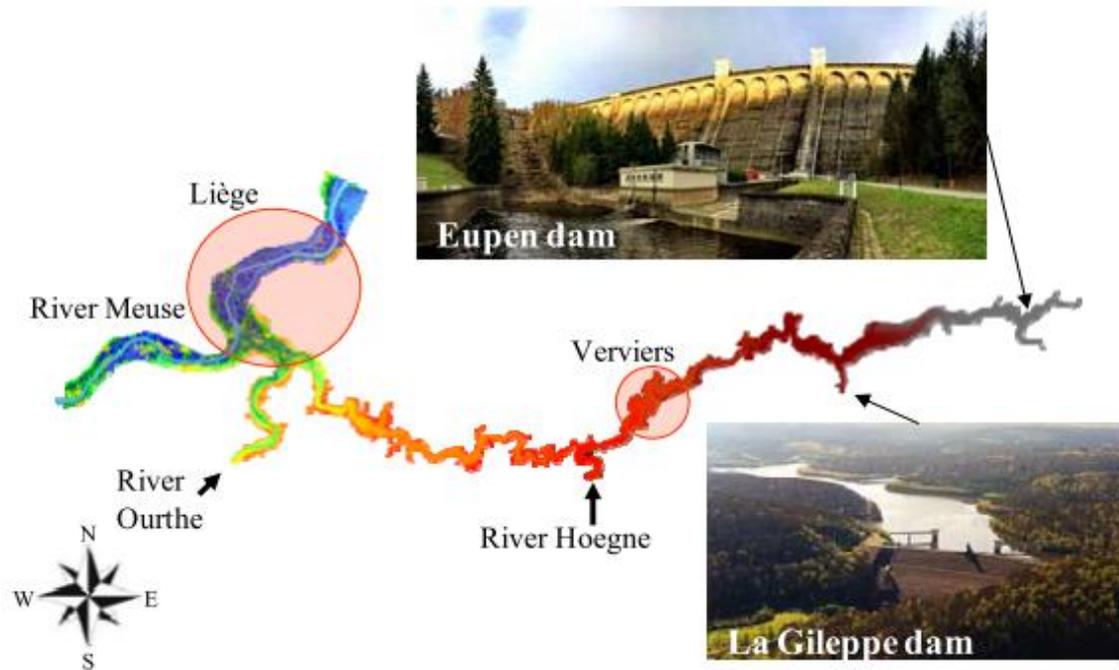


Figure 1-1 : Vallée de la Vesdre du barrage d'Eupen à la confluence avec l'Ourthe et la Meuse (Dewals, et al., 2011)

Le barrage poids de la Gileppe, situé sur la commune de Jalhay, fut inauguré en 1878 pour répondre aux besoins importants en eau, tout au long de l'année, de la production lainière fortement développée à Verviers. Rehaussé en 1971 pour quasiment doubler sa capacité, il est alimenté directement par le cours d'eau la Gileppe, dont il tire son nom, ainsi que par un tunnel vanné permettant de détourner une partie de la Soor et donc d'accroître la taille du bassin versant alimentant le lac (Figure 1-2).

Peu après la seconde guerre mondiale, en 1950, le barrage d'Eupen est à son tour inauguré, en réponse à l'accroissement des besoins en eaux industrielles et potables, malgré le déclin de l'industrie lainière (Aubin, 2007). Les cours d'eau de la Vesdre et de la Getzbach alimentent le lac d'Eupen et un tunnel de liaison peut également capter un débit en provenance de la Helle (Figure 1-2).

La fonction première des barrages de la Vesdre est l'approvisionnement en eau potable tout au long de l'année. Jusqu'en 1985, la gestion des barrages était exclusivement tournée vers la création d'une réserve d'eau, en hiver, pouvant être utilisée en été.

Ce n'est que suite aux nombreuses inondations subies par la commune densément peuplée de Chaudfontaine et à une réduction de la consommation en eau potable, à partir de 1983, qu'une fonction d'écrêtage de crue fut ajoutée aux barrages. En acceptant de réduire le potentiel de fourniture d'eau potabilisable en toute saison, une réserve d'empotement de 2 hm³ fut créée en

1985, avant d'être portée à près de 3 hm³ en 2003 (Aubin, 2007). A titre de comparaison, les volumes entrant au réservoir d'Eupen en cas de crue sont de l'ordre de 7 hm³, sur une durée de plusieurs jours.

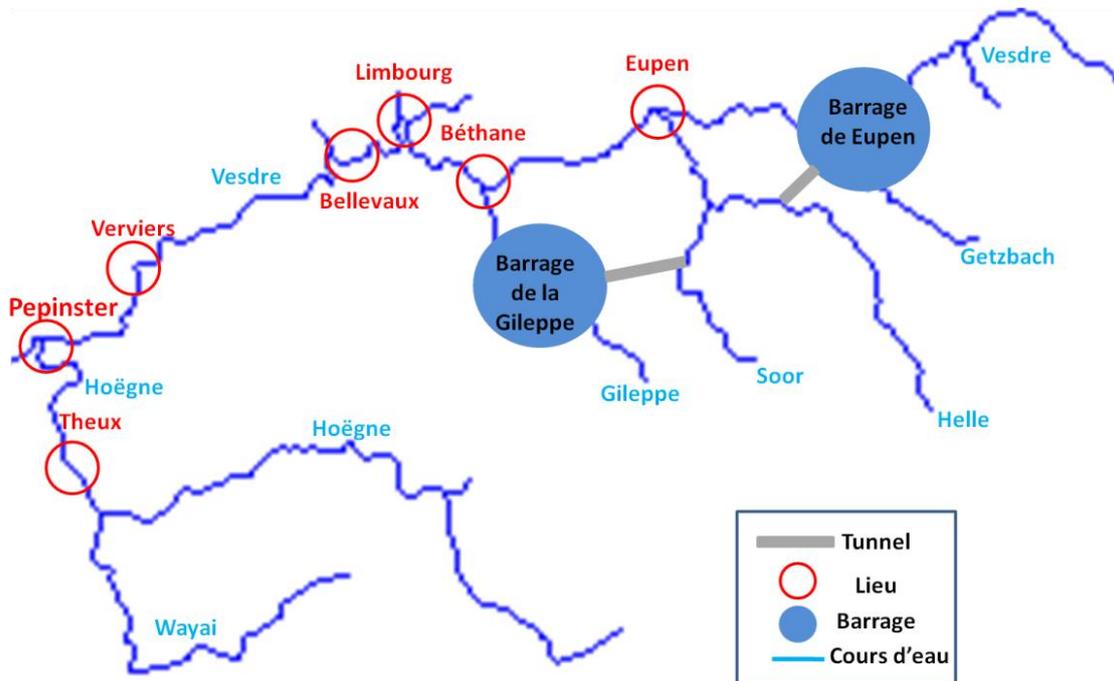


Figure 1-2 : Représentation schématique du réseau hydrologique de la Vesdre, de sa source jusqu'à sa confluence avec la Hoëgne

Il est important de souligner que la fonction de gestion des crues des barrages de la Vesdre est informelle et découle d'une possibilité d'assurer une production d'eau potable suffisante en plus de la gestion des crues. La fonction historique d'approvisionnement en eau potable reste donc bel et bien la fonction première de ces deux réservoirs (Aubin, 2007). Ceci fut également confirmé par C. Grifnée, Responsable du District de l'Est, en avril 2013.

Actuellement, les stations de traitement d'Eupen et de Stembert traitent respectivement près de 45.000 m³/j et 35.000 m³/j, avec une capacité d'approvisionnement totale de 110.000 m³/j, permettant de desservir plus de 400.000 habitants de la Province de Liège. Récemment, le projet VEGI (50 millions d'euros), débuté en 2003 et clôturé en 2009, a abouti à la modernisation des deux stations de traitement, en anticipation des normes européennes (SWDE, 2013). Avant la mise en service d'une station de traitement des eaux à Stembert, deux tours permettaient la prise d'eau à quatre niveaux, espacés de 10 mètres, selon la turbidité de l'eau. Actuellement, au barrage de la Gileppe, la station de Stembert permet un prélèvement d'eau à un niveau quelconque tout au long de l'année (entretien téléphonique avec J. Huveneers, Ingénieur des Ponts et Chaussées au District de l'Est, au SPW, en mai 2013). A

Eupen, les prises d'eau, situées au sein du barrage, sont aménagées 37 mètres sous le niveau maximal de sécurité du lac, à une cote de 324 mètres.

En plus de la gestion des crues et de l'alimentation en eau des stations de traitement, des fonctions de production d'énergie hydroélectrique et de soutien aux débits d'étiage de la Vesdre font parties des objectifs des barrages. Les turbines du barrage d'Eupen produisent annuellement près de 5 millions de kWh, soit la consommation par an de près de 1500 ménages wallons (SWDE, 2013).

En termes de gestion des crues, le barrage de la Gileppe dispose d'une réserve d'empotement proche de celle du barrage d'Eupen, pour un bassin versant deux fois inférieur. Il en ressort donc que la gestion des crues au barrage d'Eupen sera plus délicate qu'au barrage de la Gileppe. La superficie des bassins versants propres aux barrages représente la moitié de la superficie du bassin versant de la Vesdre avant la confluence avec la Hoëgne et le quart du bassin versant total de celle-ci (Dewals, et al., 2011). Des informations techniques supplémentaires concernant les deux barrages de la Vesdre sont fournies en Annexe 9.1.

1.3. Objectifs et méthodologie

L'objectif principal du travail de fin d'étude est de contribuer à une optimisation de la gestion des barrages d'Eupen et de la Gileppe, dans le cadre du projet AMICE d'étude des impacts hydrologiques liés au changement climatique.

Un premier chapitre est consacré à une revue de la littérature concernant la gestion optimisée des réservoirs. Il est destiné à faire le point sur l'ensemble des techniques développées dans le domaine et de mentionner divers cas pratiques où une gestion efficace d'ouvrages de rétention d'eau a déjà été étudiée.

Ensuite, le modèle intégré du bassin de la Vesdre est présenté. Ce modèle intégré est constitué d'un modèle climatique, d'un modèle hydrologique, d'un modèle hydraulique et d'un modèle de gestion des réservoirs. Il permet, à partir des précipitations et températures sur le bassin versant de la Vesdre et à partir d'une loi de gestion des barrages, de reproduire les écoulements dans ce cours d'eau et les niveaux d'eau des retenues de ces barrages.

Après, la gestion actuelle des barrages de la Vesdre est présentée sur base d'une note de manutention fournie par le Service Public de Wallonie (SPW). A partir de cette note, une première modélisation de la loi de gestion fut entreprise par le groupe de recherches HECE de

l'Université de Liège. Cette modélisation est alors présentée, en mettant en évidence les limitations de celle-ci et les éléments qui la différencient de la gestion réalisée en pratique.

Par la suite, sur base d'une première analyse de la modélisation de la loi de gestion disponible, des modifications de celle-ci sont entreprises afin d'accroître encore son réalisme. En particulier, l'intérêt de considérer une gestion indépendante des deux réservoirs est mis en avant.

Ensuite, à partir de la nouvelle modélisation de la loi de gestion, une analyse de sensibilité détaillée des paramètres de gestion des réservoirs est effectuée. Pour pouvoir quantifier les effets de ces divers paramètres, des indicateurs de performance originaux ont été définis de manière à représenter l'ensemble des objectifs des réservoirs. Cette analyse de sensibilité, réalisée sur la période allant de 1974 à 2004, a pour vocation de pouvoir identifier l'influence relative de chaque paramètre sur les indicateurs de performance.

Par la suite, la création d'une matrice de sensibilité locale permet la détermination des paramètres dominants, à la fois sur chaque indicateur pris individuellement et sur l'ensemble de ces indicateurs. Il ressort de cette matrice que les indicateurs de performance les plus variables sont les bas niveaux d'eau des réservoirs, particulièrement ceux du réservoir de la Gileppe. Egalement, les paramètres de gestion les plus influents sont les volumes prélevés pour la production d'eau potable et les caractéristiques des consignes.

Enfin, une fois l'analyse de sensibilité réalisée, des simulations, tenant compte du changement climatique, sont lancées en utilisant modèle actuel de la loi de gestion. Sur base des changements observés et à partir de l'analyse de sensibilité effectuée, des adaptations de la loi de gestion sont recherchées, afin de tenter d'atténuer les effets principaux du changement climatique que sont des diminutions des faibles débits et des bas niveaux des lacs, en période sèche, et des accroissements des dégâts dus aux crues. Il sera ainsi montré que des adaptations de la loi de gestion peuvent limiter la réduction des débits d'été, en période sèche, alors que l'accroissement des dégâts occasionnés par l'intensification des épisodes de crue est moins maîtrisable.

2. Gestion optimisée de réservoirs : revue de la littérature

Avant d'entamer la présentation du travail concernant la gestion efficace des barrages d'Eupen et de la Gileppe, un état des lieux des méthodes de gestion optimale des réservoirs est abordé dans ce chapitre, ainsi que quelques cas d'étude réalisés dans ce domaine.

La gestion efficace des réservoirs est un sujet de recherches largement étudié depuis les dernières décennies (Castelleti, et al., 2007). Il s'agit d'un problème complexe à résoudre, conséquence d'objectifs multiples et conflictuels des réservoirs, d'un modèle fortement non linéaire, discret et discontinu, d'un nombre important de variables en jeu, dont les sensibilités sont plus ou moins importantes, et d'un horizon temporel de prévision court (Jordan, 2007).

Dans la première partie de ce chapitre, les différentes fonctions d'un ouvrage de retenue d'eau sont présentées et leurs objectifs, multiples et parfois contradictoires, sont mis en évidence. Ensuite, différentes méthodes d'optimisation de la gestion de réservoirs sont exposées sur base d'une revue de la littérature, avant de fournir quelques cas concrets d'optimisation précédemment réalisés. Enfin, une méthode d'analyse locale de sensibilité des paramètres de gestion est présentée.

2.1. Les multiples fonctions d'un réservoir

Lors de la construction d'un ouvrage de rétention d'eau, les objectifs qui ont justifié cette construction peuvent être nombreux et variés. Ces différents objectifs sont classiquement regroupés en deux fonctions principales: **réduire les impacts d'une inondation en aval et atténuer les conséquences d'une saison sèche sur les volumes d'eau** (Dewals, et al., 2011).

En premier lieu, en période de crue, les eaux ruisselées sur le bassin versant relatif au barrage peuvent être stockées par ce dernier, à la condition qu'il dispose d'une capacité de rétention suffisante appelée réserve d'empotement. Ainsi, en empêchant temporairement ce volume d'eau d'atteindre la rivière en aval, l'hydrogramme relatif au bassin versant dont les eaux sont retenues par le barrage peut être soustrait à l'hydrogramme de crue total, en l'absence de l'ouvrage et ce, en tout point aval à la retenue. Il s'agit d'un écrêtage de la crue (Figure 2-1). Une fois la crue passée, il convient de restaurer la réserve d'empotement en relâchant de l'eau vers l'aval, à un moment où le danger d'inondations y est écarté. Evidemment, cet écrêtage de

la crue sera d'autant plus efficace que le bassin versant relatif au réservoir représentera une partie significative de l'ensemble du bassin versant du cours d'eau.

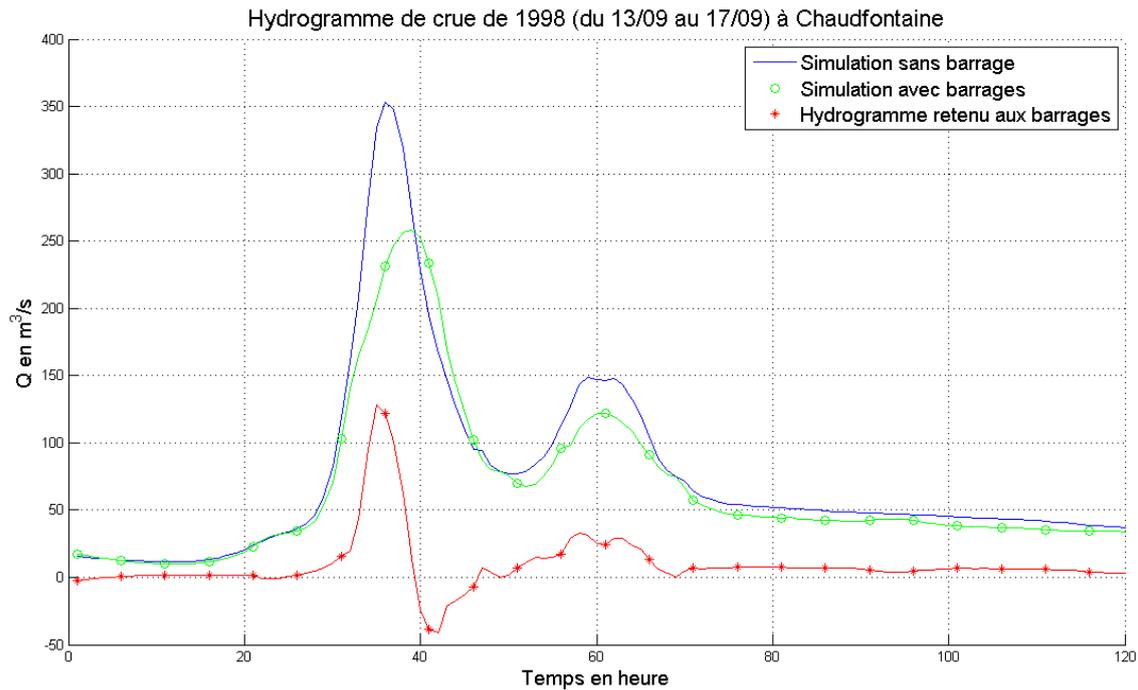


Figure 2-1 : Illustration de la fonction d'écrêtage de crue des barrages de la Vesdre sur l'hydrogramme de crue en aval des ouvrages de rétention

Cependant, la réserve d'empotement dispose d'une capacité limitée. Si le volume d'eau susceptible d'arriver à la retenue peut mettre en péril la sécurité de l'ouvrage par surverse, des lâchers d'eau doivent être réalisés, quelle que soit la situation à l'aval. Or, effectués à un moment non opportun, ces lâchers peuvent avoir pour conséquence d'amplifier la crue au moment de son pic et ainsi d'aggraver la situation. Une bonne prévision des apports hydrologiques est donc capitale pour une utilisation efficace de l'ouvrage de rétention d'eau. L'horizon temporel de prévision des apports étant limité à quelques dizaines d'heures (typiquement de quelques heures lors de l'utilisation de stations pluviométriques à 72 heures en cas d'utilisation d'un modèle météorologique), la prévision du volume entrant est une nouvelle difficulté à laquelle le gestionnaire du barrage doit faire face (Jordan, 2005).

En second lieu, les réservoirs permettent de stocker un volume d'eau en période de fortes précipitations, ou en période de fonte des neiges selon la région. Ce volume d'eau peut alors être utilisé en saison sèche pour un approvisionnement en eau potable, pour une production hydroélectrique continue tout au long de l'année, pour garantir un niveau du lac nécessaire à des activités récréatives, pour soutenir le débit d'étiage d'un cours d'eau à l'aval,... Dans ce but, il convient qu'au sortir de la saison humide le niveau d'eau dans la réserve soit le plus haut

possible, afin de limiter au mieux les risques de pénuries en saison sèche. Les différentes fonctions mentionnées dans ce paragraphe peuvent, et c'est bien souvent le cas, rentrer en concurrence les unes par rapport aux autres.

Prises indépendamment, ces diverses fonctions peuvent mener à une optimisation simple et rapide. Le problème est qu'il est rare qu'une seule d'entre elles soit attribuée à un réservoir, ce qui complexifie grandement la gestion efficace des ouvrages. « *L'optimisation globale nécessite l'application d'une méthode multi-objective de génération de solutions* » (Heller, 2007).

En effet, l'objectif de remplissage maximal de la réserve, en prévision de la saison sèche, s'oppose à l'objectif de création d'une réserve d'empotement. Il découle donc de ce conflit un compromis qui consiste à assurer une réserve suffisante au stockage de la crue devant être écrêtée, par une éventuelle opération préventive de vidage du réservoir, sans mettre en péril l'objectif de fourniture d'eau en période sèche.

De même, la fonction de soutien du débit d'étiage est opposée à la fonction de production d'eau potable, suite à la perte en eau qu'elle occasionne.

La Figure 2-2 représente bien les variables principales entrant en jeu dans l'optimisation de la gestion d'un réservoir.

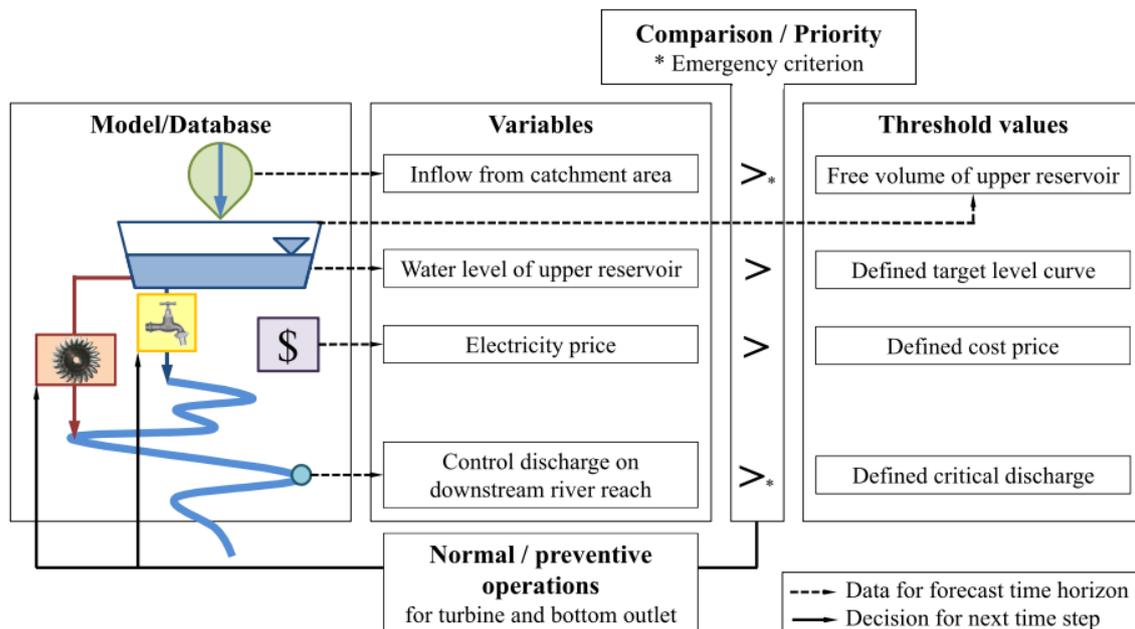


Figure 2-2 : Variables et valeurs seuils influençant les opérations de gestion d'un ouvrage de retenue d'eau (Bieri, et al., 2013)

2.2. Méthodes d'optimisation de la gestion de réservoirs

Les apports hydrologiques futurs du bassin versant relatif aux réservoirs étudiés sont généralement utilisés pour définir une gestion appropriée de ces réservoirs. De par leur nature, ces apports sont aléatoires et ne peuvent être prédits avec une certaine précision que dans un avenir fort proche. Ainsi, une gestion optimale des réservoirs est complexe à définir puisqu'elle est basée sur une méconnaissance partielle des paramètres d'entrée à court terme et sur une méconnaissance importante de ces paramètres à long terme.

L'étude de l'optimisation de la production d'énergie hydroélectrique fut abordée en 1923 par Varlet, de manière graphique par la méthode du Fil Tendue. En 1946, Massé fournit la preuve de l'efficacité de la méthode proposée par Varlet par une analyse économique et mathématique du bénéfice marginal tiré de la production d'énergie hydroélectrique sur un cas simple. Ce modèle de Massé sera généralisé à plusieurs réservoirs et à plusieurs objectifs par la suite, en avenir limité (Morel-Seytoux, 1998).

Une revue de l'état de l'art concernant la gestion optimale des réservoirs fut réalisée par J. W. Labadie (2004). Le problème se pose à partir d'une fonction objectif reprenant des critères pouvant être économiques, environnementaux, écologiques ou sociaux. A côté de cette fonction objectif, diverses contraintes sont définies portant sur les niveaux extrêmes des lacs, les débits d'étiage à l'aval des réservoirs,...

Lorsque cela est possible, une définition de la fonction objectif en termes de coûts simplifie la résolution du problème par la recherche du minimum de cette fonction (Watkins, et al., 2006). Diverses fonctions de coûts furent développées dans ce but (Jordan, 2007). Il existe un nombre important de méthodes permettant la résolution du problème posé : optimisation stochastique implicite, modèles de programmation linéaires, non linéaires, dynamique stochastique, ... Ces divers modèles sont présentés également dans l'article de J. W. Labadie (2004), mais ne seront pas utilisés dans le cadre de ce travail.

Le souci est que les objectifs de gestion ne peuvent pas toujours être quantifiés en unité monétaire. Pensons aux conséquences environnementales des faibles débits ou encore aux conséquences sociales d'une pénurie d'approvisionnement en eau potable. Dans ce cas, la définition d'une fonction objectif à minimiser peut être remplacée par une analyse multicritère.

De plus, l'élaboration et l'optimisation de la gestion des réservoirs ont également fait l'objet de plusieurs thèses de doctorats, entre autres réalisées par E. Parent (1991), P. Heller (2006) et F. Jordan (2007).

Le travail réalisé par E. Parent (1991) expose des différentes étapes nécessaires à l'élaboration des consignes de gestion des barrages : de la discussion indispensable avec le gestionnaire pour déterminer ce que serait une bonne gestion à l'optimisation possible de cette gestion, en passant par la création des modèles hydrologique et hydraulique.

La thèse de P. Heller (2006) a l'intérêt d'étudier de nombreux acteurs et facteurs liés à l'optimisation d'une loi de gestion : acteurs économiques, écologiques, locaux, etc. et facteurs hydrauliques, énergétiques, financiers, socio-économiques, écologiques, etc.

Dans sa thèse de doctorat, F. Jordan (2007) présente l'optimisation locale d'un aménagement qui consiste à faire abstraction de son influence sur le cours d'eau aval et sur d'éventuels autres aménagements. Il s'agit donc d'un problème simplifié où seul l'ouvrage en tant que tel est pris en compte. Cette méthode fut mise en œuvre sur l'aménagement de Mattmark. De plus, une optimisation complète de la gestion d'un ensemble de dix aménagements hydroélectriques sur le Rhône supérieur est réalisée.

Finalement, reprenons les termes employés par J. Michel et P. A. Roche (1983) pour juger de l'optimalité de la gestion d'un réservoir : *« L'optimalité d'une gestion, ou d'une procédure de décision particulière, ne se juge pas seulement à son score pour un critère particulier et pour un modèle hydrologique simplifié donné. Elle s'éprouve à l'usage, et ses qualités sont plutôt souplesse, robustesse à des erreurs de prévision (toujours possibles), et richesse de l'information mise à la disposition des instances de décisions en temps réel. Pour évaluer ces qualités, la simulation sur des années, réelles ou fictives, est indispensable. »*

2.3. Revue de cas d'études concrets

La recherche d'une optimisation de la gestion de réservoirs a suscité un nombre important de travaux pratiques partout dans le monde. Dans ce chapitre, sont présentés sept cas d'études jugés intéressants, parmi l'ensemble des études réalisées dans ce domaine.

Une première étude fut menée pour déterminer la compatibilité de deux fonctions d'un bassin que sont le stockage de l'eau en cas de crue et son utilisation, en été, dans le but de soutenir le débit d'étiage et de répondre aux besoins d'irrigation (Camnasio, et al., 2010). Ce bassin est situé sur la rivière Secchia, dans la région Romagna Emilia, au nord de l'Italie. La démarche de

modélisation de sa gestion est également présentée dans l'article. L'étude a mis en évidence la nécessité de disposer de modèles de prévision des précipitations fiables sur une plage de temps suffisante.

Le fleuve Zambezi est le plus grand fleuve d'Afrique se jetant dans l'Océan Indien. Le système de réservoirs aménagés sur celui-ci est le plus grand d'Afrique du sud et s'étale sur trois pays (Zambie, Mozambique et Zimbabwe). Une modélisation de ce système fut créée dans le but de pouvoir étudier l'effet de modifications dans la gestion des réservoirs et d'ajouts de contraintes (pêche, irrigation,...). Les résultats de cette étude ont permis de déterminer sur quel réservoir une augmentation de la capacité de turbinage était la plus avantageuse. De plus, ils ont mis en évidence un déficit conséquent de la production hydroélectrique lorsque la bande de variation annuelle du niveau d'eau des réservoirs était réduite (Gandolfi, et al., 1997).

Ensuite, J.-C. Bader, et al., (2003) ont étudié la gestion du barrage Manantali, sur le fleuve Sénégal, pour une période allant de 1970 à 2000, à partir de l'analyse de l'influence de trois paramètres : l'hydrogramme objectif de crue, la cote de niveau d'eau dans la retenue déclenchant l'alerte de crue et l'hydrogramme objectif en basses eaux.

Après, une approche intéressante fut appliquée sur le lac de Côme dans les Alpes italiennes (Guariso, et al., 1986). Dans le cas où une loi de gestion du réservoir étudié existe déjà et a été validée durant un certain nombre d'années, la méthode présentée dans cet article consiste à perturber cette gestion autour de la loi de référence de manière à ce que la nouvelle loi de gestion ne soit pas trop éloignée de l'ancienne. En effet, la méthode existante étant éprouvée et validée à l'usage, la conservation de sa structure est justifiée. Les étapes de cette méthode sont les suivantes. Une phase de conceptualisation et d'identification doit d'abord fournir une gestion permettant à la simulation de donner des résultats proches des mesures historiques. Ensuite, une phase de relaxation consiste à perturber certains paramètres et à analyser leurs influences sur les objectifs du réservoir. Enfin, une phase d'optimisation peut être abordée.

Cette dernière méthode est utilisée dans ce travail. La première phase, consistant à s'approcher des mesures historiques par une simulation correcte de la gestion des réservoirs, fut précédemment étudiée par S. Detrembleur, et al., (2012) et est encore améliorée dans ce travail. L'objectif de l'étude présentée dans ce rapport est une analyse détaillée de la phase de relaxation des différents paramètres de la loi de gestion des réservoirs de la Vesdre.

Plus récemment, la méthode précédente fut appliquée aux lacs Saint-François et Aylmer, au sud du Québec, dans un contexte de changement climatique (Fortin, et al., 2007) ainsi qu'aux réservoirs du fleuve Columbia, le quatrième plus grand fleuve des Etats-Unis (Payne, et al.,

2004). Au Québec, la quantification de l'analyse de sensibilité des paramètres en phase de relaxation est réalisée grâce à des indicateurs de performance représentatifs des crues à l'aval, des niveaux des lacs et de la production hydroélectrique.

Enfin, une procédure semblable à celle utilisée dans ce travail fut employée par Bieri, et al., (2013) sur un système complexe de neuf centrales de production hydroélectrique et de huit réservoirs, situés sur la partie supérieure de la rivière Aare, en Suisse. A partir d'un modèle, combinant l'hydrologie et hydraulique, alimenté par des précipitations et des températures (disponibles toutes les dix minutes) et à l'aide d'une loi de gestion pour les ouvrages hydrauliques, le calibrage du modèle intégré fut effectué sur base d'une première crue majeure et validé sur une seconde crue majeure. Ce modèle fut alors utilisé pour tester les influences respectives de plusieurs scénarios de gestion des réservoirs, appliqués sur une crue majeure de référence. Un des scénarios choisis considérait le réservoir rempli à l'arrivée de la crue pour obtenir le cas le plus défavorable et ainsi une limite supérieure du pic de crue pouvant être atteint.

2.4. Analyse de sensibilité locale

La présentation de l'analyse de sensibilité locale, telle qu'elle est employée dans ce travail, se base principalement sur la thèse de S. Wildemeersch (2012). Elle est utilisée dans la phase de relaxation des paramètres afin de déterminer leurs influences respectives sur les indicateurs de performance.

L'analyse de sensibilité locale consiste à étudier un système autour d'un nombre limité de paramètres étudiés indépendamment. Théoriquement, cette méthode est valide uniquement dans le cadre de modèles linéaires mais la pratique a montré qu'elle était acceptable lorsque le modèle n'était pas « extrêmement non linéaire » (Hill, et al., 2007). L'intérêt de cette méthode est qu'elle réduit considérablement le nombre de simulations à réaliser. Or, l'ordre de grandeur d'une simulation étant de plusieurs jours, cette simplification est indispensable dans le cadre de ce travail.

Après avoir choisi un certain nombre de paramètres b_i à faire varier et les indicateurs de performance y_j représentatifs des objectifs des réservoirs, la matrice de sensibilité J peut être créée par un nombre de simulations correspondant au nombre de paramètres :

$$J = \begin{pmatrix} \left. \frac{\partial y_1}{\partial b_1} \right|_b & \dots & \left. \frac{\partial y_1}{\partial b_{npar}} \right|_b \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left. \frac{\partial y_{nind}}{\partial b_1} \right|_b & \dots & \left. \frac{\partial y_{nind}}{\partial b_{npar}} \right|_b \end{pmatrix} \quad (2-1)$$

Avec $npar$ le nombre de paramètres et $nind$ le nombre d'indicateurs.

Une fois la matrice J complétée, les influences des paramètres sur les indicateurs sont analysées par le dss pour *dimensionless scaled sensitivities* et par le css pour *composite scaled sensitivities*. Les éléments dss_{ij} évaluent l'importance des variations de l'indicateur i en fonction du paramètre j , par une mise sous forme adimensionnelle. Les éléments css_{ij} sont une mesure de la sensibilité de l'ensemble des indicateurs à un paramètre j et permettent donc de choisir les paramètres les plus influents à garder pour l'optimisation.

$$dss_{ij} = \left. \frac{\partial y_i}{\partial b_j} \right|_b \times |b_j| \times \left| \frac{1}{y_i} \right| \quad (2-2)$$

$$css_j = \left(\frac{\left(\sum_{i=1}^{nind} (dss_{ij})^2 \right) \Big|_b}{nind} \right)^{1/2} \quad (2-3)$$

2.5. Revue de la littérature : quantification des objectifs de gestion des réservoirs

La quantification des impacts consécutifs à un événement de crue est étudiée dans de nombreux articles en évaluant une courbe de dommage et un risque d'inondations, basés sur une analyse statistique des débits de crue (Sinaba, et al., 2013; Dewals, et al., 2013). De nombreux auteurs expliquent la méthode à suivre, qui sera présentée au chapitre suivant de manière plus approfondie.

En ce qui concerne la quantification des impacts des faibles débits, les études réalisées sont bien moins nombreuses et moins développées que pour les crues. Dans un article publié en 2012, B. Sinaba, et al., présentent les impacts du changement climatique à la fois sur les crues et sur les faibles débits dans le bassin de la Meuse. Cependant, ces impacts des faibles débits ne sont pas quantifiés de manière économique, ce qui complexifie la recherche d'une solution

optimale. Le premier effet analysé par B. Sinaba, et al., est lié à la production énergétique à la fois par refroidissement des centrales thermiques à l'aide de l'eau de la Meuse et par la production d'énergie par les centrales hydroélectriques aménagées le long de celle-ci. Ensuite, les effets du changement climatique sur le rendement des cultures et sur la navigation sont également abordés. Cependant, aucune quantification quant à l'impact environnemental des faibles débits n'est présentée.

Finalement, la quantification des conséquences du changement climatique sur la fourniture en eau potable fut étudiée par H. Römgens (2013) sur le bassin de la Meuse, avec prise en compte d'une probable augmentation de la demande en eau. L'auteur pointe deux effets distincts du changement climatique : une réduction des réserves en eau disponibles au moment où la demande est la plus importante et une détérioration de la qualité de l'eau disponible suite à une moindre dilution des effluents. Remarquons toutefois que des recherches sur les effets d'une réduction des apports hydrologiques, en saison sèche, sur la production d'eau potable doivent encore être menées.

3. Modèle intégré du bassin de la Vesdre

L'optimisation de la gestion des barrages de la Vesdre, en vue de réduire les dégâts consécutifs aux crues, de garantir un approvisionnement continu en eau tout au long de l'année, de produire une quantité d'énergie hydroélectrique maximale et de soutenir les faibles débits, avec prise en compte du changement climatique, nécessite un certain nombre de modèles numériques repris ci-dessous (Pohl, et al., 2006).

- Un modèle climatique de détermination des précipitations et des températures ;
- Un modèle hydrologique de conversion des données climatiques en débits d'apport sur tout le bassin versant du cours d'eau ;
- Un modèle de gestion des réservoirs (développé au chapitre suivant) ;
- Un modèle hydraulique du cours d'eau avec, pour entrées, les débits d'apport du modèle hydrologique ;
- Eventuellement, un modèle de calcul du risque d'inondations permet une quantification plus précise de l'objectif de limitation des dommages dus aux crues.

L'ensemble des modèles climatique, hydrologique, hydraulique, de gestion des réservoirs et de calcul des dommages dus aux crues sont regroupés en un modèle intégré du bassin de la Vesdre, développé dans le cadre du projet AMICE (Detrembleur, et al., 2012).

Cependant, les analyses des changements climatiques et de la sensibilité des paramètres de la loi de gestion des barrages d'Eupen et de la Gileppe ne nécessitent pas l'utilisation complète du modèle intégré du bassin de la Vesdre développé. En effet, sur base des résultats fournis par le modèle intégré du projet AMICE, l'utilisation d'un modèle hydraulique unidimensionnel, alimenté par les modèles climatique et hydrologique, suffit pour mettre à jour les résultats du modèle complet. Il va sans dire que le gain en termes de temps de calcul est conséquent et justifie cette approche.

Les différents modèles constituant le modèle intégré du bassin de la Vesdre sont d'abord présentés ci-après. Ensuite, la démarche d'actualisation des données nécessaire aux études d'influences des paramètres de la loi de gestion et aux analyses des effets du changement climatique, est présentée.

A la fin de ce chapitre, les indicateurs de performance, proposés pour quantifier les effets des différents paramètres de gestion des réservoirs, ou du changement climatique, sur les fonctions de ces réservoirs, sont présentés.

3.1. Modèle climatique

La présentation du modèle climatique est basée sur un rapport du projet AMICE (Drogue, et al., 2010). Ce modèle utilise l'approche du changement Delta, jugée robuste et transparente, pour prendre en compte le changement climatique (te Linde, et al., 2010; Fortin, et al., 2007). Cette méthode consiste à projeter les précipitations et les températures, mesurées ces dernières années, aux horizons temporels 2020-2050 et 2070-2100, à partir de tendances saisonnières influencées par les scénarios d'émissions de gaz à effets de serre retenus, parmi l'ensemble des scénarios développés par le GIEC (IPCC, 2007) (Figure 3-1). L'utilisation de modèles climatiques régionaux (RCM) permet d'affiner les résultats obtenus par les modèles climatiques globaux (GCM).

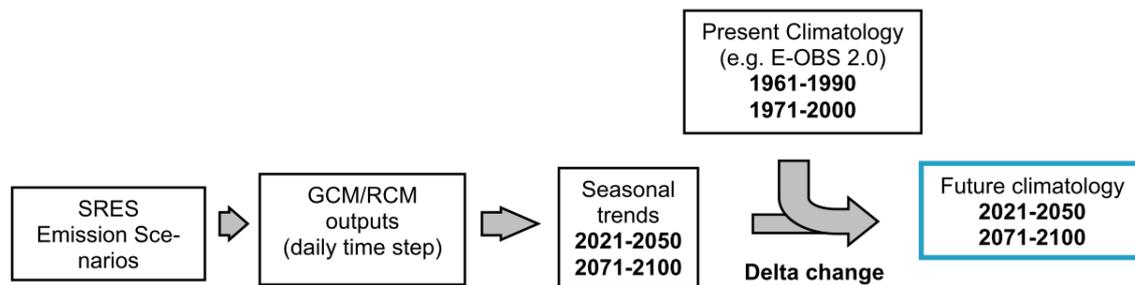


Figure 3-1 : Génération de scénarios climatiques à partir de la méthode du changement delta (Drogue, et al., 2010)

Tous les scénarios développés par le GIEC étant équiprobables actuellement, deux scénarios extrêmes, parmi la multitude des scénarios simulés par le GIEC, un sec et un humide, furent choisis dans le cadre du projet AMICE.

Sur base de ces scénarios, des projections concernant les précipitations et les températures, dans la partie wallonne du bassin versant de la Meuse, furent réalisées pour les deux horizons temporels étudiés. Sur la Figure 3-2, la température est en augmentation en toute saison et quel que soit le scénario d'émission de gaz à effets de serre choisi. Ensuite, les précipitations sont réduites en été dans les deux scénarios et accrues en hiver dans le scénario humide.

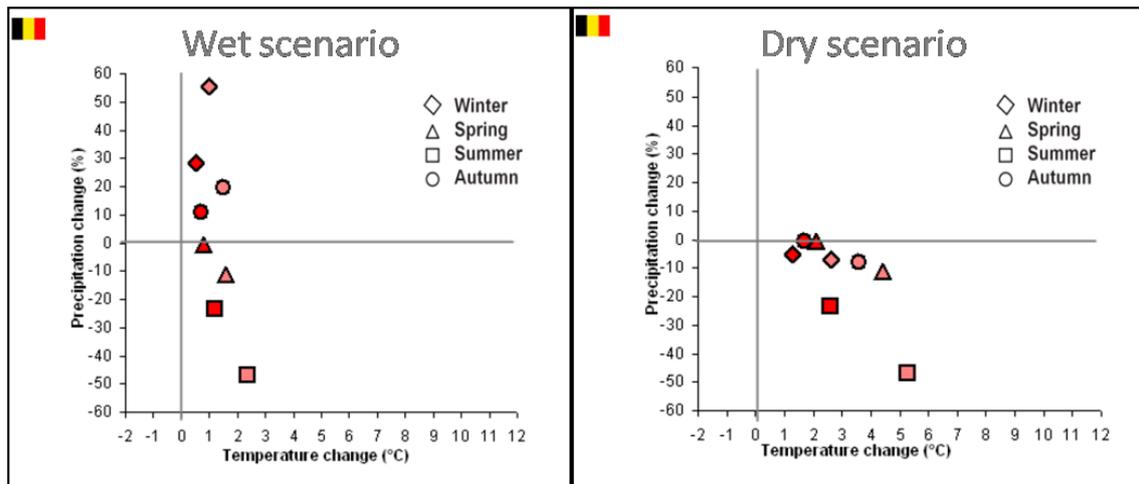


Figure 3-2 : Tendances saisonnières des précipitations et températures, selon le scénario utilisé, et pour les horizons temporels 2020-2050 (foncé) et 2070-2100 (clair) (Drogué, et al., 2010)

Pour illustrer le principe du changement Delta, la Figure 3-3 compare les débits à Chaudfontaine, lors de la crue majeure de septembre 1998, avec le scénario climatique humide à l'horizon 2070-2100, créé par perturbation des données climatiques actuelles.

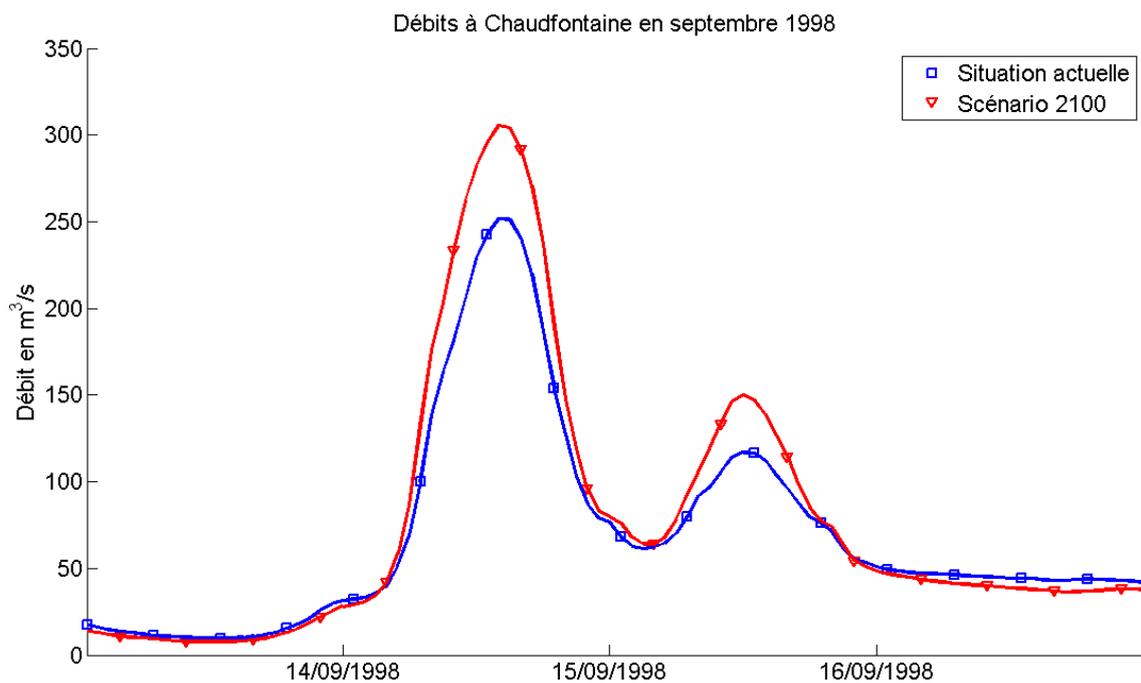


Figure 3-3 : Principe du changement Delta illustré sur les débits à Chaudfontaine en septembre 1998

3.2. Modèle hydrologique : Mohican

La présentation du modèle hydrologique Mohican (Modèle Hydrologique Intégré pour le calcul des Crues et l'Amplitude des Niveaux) se base sur la Note Technique élaborée par l'Aquapôle (Magermans, et al., 2011).

Les données d'entrée du modèle hydrologique sont les précipitations et les températures, mesurées ces dernières années ou prédites par le modèle climatique, sur l'ensemble du bassin versant. Les précipitations sont mesurées quotidiennement depuis 1961 et de façon horaire depuis 1982.

Dans un premier temps, seuls les modèles du sol et des eaux souterraines tournent sur une période de 10 ans (de 1961 à 1970), afin de s'affranchir de l'influence des conditions initiales du modèle. Dans un second temps, le modèle complet calcule alors les apports latéraux sur tout le bassin versant de la Vesdre, sur une période de trente-cinq années (de 1971 à 2005).

Comme montré à la Figure 3-4, les apports résultant du modèle hydrologique surévaluent les faibles débits et sous-évaluent les débits élevés. Le bilan total des apports horaires entre 1982 et 2004, calculé via la simulation, est cependant fort proche du bilan total résultant des mesures, avec une différence de 2%. La simulation des écoulements souterrains est simplifiée, ce qui entraîne une pauvre reproduction des faibles débits, fortement tributaires de ces écoulements. Par contre, la reproduction des crues majeures, moins sensibles aux écoulements souterrains, est jugée suffisamment bien représentée.

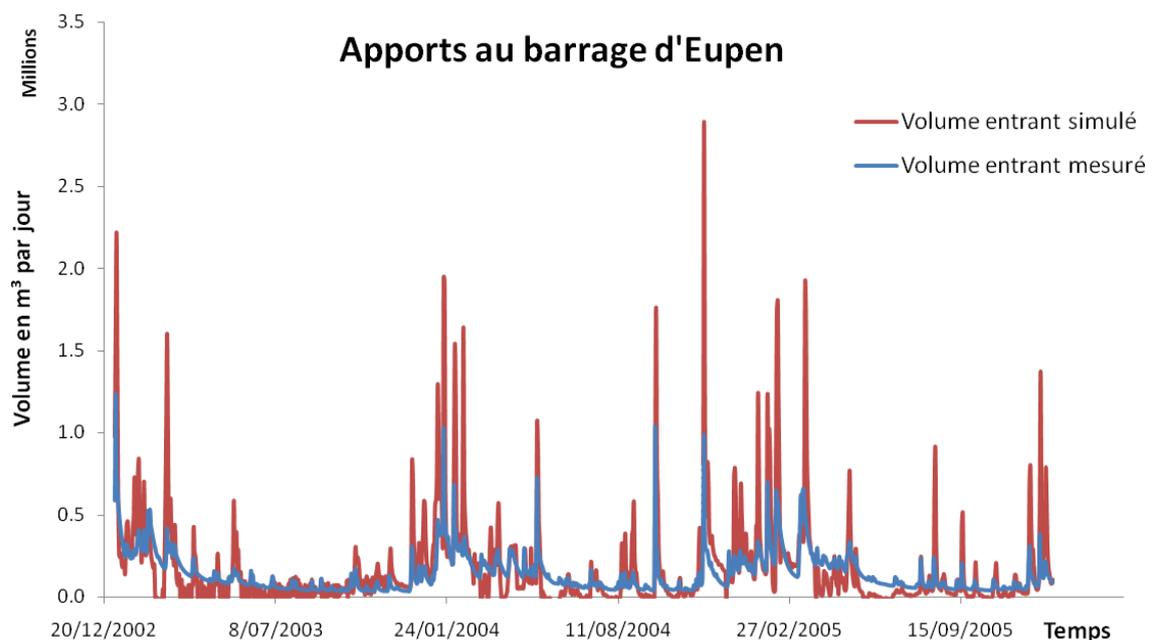


Figure 3-4 : Comparaison entre les apports au barrage d'Eupen mesurés et simulés.

Malgré certaines discordances entre les mesures et les résultats du calcul, plus ou moins accentuées selon la position et la période considérées, « *l'étalonnage actuel du modèle de la Vesdre devrait être suffisant pour évaluer l'impact de l'évolution des pluies sur le bassin considéré dans ce projet* » (Magermans, et al., 2011). D'ailleurs, il a été montré que l'effet relatif de modifications de paramètres de calage sur l'évaluation des changements climatiques est peu important (Pugin, et al., 2005).

A Chaudfontaine, une diminution de maximum 13% du débit caractéristique d'étiage moyen est simulée à l'horizon 2070-2100, alors que le débit caractéristique d'étiage minimal est plus ou moins constant. En ce qui concerne le débit caractéristique de crue moyen, une augmentation de près de 30% est obtenue pour la période 2070-2100.

Dans le cadre du projet AMICE, concentré sur le bassin versant de la Meuse, le modèle hydrologique a abouti à une estimation de croissance des débits centennaux horaires de +15% en 2020-2050 et +30% en 2070-2100, et à une décroissance des débits minimaux annuels moyennés sur 7 jours (MAM7) de -10% en 2020-2050 et de -40% en 2070-2100 (Droque, et al., 2010).

3.3. Modèle hydraulique de quantification des inondations : Wolf 2D

Le programme Wolf 2D fut développé par l'équipe de recherches HECE de l'Université de Liège. A partir des apports latéraux fournis par le modèle Mohican et d'une condition limite de hauteur d'eau en aval, les débits et hauteurs d'eau sont calculés tous les 5 mètres le long de la Vesdre, d'Eupen à Chaudfontaine, et permettent de modéliser de manière bidimensionnelle les inondations (Detrembleur, et al., 2012).

Basés sur des données géographiques à haute résolution par acquisition LIDAR et sur une interpolation des sections du cours d'eau, disponibles tous les 50 mètres, les débits et hauteurs d'eau sont calculés par résolution des équations en eaux peu profondes (Ernst, et al., 2010).

La résolution des équations est effectuée par volumes finis en utilisant la méthode de Runge-Kutta 13 et en considérant des solutions stationnaires, validées par le type de vallées, étroites et raides, qui limite fortement le stockage (de Wit, et al., 2007).

Le logiciel Wolf 2D fut employé pour simuler les inondations consécutives aux débits Q_{25} , Q_{50} , Q_{100} , $Q_{100} + 15\%$ et $Q_{100} + 30\%$. Les deux derniers représentent respectivement des débits centennaux aux horizons temporels 2020-2050 et 2070-2100, en première approximation, et

sur base du rapport de l'Action 3 du projet AMICE consacré au bassin de la Meuse (Droge, et al., 2010).

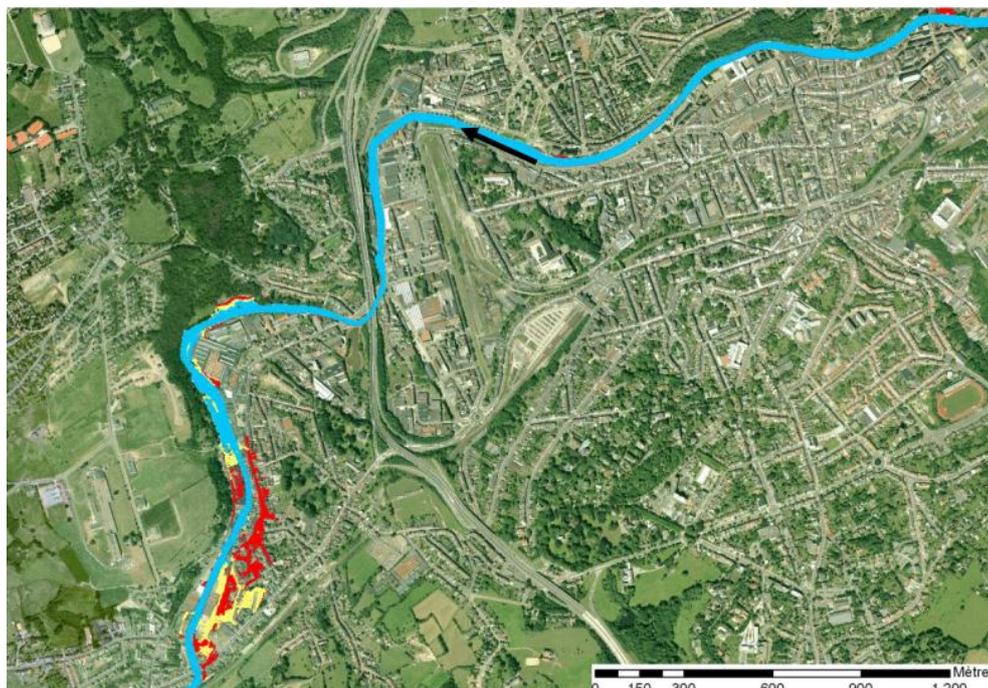


Figure 3-5 : Inondations à Verviers. En bleu : Q_{100} , jaune : $Q_{100} + 15\%$ et en rouge : $Q_{100} + 30\%$ (Detrembleur, et al., 2012)

3.4. Modèle de calcul des dommages et risques induits par une crue

A partir des informations fournies par le modèle hydraulique Wolf 2D sur les inondations consécutives à certains débits de la Vesdre, les dommages qui sont liés à ceux-ci peuvent être quantifiés pour chaque zone. En calculant les dégâts relatifs à des débits de différentes périodes de retour, une courbe de dommages dus aux inondations, encore appelée courbe de risques d'inondations, représentant les dégâts en fonction de la probabilité de récurrence des débits, peut-être élaborée. Enfin, le risque d'inondations, représentant le dommage moyen annuel attendu pour la zone considérée, est obtenu en intégrant cette courbe de dommages. A nouveau, la présentation du modèle de calcul des dommages et risques se base sur l'article WP1 – Action 8 du projet AMICE.

3.4.1. Calcul du dommage dû à une crue

Les différents paramètres rentrant en jeu dans le calcul du dommage consécutif à un débit donné sont illustrés à la Figure 3-6.

A la carte de distribution des hauteurs d'eau, réalisée par l'analyse hydraulique, est superposée une carte détaillée d'occupation du sol obtenue par les données du PLI (Plan de localisation informatique) et du cadastre. D'abord, une valeur correspondant au dégât maximal causé par une inondation est associée à chaque m^2 de la carte, selon la catégorie d'utilisation du sol. Ensuite, cette valeur est multipliée par un dommage relatif pour obtenir le dommage réel par m^2 . Le dommage relatif, dont l'unité est le pourcent, est exprimé en fonction de la hauteur d'eau à l'endroit considéré. Ces courbes diffèrent en fonction de la catégorie de sol étudiée. Enfin, le dommage total s'obtient en additionnant l'ensemble des dégâts par m^2 sur toute la zone inondée.

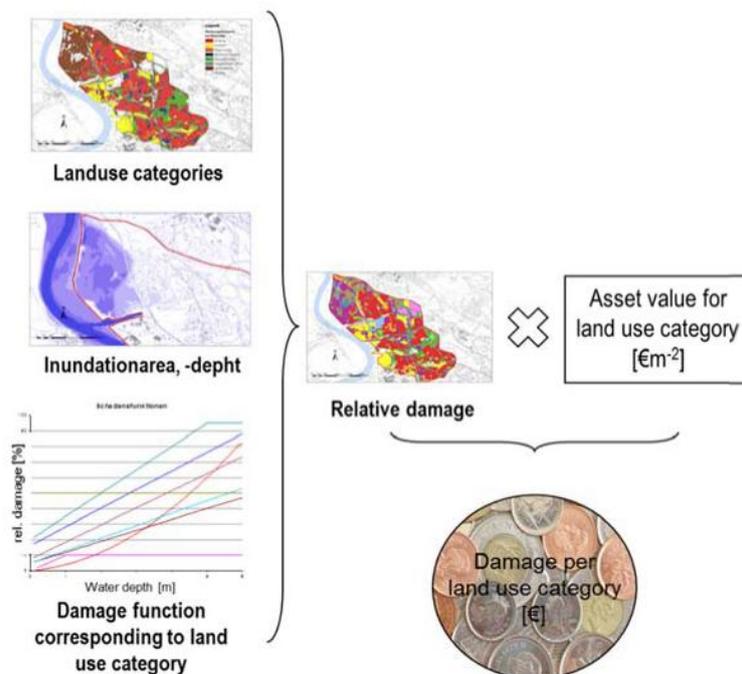


Figure 3-6 : Paramètres nécessaires au calcul du dommage consécutif à une crue (Sinaba, et al., 2011)

Dans le cadre du projet AMICE, seuls les dommages directs et tangibles sont considérés. Sont considérés comme directs, les dégâts causés par contact physique avec la crue et, comme tangibles, les dommages auxquels il peut être attribué une perte monétaire (Sinaba, et al., 2011).

Enfin, la démarche qui vient d'être présentée peut être appliquée à diverses échelles : macro-échelle, méso-échelle et micro-échelle. L'étude du bassin de la Vesdre, réalisée dans le cadre du

projet AMICE, a considéré successivement une approche à méso-échelle suivie d'une étude à micro-échelle, appliquée uniquement aux dégâts immobiliers des bâtiments. Plus l'échelle de l'étude est faible et plus la précision augmente, au détriment de la complexité et du temps de calcul.

Les dommages furent calculés, dans la situation actuelle, pour les débits Q_{25} , Q_{50} , Q_{100} , $Q_{100} + 15\%$ et $Q_{100} + 30\%$ et ce, pour les municipalités de : Eupen, Baelen, Limbourg, Dison, Verviers, Pepinster, Olne, Trooz, Chaudfontaine et Liège. Les dégâts correspondant au débit de plein bord et à un débit intermédiaire furent également évalués afin d'augmenter la précision du calcul du risque annuel, celui-ci étant considérablement influencé par les dommages apparaissant pour de hautes fréquences (Ward, et al., 2011). Ces valeurs sont reprises au Tableau 3-2 et correspondent aux débits injectés par tronçons dans le modèle hydraulique Wolf 2D.

3.4.2. Calcul du risque d'inondations

A partir des dégâts calculés pour des débits de diverses fréquences de récurrence, la courbe de risques d'inondations peut être approximée d'autant mieux qu'un nombre important de points de celle-ci est disponible.

Une fois cette courbe de risques élaborée dans la situation actuelle et pour la gestion courante du barrage, il n'est plus nécessaire de recommencer une simulation hydraulique bidimensionnelle pour chaque horizon temporel ou pour chaque analyse de sensibilité des paramètres. En effet, il suffit de déplacer la courbe de dommages en attribuant à chacun des sept débits, dont le dégât associé est connu, sa nouvelle fréquence de récurrence. Sur la Figure 3-7, cette démarche est illustrée. Il y est de plus montré que les débits $Q_{100} + 15\%$ et $Q_{100} + 30\%$ ne représentent que des approximations des débits centennaux aux horizons 2020-2050 et 2070-2100 sur la Vesdre.

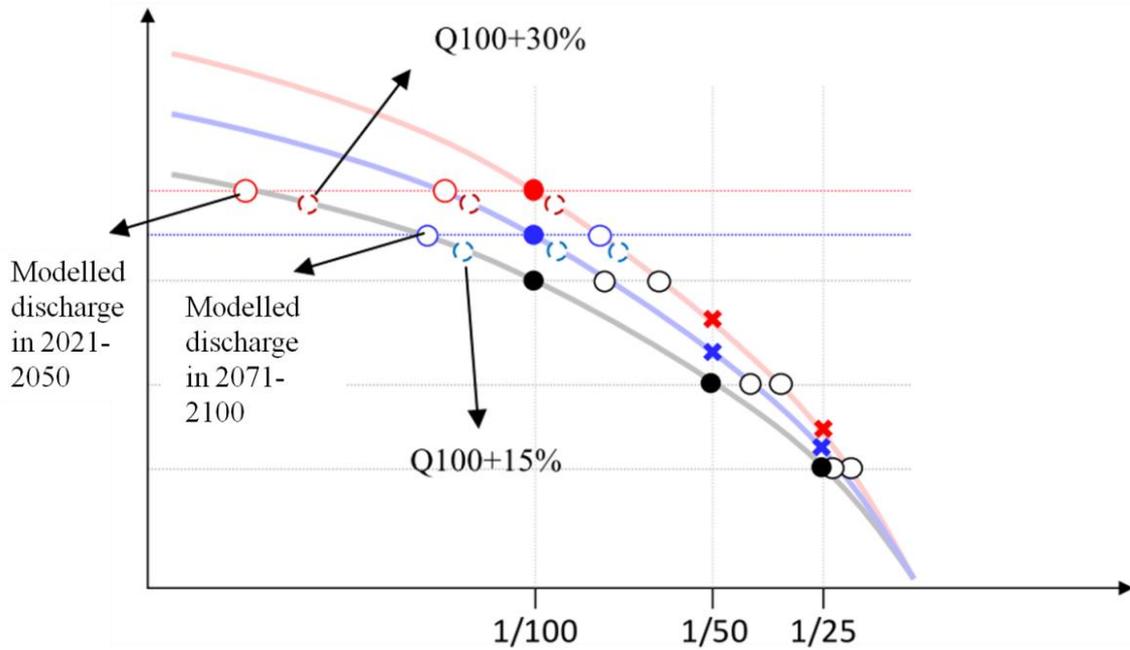


Figure 3-7 : Courbes de risques d'inondations actualisées aux horizons 2020-2050 (bleu) et 2070-2100 (rouge) (Detrembleur, et al., 2012)

Enfin, l'intégration de la courbe de dommages dus aux inondations fournit le dommage annuel moyen attendu, ou risque, correspondant à la zone pour laquelle la courbe de risques est construite. Cette intégration est préférentiellement réalisée par intégration analytique d'une courbe logarithmique approximant les points obtenus (Detrembleur, et al., 2012).

Pour évaluer le risque total annuel relatif au bassin de la Vesdre, le rapport WP1 – Action 8 du projet AMICE propose de diviser la Vesdre en trois parties, chacune représentée par un lieu de référence, comme montré à la Figure 3-8 et au Tableau 3-1.

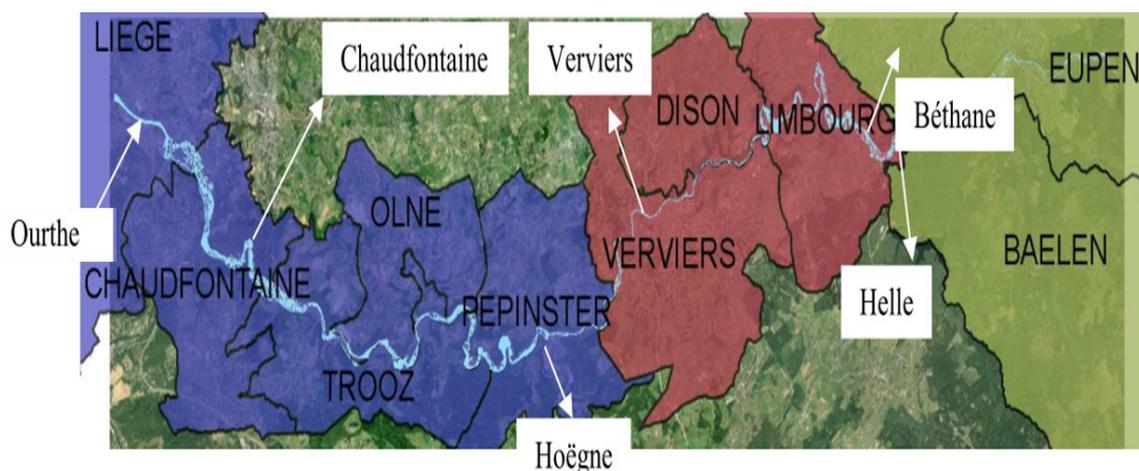


Figure 3-8 : Division de la Vesdre en trois zones, chacune représentée par trois points de référence (Béthane, Verviers et Chaudfontaine) (Detrembleur, et al., 2012)

Point de référence	Municipalités				
Chaufontaine	Liège	Verviers	Limbourg	Béthane	Baelen
	Chaufontaine		Dison		Eupen
	Trooz		Verviers		
	Olne				
	Pepinster				

Tableau 3-1 : Municipalités correspondant aux trois points de référence

En m^3/s	$Q_{plein\ bord}$	Q_{interm}	Q_{25}	Q_{50}	Q_{100}	$Q_{100 + 15\%}$	$Q_{100 + 30\%}$
Chaufontaine	120	150	226	241	255	293.25	331.5
Verviers	60	90	115	128	141	162.15	183.3
Béthane	55	55	67	75,6	84	96.6	109.2

Tableau 3-2 : Débits pour lesquels le dommage dû aux crues est connu

En additionnant les courbes de risques des municipalités relatives à chaque point de référence, trois nouvelles courbes sont créées. Le risque total annuel sur le bassin de la Vesdre est alors pris comme la somme des risques des zones de Béthane, Verviers et Chaufontaine.

Dans ce travail, la modification du risque d'inondations ne peut-être réalisée que par un changement des probabilités d'occurrence des crues et non par une correction des dommages occasionnés pour un certain débit. Pour cela, l'occupation de la plaine alluviale de la Vesdre est supposée immuable dans le temps. Il s'agit bien évidemment d'une hypothèse forte et peu réaliste, mais permettant toutefois une quantification acceptable de l'impact du changement climatique et des changements de loi de gestion des barrages sur les inondations dans la vallée de la Vesdre.

3.5. Modèle hydraulique : Wolf 1D

Comme expliqué dans le paragraphe 3.4.2, le calcul du risque d'inondations pour le bassin de la Vesdre est obtenu à partir des courbes de dommages construites pour les zones de Béthane, Verviers et Chaufontaine.

Ainsi, en ce qui concerne l'étude des dégâts provoqués par des inondations, l'actualisation du risque total annuel est réalisée via une actualisation des courbes de risques des zones de Béthane, Verviers et Chaufontaine. Or, il est précisé précédemment que des nouvelles courbes de dommages peuvent s'obtenir par simple translation des points discrets constituant la courbe de risques de référence (Figure 3-7).

Ainsi, pour chaque nouvelle gestion du barrage, les courbes statistiques donnant les débits caractéristiques à Béthane, Verviers et Chaufontaine, en fonction des fréquences de récurrence, sont élaborées. A partir de ces courbes, les fréquences relatives aux débits, dont le

dommage est connu, sont déterminées, ce qui permet de construire les nouvelles courbes de risques.

Pour réaliser les courbes statistiques des débits aux trois points de référence, un modèle hydraulique à une dimension est suffisant, et justifié du point de vue du temps de calcul. Le logiciel utilisé est ainsi Wolf 1D, avec une taille de maille plus grossière de près de 200 mètres.

3.6. Outils de quantification et indices de performance

Dans le cadre de l'étude de sensibilité des différents paramètres de gestion des barrages et de l'étude des effets du changement climatique, des outils de quantification originaux des objectifs de ces barrages sont évalués à partir des résultats numériques fournis pour les années allant de 1974 à 2004. Le commencement à l'année 1974 est choisi afin de s'affranchir des conditions initiales de niveaux d'eau dans les lacs et l'année 2005 est rejetée car non complète.

Ces outils de quantification des objectifs des réservoirs doivent refléter l'ensemble des fonctions des barrages que sont : la gestion des inondations en aval, l'alimentation continue en eau potable, la production hydroélectrique et la soutenance du débit d'étiage de la Vesdre. En effet, tous les paramètres ne peuvent pas s'exprimer de façon économique.

L'élément le plus logique pour quantifier les problèmes d'inondations en aval est le dommage moyen annuel, calculé par intégration de la courbe de risques. La méthode statistique employée pour déterminer les débits caractéristiques et leurs fréquences de récurrence est celle de Weibull, conseillée pour la Vesdre par divers auteurs (Bauwens, et al., 2010).

Pour quantifier la possibilité d'alimentation en eau potable des barrages, la courbe annuelle des niveaux d'eau quotidiens, moyennés sur les 31 années étudiées, est utilisée. En plus de celle-ci, une seconde courbe, donnant la fréquence de récurrence pour chaque niveau d'eau quotidien, est construite.

Après, un élément de quantification mesurant le potentiel hydroélectrique annuel moyen, en kWh, est élaboré sur base de la formule (3-1). Un rendement unitaire est supposé, par manque d'informations, et nous avons réalisé une hypothèse quant aux cotes des centrales hydroélectriques à chaque barrage: des cotes de 304 mètres à Eupen et de 246 mètres à la Gileppe, basées sur des plans en coupe des ouvrages (Ministère des Travaux publics, 1986). Une dernière hypothèse prise consiste à accepter que tous les débits inférieurs à la capacité de turbinage maximale ($4,5 \text{ m}^3/\text{s}$ à Eupen et $1,8 \text{ m}^3/\text{s}$ à la Gileppe) soient turbinés, à l'exception du débit de base relâché dans la Vesdre (40 l/s) par l'évacuateur de crue à chaque barrage.

$$P = \frac{1}{1000N_{année}} \sum_{h=1}^{end} \eta \rho g \min(Q_{out} - Q_{40 l/s}; Q_{turb, max}) (z_{lac} - z_{turbine}) \quad (3-1)$$

Avec h une numérotation horraire durant 31 ans, η le rendement supposé unitaire, z les cotes et ρg le poids spécifique de l'eau.

Ensuite, la soutenance du débit d'étiage est caractérisée à la fois par le débit caractéristique d'étiage (DCE) à Chaudfontaine, Verviers et Béthane et par la moyenne et le minimum, sur les 31 ans simulés, du *mean annual minimum 7-days* (MAM7) à ces mêmes endroits.

Enfin, la courbe des débits classés, moyennée sur les années étudiées, est également utilisée pour évaluer l'effet de chaque paramètre. Un dernier outil de quantification consiste à comparer les débits dans la Vesdre aux valeurs du Tableau 3-3, correspondant à la nouvelle simulation de référence (Référence I), présentée par la suite. Les définitions du débit caractéristique de crue (DCC), du débit médian (DM) et du débit caractéristique d'étiage (DCE) se rapportent à un rapport analytique du SPW (Brahy, et al., 2007).

	Alerte de crue	DCC	DM	DCE
Unité	m^3/s	m^3/s	m^3/s	m^3/s
Bellevaux – entre Limbourg et Verviers	40	12,7	2,8	1,4
Pepinster	90,5	29,9	6,2	2,5

Tableau 3-3 : Débits cibles utilisés pour classer des débits dans la Vesdre

L'ensemble des outils de quantification qui vient d'être présenté, permet une analyse détaillée de l'influence des modifications des objectifs des barrages. Cependant, il est également intéressant d'avoir une vision rapide de l'effet d'un paramètre, chose non permise de par le nombre important d'indicateurs utilisés. Ainsi, cinq indices scalaires de performance, chacun représentatif d'une fonction du barrage, sont repris au Tableau 3-4. Il est observé que les variations du DCE suivent les mêmes tendances que les variations du MAM7 moyen.

	Gestion des inondations	Approvisionnement en eau potable	Production hydroélectrique	Soutenance du débit d'étiage de la Vesdre
Indices de performance	Dommage moyen annuel total	Minimum des niveaux quotidiens moyens à Eupen et à la Gileppe	Potentiel moyen de production hydroélectrique	DCE moyen à partir de la courbe des débits classés

Tableau 3-4 : Indices de performance globaux

4. Description et modélisation de la procédure actuelle de gestion

La procédure de gestion des barrages, telle qu'elle fut initialement modélisée, se base sur une note de manutention des eaux de la Vesdre et de la Gileppe (SPW, 2004), communiquée le 3 février 2011 par M. Rouffart à M. Pirotton, ainsi que sur le rapport WP1 – Action 8 du projet AMICE (Detrembleur, et al., 2012). A partir de cette note de manutention, une simulation de la gestion des barrages fut réalisée, préalablement au travail réalisé, par P. Archambeau, chercheur qualifié au HECE. Une note de manutention plus récente fut également fournie par la suite (SPW, 2008). Cette dernière reste conforme à l'ancienne note dans les principes et dans les valeurs.

Il est important de souligner que la gestion actuelle des barrages, en pratique, n'est pas automatique, mais découle de décisions prises par une ou plusieurs personnes, en se basant toutefois sur la procédure décrite dans la note de manutention. La simulation créée s'écarte donc inévitablement de la gestion réelle.

Au cours de la modélisation initialement créée par le département HECE, certains choix furent pris pour pallier à un manque d'informations dans la note de manutention utilisée.

La Figure 4-1 donne une vue simplifiée de la loi de régulation des barrages telle qu'elle fut initialement implémentée. Celle-ci fait état de quatre modes de gestion distincts : gestion normale, gestion d'empotement, alerte de crue et gestion de décrue. Ces différents modes sont détaillés dans la suite du rapport en discutant, le cas échéant, les éventuels choix spécifiques à la modélisation effectués.

La modélisation initiale est réalisée en considérant un mode de gestion commun pour les deux barrages ; lorsqu'un type de gestion est déclenchée pour un ouvrage, l'autre ouvrage rentre également dans celui-ci.

adéquate à la production d'eau potable tout au long de l'année. La consigne retenue par le service des barrages permet d'assurer la production d'eau potable en quantité suffisante, malgré une reconduction d'année sèche. Celle-ci est basée sur le niveau particulièrement bas enregistré en 1976.

Le choix de cette consigne est crucial puisque le niveau en hiver se doit de garantir une réserve d'empotement en cas de crue et le niveau, en été de garantir une réserve en eau suffisante pour la période sèche. Les cotes normales des barrages, qui correspondent aux niveaux maximaux de la consigne en période de crue, sont fixées à Eupen et à la Gileppe respectivement à 358.5 mètres et 298 mètres dans la note de manutention, afin de créer une réserve d'empotement minimale de près de 3 millions de mètres cube pour chaque barrage. L'évolution temporelle de la consigne, sur une année, suit une loi sinusoïdale dont l'amplitude et la phase furent calées pour représenter, en moyenne, les variations des niveaux des lacs mesurées entre 1982 et 2005. Pour la situation de référence, une amplitude de 3 mètres est retenue.

En pratique, le service des barrages dispose de courbes enveloppes entre lesquelles les niveaux des lacs doivent se situer. Les amplitudes maximales de ces courbes enveloppes sont renseignées plus hautes que l'amplitude retenue dans la simulation, puisque allant vers des valeurs proches de 7 à 8 mètres.

En ce qui concerne le débit en turbinage normal, un équilibre entre le volume quotidien sortant des réservoirs et le volume quotidien y entrant, après déduction de l'alimentation en eau des stations de traitement, a abouti à une hypothèse de 1,5 m³/s turbiné 6 heures par jour à chaque barrage. En pratique, la variabilité de ce turbinage normal est grande².

Enfin, un test sur la hauteur d'eau permet de maintenir le niveau des réservoirs sous le niveau normal par des lâchers appropriés réalisés en cas de besoin.

² Un turbinage important peut, par exemple, être réalisé suite à l'organisation d'une course de kayak à l'aval.

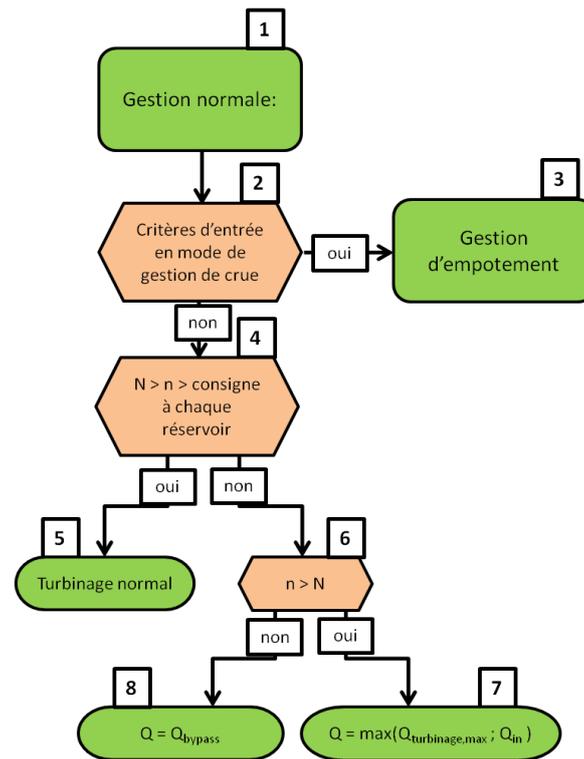


Figure 4-2 : Mode de gestion normale

4.2. Critères d'entrée en mode de gestion d'empotement

Trois critères d'entrée en mode de gestion d'empotement sont cités dans la note de manutention du SPW :

- 1) En cas de situation exceptionnelle
- 2) En cas de dépassement d'une hauteur pluviométrique d'avertissement
- 3) En cas de dépassement d'une hauteur limnimétrique d'avertissement.

Seuls les deux derniers cas sont implémentés dans la modélisation.

La deuxième condition permet de détecter l'arrivée potentielle d'une crue aux barrages. En pratique, les hauteurs pluviométriques sont mesurées au barrage d'Eupen et sur la Helle, pour le barrage d'Eupen, et au barrage de la Gileppe et à Hestreux, pour le barrage de la Gileppe. Lorsqu'une seule de ces stations détecte des précipitations supérieures aux critères du Tableau 4-1, le mode de gestion d'empotement est enclenché. Dans la modélisation, les précipitations proviennent directement du modèle hydrologique Mohican et sont également comparées aux valeurs présentées dans le tableau en dessous.

	Jun à Novembre	Décembre à Mai
Unité	<i>mm</i>	<i>mm</i>
Lecture à 8h	25	15
Lecture à 16h	15	10
Somme de 2 lectures en moins de 24h	30	20
Lecture après une averse caractérisée	50	
Unité	<i>mm/h</i>	
Lecture d'une croissance pluviométrique	30	

Tableau 4-1 : Critères de dépassement d'une hauteur pluviométrique

La troisième condition permet d'éviter, ou en tout cas de limiter, des inondations dans la vallée de la Vesdre lorsque les hauteurs d'eau dans celle-ci atteignent des valeurs d'alerte fournies au Tableau 4-2. Les critères imposés à la station de Bellevaux en pratique, sont, pour la simulation, appliqués à la confluence entre la Vesdre et la Helle, en amont. Ceci sera discuté au chapitre 4.4.

	Localité	Hauteur seuil	Débit seuil	Hauteur d'inondation
	Unité	<i>m</i>	<i>m³/s</i>	<i>m</i>
Pour la Vesdre	Bellevaux	0,55	40	0,95
	Pepinster après confluence	2,90	90.5	2,90
Pour la Hoëgne	Pepinster	1,25	80	1,25

Tableau 4-2 : Critères de dépassement d'un débit ou d'une hauteur limnimétrique

4.3. Mode de gestion d'empotement

Une fois le mode d'empotement activé, le volume d'eau susceptible d'entrer dans chaque lac est estimé à partir des mesures pluviométriques, réalisées à chaque barrage, et d'une évaluation de l'équivalent en eau provenant de la neige éventuellement accumulée sur le bassin versant. Pour la modélisation, le calcul du volume susceptible d'entrer dans chaque réservoir est réalisé en sommant les débits entrant dans chaque lac, résultats de l'analyse hydrologique

du modèle Mohican, sur une période de 48 heures, et en tenant compte des bassins versants de la Soor et de la Helle. Il y a donc une différence entre la simulation et la réalité puisque la simulation utilise une prévision exacte du volume entrant sur 48 heures alors que, dans la pratique, la prévision du volume entrant, à partir des hauteurs pluviométriques et d'une évaluation de la neige éventuellement accumulée sur le bassin versant, permet seulement une prévision approchée à une échelle temporelle allant de 6 heures (mesures pluviométriques) à quelques dizaines d'heures (neige accumulée). De plus, l'inexactitude des prévisions, en pratique, est élevée, notamment pour l'évaluation des apports neigeux.

Après avoir réalisé l'estimation du volume d'eau susceptible d'entrer dans chaque réservoir, plusieurs modes de gestion peuvent être activés par comparaison de ce volume avec la réserve maximale disponible. Cette réserve maximale correspond à la réserve d'eau vacante en acceptant un remplissage jusqu'à des niveaux critiques de sécurité, fixés aux ouvrages d'Eupen et de la Gileppe respectivement à 361 mètres et à 300 mètres. Lorsque le volume d'eau susceptible d'entrer dans les réservoirs est supérieur à la réserve maximale, l'alerte de crue est enclenchée.

Si le volume d'eau entrant est inférieur à la réserve maximale, il n'y a aucun danger que les précipitations entraînent une surverse du barrage et la gestion d'empotement est maintenue. Le volume est empoté en appliquant un turbinage normal.

Enfin, lorsque le niveau d'eau dans chaque réservoir est inférieur au niveau normal, le mode de gestion normale est restauré.

La Figure 4-3 représente le mode de gestion d'empotement qui vient d'être présenté.

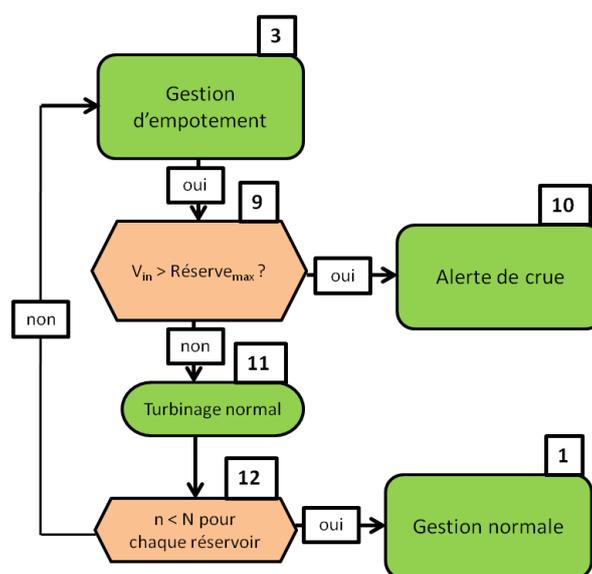


Figure 4-3 : Mode de gestion d'empotement

4.4. Mode de gestion en alerte de crue

Lorsque le volume susceptible d'entrer dans la retenue est supérieur à la réserve maximale disponible, l'empotement de la phase de pointe de crue doit être réalisé tout en empêchant, à tout moment, la surverse du barrage par des lâchages appropriés du volume ne pouvant être stocké. Le défi est ainsi de lâcher le volume d'eau excédentaire à la réserve du barrage à des moments où ces lâchers ne provoqueront pas d'inondations en aval.

Le premier test effectué, dans ce mode d'alerte de crue, consiste à vérifier que le niveau du lac est inférieur au niveau maximal. La surverse du barrage étant intolérable, tout le débit entrant est évacué par l'évacuateur de crue lorsque le test précédent est négatif et le tunnel correspondant à ce barrage est fermé. Dans cette configuration, le barrage ne permet plus d'atténuer les inondations en aval et le seul objectif est de rabattre le niveau du lac sous la cote maximale de sécurité.

Ensuite, une analyse des variations du débit et de la hauteur d'eau à Pepinster est effectuée dans le but de déterminer si la gestion de décrue peut-être déclenchée. Dans la simulation, un temps de maintien minimal de 10 jours en mode de gestion d'alerte de crue est imposé, de manière à ne pas déclencher la gestion de décrue trop rapidement.

Ces deux premiers tests sont illustrés à la Figure 4-4.

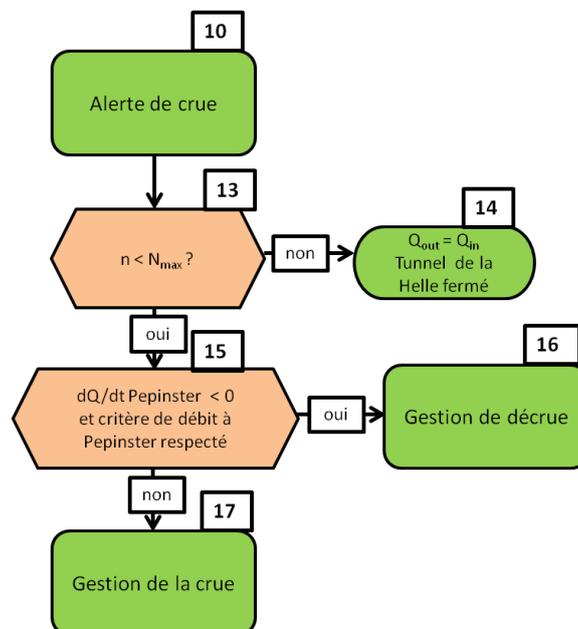


Figure 4-4 : Tests préliminaires à la gestion d'alerte d'une crue

Si les deux tests précédents ne renvoient pas vers des gestions spécifiques, la gestion des barrages consiste à maintenir le niveau d'eau du réservoir assez bas, en l'absence d'inondations

en aval, et à stocker les volumes d'apports, en cas d'inondations. Le stockage réalisé lorsque la crue entre dans une phase de pointe sera d'autant plus important que la cote est maintenue basse en début de crue.

En cas de lâchers, les turbines fonctionnent à plein régime (4,5 m³/s à Eupen et 1,8 m³/s à la Gileppe (Ministère des Travaux publics, 1986). Dans tous les cas, le gradient de montée des débits lâchers est limité à 5 m³/s toutes les 10 minutes.

La procédure à suivre est différenciée suite à un test sur le volume entrant et sur le niveau du lac (noté [18] sur la Figure 4-5).

Si ce test est négatif, l'empotement de la crue à Eupen est réalisé de la manière suivante : lorsque le débit à la confluence entre la Vesdre et la Helle est inférieur au débit seuil d'inondation, des lâchers peuvent être effectués au barrage d'Eupen (Lâchers I). Ceux-ci prennent la valeur minimale entre le débit entrant dans le réservoir et la différence entre le débit seuil d'inondation et le débit mesuré à la confluence. La même procédure est appliquée à Pepinster, après la confluence avec la Hoëgne, pour le barrage de la Gileppe. Cette gestion est en concordance avec celle présentée par P. Heller (2006) dans le chapitre consacré au modèle de laminage actif en gestion de crue.

Dans la configuration dans laquelle le test [18] est positif, les lâchers (Lâchers II) réalisés sont indépendants du débit entrant dans chaque réservoir et sont pris de façon à atteindre le seuil d'inondation à l'aval. Dans ce cas-ci, le tunnel de la Helle peut-être fermé lorsque le niveau d'eau du réservoir d'Eupen dépasse une certaine valeur.

Ainsi, les lâchers au barrage d'Eupen sont indépendants des niveaux d'eau à Pepinster, ce qui constitue une première différence avec la gestion réalisée en pratique. Il faut également remarquer que, pour la simulation, les critères attribués à Bellevaux sont appliqués à la confluence entre la Vesdre et la Helle alors que, en réalité, la station de Bellevaux est située entre Limbourg et Verviers (Figure 1-2). Ce choix sera maintenu dans la suite, du fait de certaines incohérences dans la note de manutention concernant la station de Bellevaux. Enfin, la détermination des lâchers à un certain pas de calcul ne tient pas compte des lâchers réalisés aux pas de calcul précédents ; ce qui peut provoquer des oscillations peu réalistes lorsque les lâchers sont évalués par différence entre le seuil d'inondation et le débit passant à un endroit donné.

Il y a ainsi certaines différences dans la gestion des crues réalisée en pratique par rapport à la modélisation créée. Cependant, le principe de la gestion de crue simulée est conforme à la pratique puisqu'il est basé sur une comparaison avec des débits seuils à l'aval.

Enfin, une remarque s'impose lorsque les lâchers sont calculés comme la différence entre le seuil d'inondation à Bellevaux ou à Pepinster et le débit y passant. Il s'agit en effet d'une vision utopiste de la modélisation de la gestion d'un barrage puisque, en pratique, les débits sont déterminés par un pressiomètre mesurant les hauteurs d'eau et à l'aide d'une courbe de tarage hauteur-débit. Ces mesures étant entachées d'erreurs de toutes sortes, la précision sur les débits est vraisemblablement de l'ordre de la dizaine de m^3/s .

Les débits seuils considérés dans la modélisation initiale prennent les mêmes valeurs qu'au Tableau 4-2.

La note fournie par le SPW considère un turbinage maximal, même en période d'inondations à l'aval, alors que la simulation impose, dans cette situation, un turbinage nul. Il y est également mentionné de fermer le tunnel de la Helle en cas d'inondations entre le barrage et Bellevaux. Ce dernier élément n'est pas pris en considération.

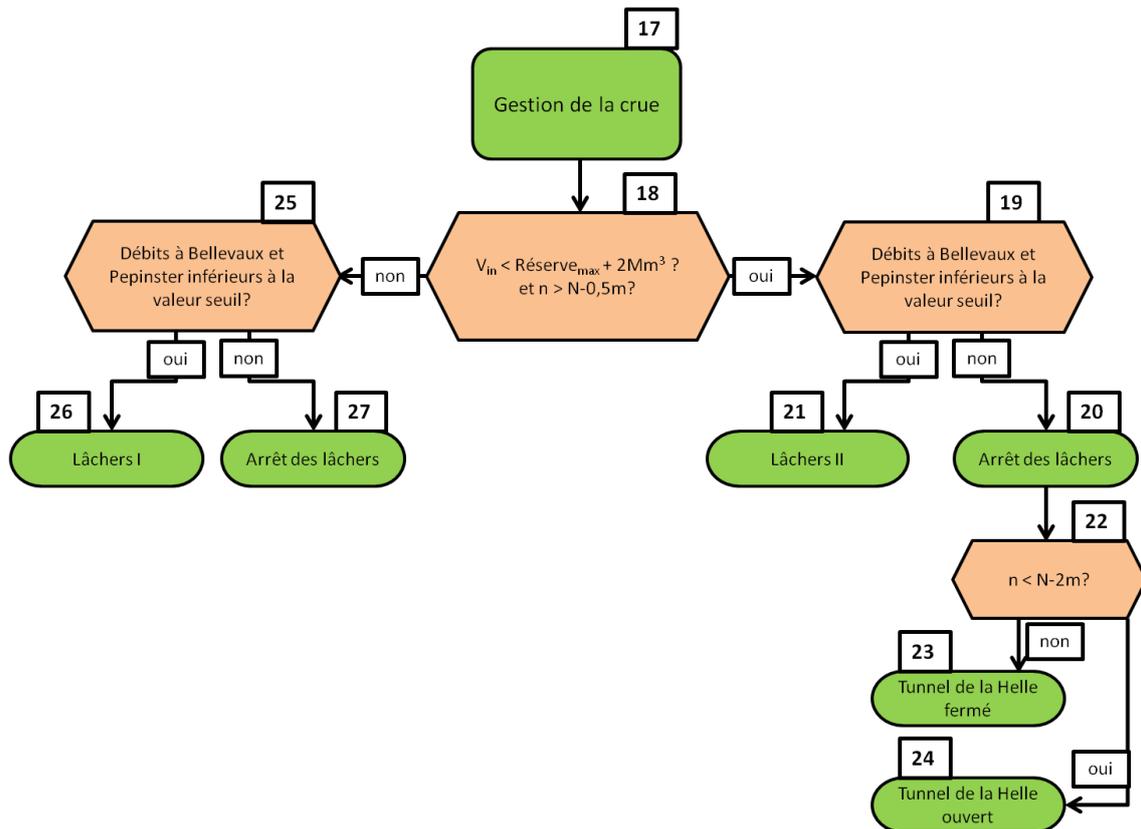


Figure 4-5 : Mode de gestion d'alerte de crue

4.5. Mode de gestion de décrue

Une fois le pic de crue passé à Pepinster et le temps de maintien minimal d'alerte de crue dépassé (condition [15]), les barrages peuvent entrer en mode de gestion de décrue, afin de restaurer leurs capacités de stockage en prévision du prochain événement pluvieux.

Ainsi, tant que le niveau du lac est supérieur à son niveau normal, des lâchers y sont effectués. Le tunnel de la Helle peut être fermé dans le cas où un danger d'inondations existe à la confluence entre la Vesdre et la Helle. Les lâchers dont il est question sont figés dans la simulation alors que la note de manutention permet des lâchers supérieurs lorsque la situation le permet. Ces lâchers sont respectivement égaux à $20 \text{ m}^3/\text{s}$ et $10 \text{ m}^3/\text{s}$ aux barrages d'Eupen et de la Gileppe.

Lorsque le niveau d'eau du réservoir a atteint le niveau normal, un retour en mode de gestion normale est opéré.

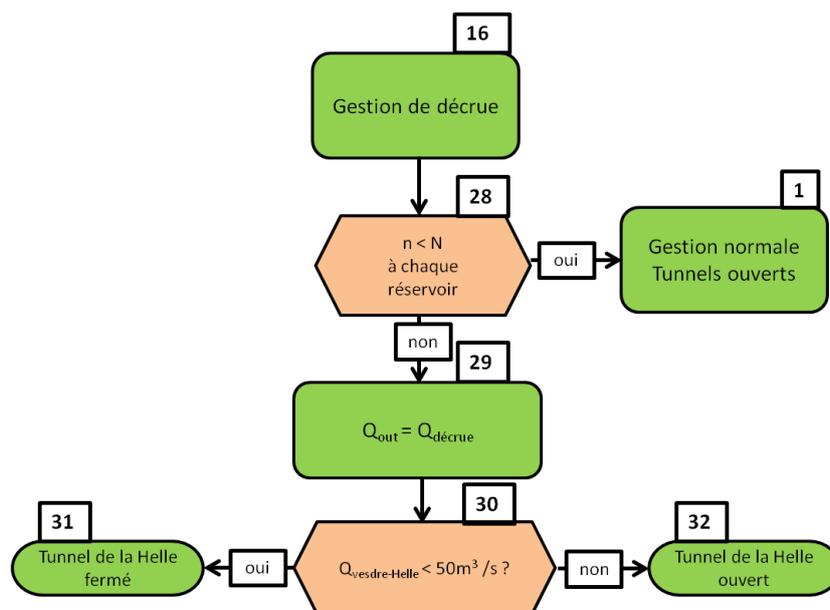


Figure 4-6 : Mode de gestion de décrue

4.6. Organigramme complet de la gestion des barrages de la Vesdre de la VESDRE

L'organigramme complet de la gestion des barrages de la Vesdre, telle qu'elle fut simulée initialement, est présenté à la Figure 4-7.

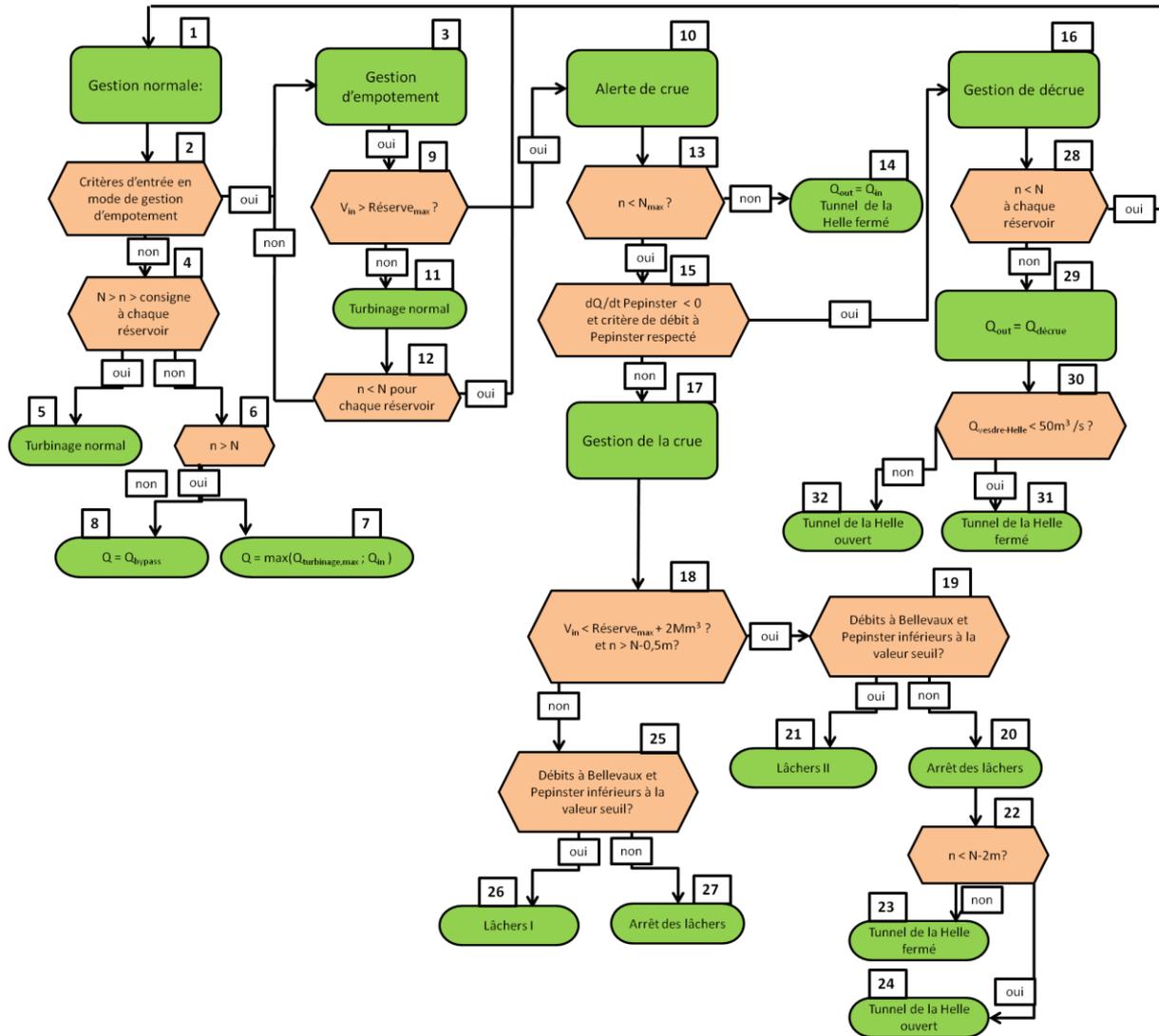


Figure 4-7 : Organigramme complet de la simulation initiale de la gestion des barrages de la Vesdre

5. Modification de la loi de gestion initiale des réservoirs de la Vesdre

La description de la procédure de gestion des barrages de la Vesdre est présentée au chapitre précédent, telle qu'elle fut initialement modélisée dans l'étude de S. Detrembleur, et al., (2012).

Une étude préalable de la loi de gestion initiale a mené à la constatation que certaines modifications de cette loi permettraient d'accroître le réalisme de la modélisation qui en est faite.

Ces modifications sont à présent présentées, après avoir montré les raisons qui ont justifié leurs mises en place. Il est également présenté les améliorations de certains indicateurs de performance faisant suite à ces modifications. Ces divers changements aboutissent à une nouvelle loi de gestion qui sera utilisée, par la suite, comme première référence pour l'analyse de sensibilité des paramètres de gestion des réservoirs.

5.1. Influence des niveaux normaux des réservoirs pour la gestion initiale

Dans la gestion initiale, une première campagne d'analyses de sensibilité, portant sur la durée du turbinage en mode de gestion normale, sur l'amplitude de la consigne, sur un turbinage maximal en mode d'empotement et sur le niveau normal de la retenue, fut réalisée. Cette campagne a abouti à la prise de conscience d'une gestion couplée des réservoirs peu efficace. Afin de ne pas surcharger ce rapport, seuls sont présentés les résultats obtenus dans le cadre de l'étude de l'influence des niveaux normaux des réservoirs, résultats illustrant bien le problème.

Les valeurs étudiées sont données au Tableau 5-1. L'amplitude de la variation sinusoïdale de la consigne est conservée à 3m.

Unité : <i>m</i>	Situation 1 - Référence	Scénario 2	Scénario 3
Niveau normal à Eupen	298	296	—
Niveau normal à La Gileppe	358,5	—	356.5

Tableau 5-1 : Paramètres d'étude de l'influence des niveaux normaux des réservoirs pour la gestion initiale

A la Figure 5-1, à droite, lors d'un abaissement des niveaux normaux des consignes, le graphique pour le barrage de la Gileppe est proche d'une pure translation verticale, au contraire du graphe pour Eupen. Ce comportement s'explique à partir de la loi de gestion qui est couplée pour les deux barrages. Ainsi, le barrage d'Eupen étant alimenté par un bassin versant double, pour une réserve d'empotement légèrement supérieure, l'alerte de crue est enclenchée préférentiellement pour celui-ci. Une fois l'alerte de crue enclenchée à Eupen, elle emmène également le barrage de la Gileppe dans un mode d'alerte de crue. Finalement, les lâchers réalisés au barrage de la Gileppe sont fortement dépendants de l'état de gestion à Eupen et très peu du niveau normal de la consigne du réservoir en question.

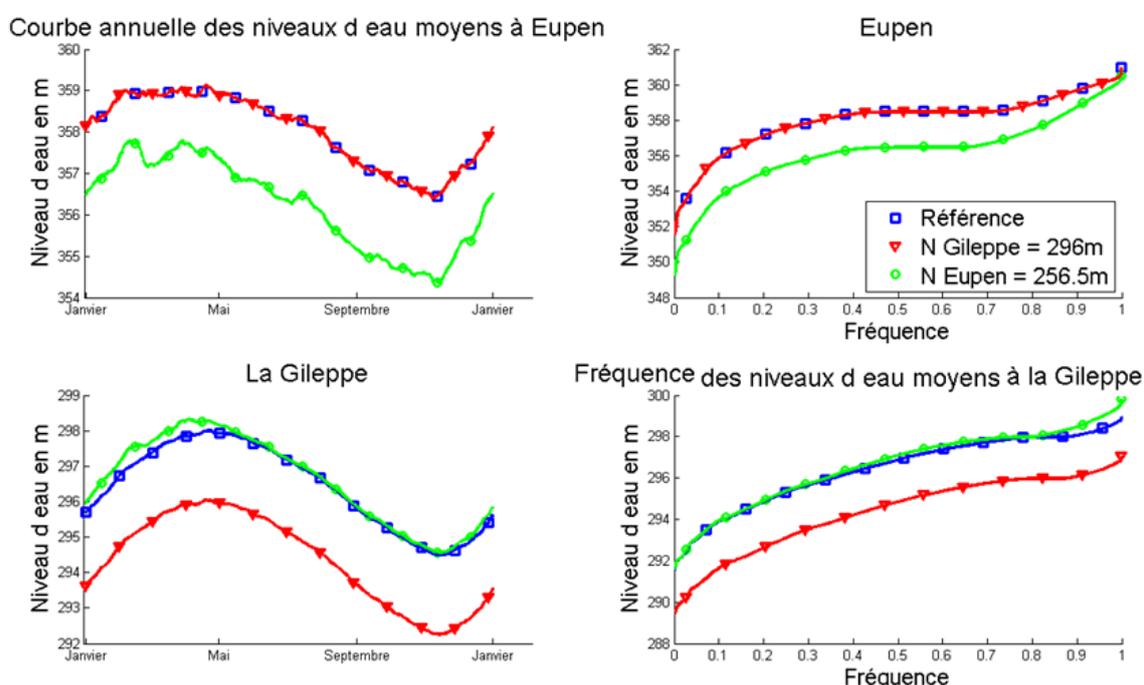


Figure 5-1 : Influence des niveaux normaux des réservoirs pour la gestion initiale – Niveaux des lacs

De plus, des lâchers sont effectués à la Gileppe alors que le niveau du barrage ne le justifie par forcément. Sur la Figure 5-2, sont représentés les débits à la sortie des barrages de la Vesdre, ainsi que les niveaux d'eau des réservoirs et ce, pour la gestion initiale de référence. Il y est bien question de lâchers au réservoir de la Gileppe alors que le niveau du lac est sous le niveau normal (niveau normal en pointillé et le niveau maximal en trait discontinu) ; cette eau est donc en partie perdue pour la production hydroélectrique et peut, de plus, contribuer aux inondations de la Vesdre en aval. L'utilisation de la réserve d'empotement du réservoir de la Gileppe n'est donc pas optimale et il convient d'y remédier.

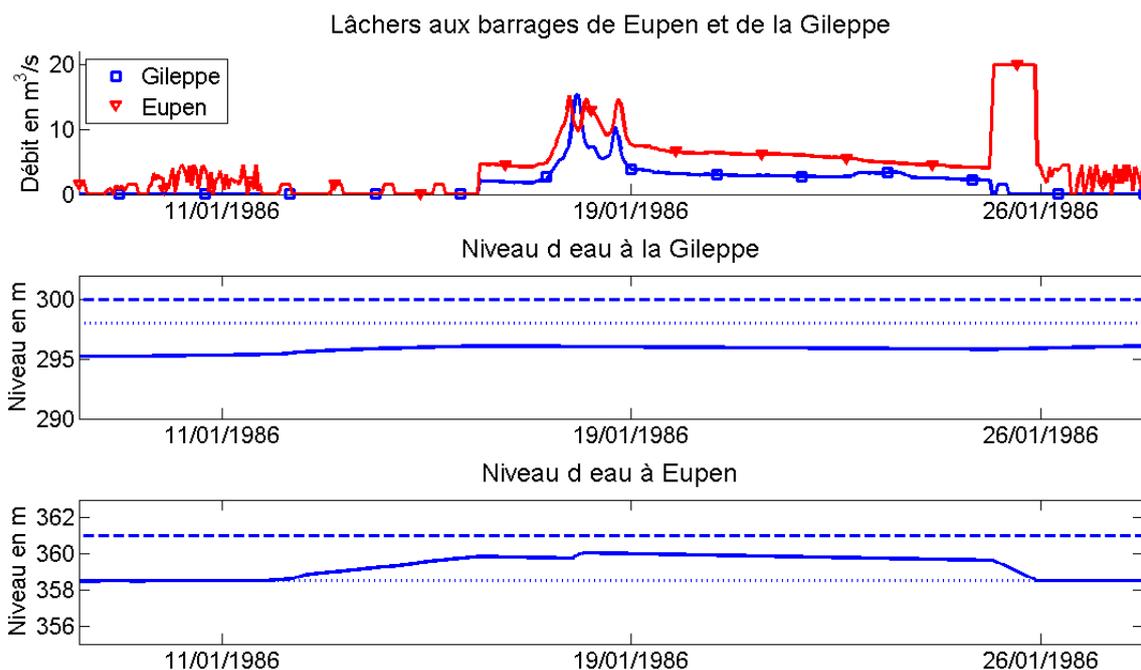


Figure 5-2 : Influence des niveaux normaux des réservoirs pour la gestion initiale – Lâchers en janvier-février 1986

En conclusion de cette première analyse, une modification de la gestion des barrages de la Vesdre est attendue, en considérant une gestion indépendante des ouvrages.

Un rapport faisant état de la gestion des crues de janvier 2011 va dans ce sens puisqu'il y fait mention d'une gestion différenciée des deux réservoirs.

5.2. Influence des hauteurs pluviométriques d'avertissement

En second lieu, l'influence du test sur les hauteurs pluviométriques d'avertissement (noté [2] dans la description de la gestion des réservoirs à la Figure 4-7) est étudiée en considérant trois scénarios. Le premier scénario consiste à réduire légèrement les hauteurs critiques de pluies de 5mm. Le second revient à descendre très fortement les hauteurs pluviométriques critiques, afin que le passage en mode de gestion d'empotement ait lieu à la moindre pluie. Enfin, le troisième scénario est lié à une augmentation importante des hauteurs pluviométriques, de manière à ce qu'elles n'amènent jamais au passage en mode d'empotement.

	Situation 1	Scénario 4	Scénario 5	Scénario 6
Hauteurs pluviométriques	Référence	Diminution de 5mm	Diminution importante	Augmentation importante

Tableau 5-2 : Paramètres d'étude de l'influence des hauteurs pluviométriques d'avertissement

Comme présenté dans la suite de ce chapitre, cette première analyse montre une gestion peu efficace des ouvrages, induite par le test sur les hauteurs pluviométriques. En effet, si un passage en mode d'empotement, déclenché par celui-ci, ne conduit pas à une alerte de crue, un turbinage normal est réalisé quel que soit la cote du lac.

D'abord, la Figure 5-3 montre un abaissement conséquent des hauts niveaux d'eau des réservoirs pour le scénario 6, qui fait suite à une utilisation plus fréquente de l'élément [7] de la gestion normale. Au contraire, ces niveaux sont les plus importants dans le scénario 5 pour lequel l'élément [7] n'est que très peu utilisé. Pour rappel, l'élément [7] permet de réaliser des lâchers conséquents en mode de gestion normale lorsque le niveau d'un lac est supérieur au niveau normal de sa consigne.

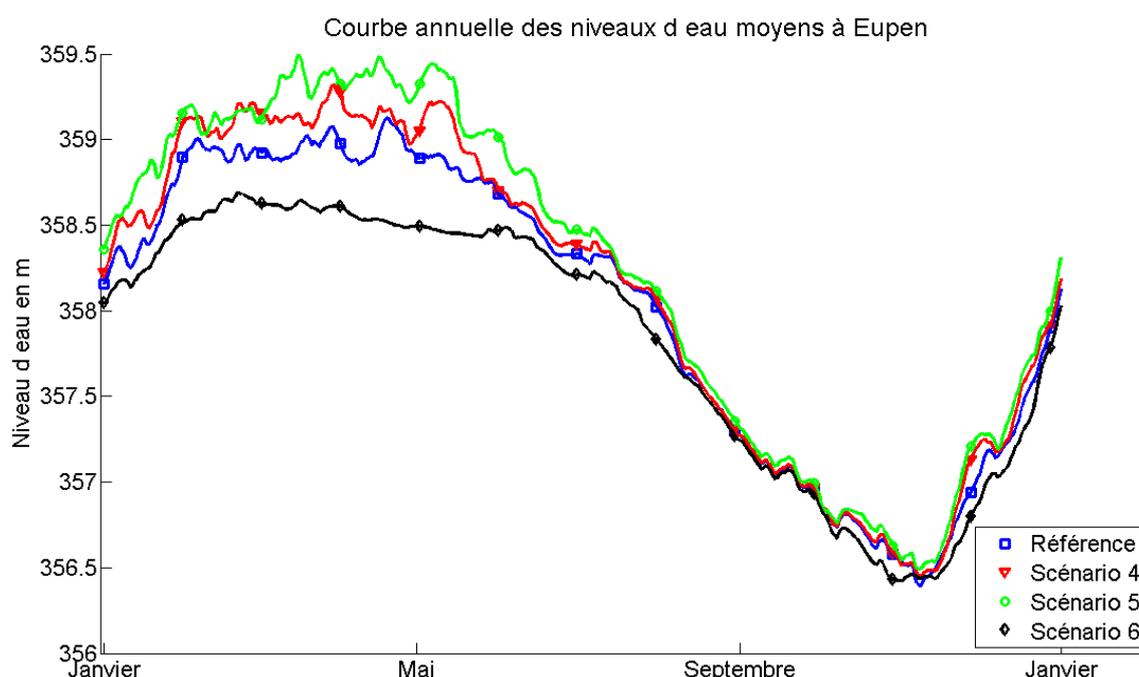


Figure 5-3 : Influence des hauteurs pluviométriques d'avertissement- Niveaux d'eau au barrage d'Eupen

Ensuite, en observant le Tableau 5-3, représentant le dommage moyen annuel total dû aux inondations dans la vallée de la Vesdre, l'intérêt du déclenchement de l'alerte de crue est mis en avant. D'abord, le risque total augmente lorsque les hauteurs pluviométriques sont fortement abaissées (Scénario 5) suite à un faible recours à des lâchers conséquent en mode de gestion normale [7] ; ce qui a pour conséquence une augmentation des niveaux des lacs.

Ensuite, lorsque les critères sont faiblement diminués (Scénario 4), le risque baisse malgré ce qui vient d’être expliqué. En fait, le gain réalisé suite à un appel plus fréquent au test déclencheur de l’alerte de crue [9] est dans ce cas supérieur à la perte encourue par l’utilisation plus restreinte du mode de gestion normale [7].

Scénario 4	Scénario 5
97,14%	101,40%

Tableau 5-3 : Influence des hauteurs pluviométriques d’avertissement – Pourcentage de risque total d’inondations par rapport à la situation 1

Le scénario dans lequel les critères de hauteurs pluviométriques ne sont jamais remplis (Scénario 6), permet un gain important de production hydroélectrique, suite à une diminution des lâchers non turbinés, conséquence de l’abaissement des niveaux moyens des lacs.

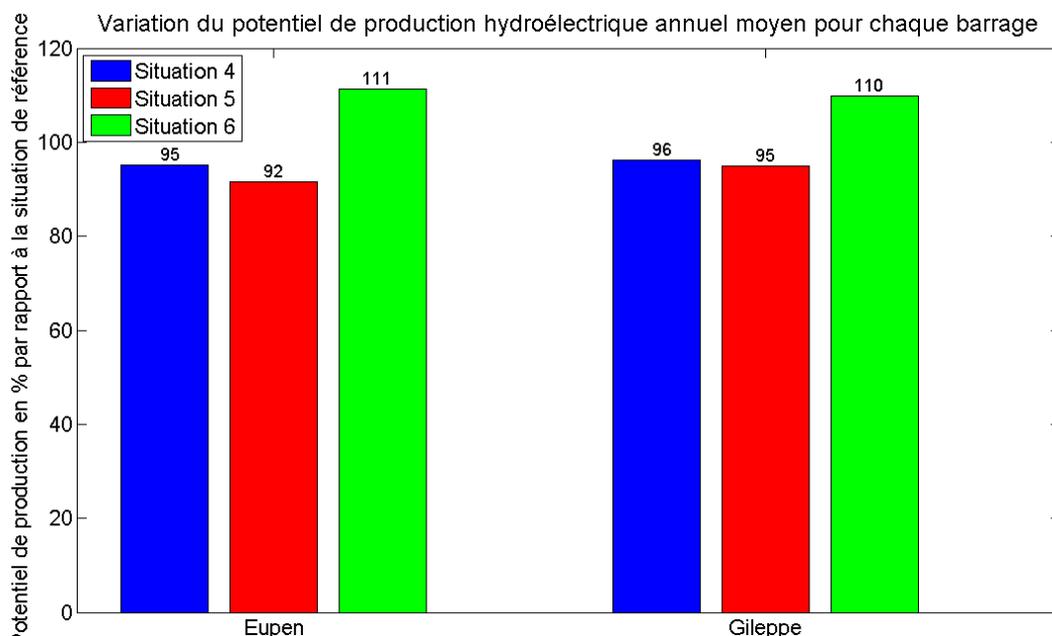


Figure 5-4 : Influence des hauteurs pluviométriques d’avertissement – Potentiel de production hydroélectrique par rapport à la situation 1

Deux éléments peuvent être retirés de l’analyse qui vient d’être effectuée. Le premier est que le critère sur les hauteurs pluviométriques a pour effet d’augmenter le nombre de lâchers non turbinés et de maintenir le niveau du lac d’Eupen assez élevé par une faible utilisation du mode de gestion normale. Le second élément est l’intérêt qu’il y a à réaliser le test [11] permettant le passage en mode d’alerte de crue.

5.3. Influence d'une première modification dans le mode de gestion normale

Les observations du chapitre précédent ont mené à une modification de la loi de gestion des réservoirs, représentée à la Figure 5-5. Dans cette nouvelle loi de gestion, sont réalisés un remplacement du test portant sur les hauteurs pluviométriques d'avertissement (remplacement de [2] par [9]) et une imposition de lâchers nuls lorsque les critères de débits à l'aval sont dépassés (remplacement de [2] par [3]). La gestion d'empotement n'est alors plus présentée de manière claire dans l'arborescence, mais son principe reste d'application dans le mode de gestion normale.

Le scénario étudié dans ce chapitre porte le numéro 7.

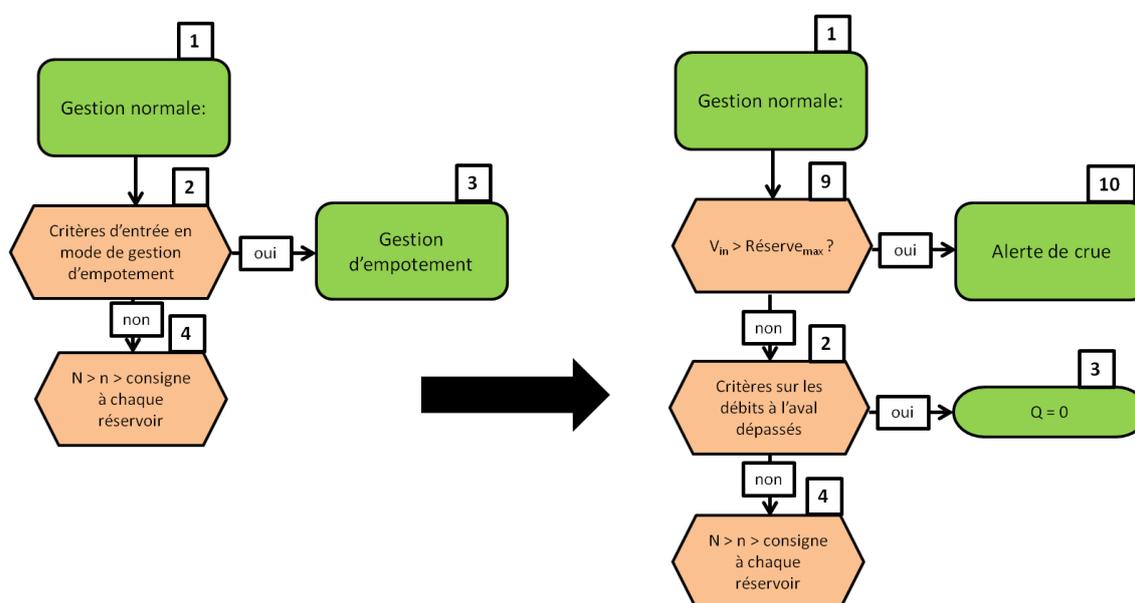


Figure 5-5 : Modification de la loi de gestion

Les effets sur les faibles niveaux des lacs et sur les faibles débits sont négligeables alors que les niveaux importants du lac d'Eupen sont rabattus.

Au contraire, la modification effectuée permet de réduire le dommage total dû aux inondations dans la vallée de la Vesdre par une opération préventive en mode de gestion normale [7], permettant de maintenir le niveau du lac suffisamment bas en période de crue (Figure 5-6).

Modification de la loi de gestion initiale des réservoirs de la Vesdre

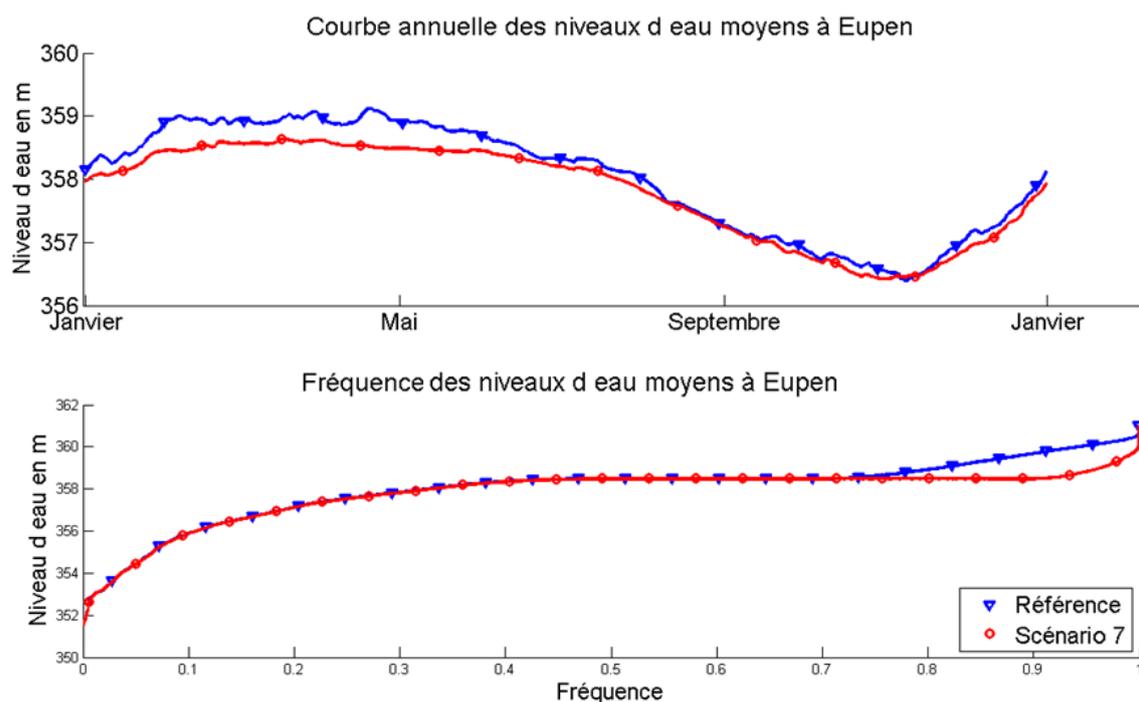


Figure 5-6 : Première modification dans le mode de gestion normale – Niveaux d'eau au barrage d'Eupen

Une autre conséquence de la réduction des hauts niveaux des lacs est la diminution des lâchers non turbinés et donc l'augmentation du potentiel de production hydroélectrique (augmentation de près de 12%).

Pour conclure cette analyse sur la modification de la gestion, il en ressort un bénéfice tant sur la gestion des crues que sur le potentiel de production hydroélectrique, alors que les faibles niveaux d'eau des réservoirs et les faibles débits n'en sont pas impactés. Il s'agit ainsi d'une mesure sans regret qui est implémentée dans la suite du travail.

On peut penser que la modification réalisée s'écarte de la note de manutention puisque les hauteurs pluviométriques n'apparaissent plus clairement. En fait, ce n'est pas le cas puisque, en pratique, les hauteurs pluviométriques permettent de déterminer le volume entrant au barrage et se retrouvent donc à l'élément [9].

5.4. Influence d'autres modifications dans les modes de gestion d'alerte et de gestion normale

L'analyse de sensibilité effectuée au chapitre 5.1 a mis en évidence une gestion couplée des réservoirs peu efficace et non conforme à la gestion réelle.

Une nouvelle modification de la gestion des ouvrages est réalisée et étudiée dans ce chapitre en considérant une gestion indépendante des deux barrages de la Vesdre. Il s'agit du scénario 8 dans lequel la modification étudiée au chapitre précédent (chapitre 5.4) est retenue.

En plus de cette séparation des gestions des deux réservoirs, une modification consistant à limiter les lâchers effectués en mode normal, à l'élément [7], à la capacité maximale de turbinage, est réalisée pour chaque barrage. Ainsi, cette modification est appliquée au réservoir d'Eupen dans le scénario 9 et à celui de la Gileppe dans le scénario 10.

Les modifications sont comparées au scénario 7 du chapitre précédent.

Les impacts des changements réalisés sur les faibles débits et sur les faibles niveaux d'eau dans les réservoirs sont à nouveau négligeables.

En termes de gestion d'inondations, le passage à une gestion indépendante des ouvrages a de grandes conséquences sur le risque total dans la vallée de la Vesdre. Les modifications réalisées aux scénarios 9 et 10 ont des effets moins marqués, bien que non négligeables.

Scénario 8	Scénario 9	Scénario 10
91%	86%	90%

Tableau 5-4 : Influences de modifications dans les modes d'alerte et de gestion normale – Pourcentage du risque total d'inondations par rapport au scénario 7

Sur le potentiel de production hydroélectrique, une légère augmentation est observée au barrage de la Gileppe suite à la réduction des lâchers effectués (Figure 9-3 en Annexe).

5.5. Conclusion concernant les modifications de la loi de gestion initiale

Le chapitre 5 a permis de mettre en évidence diverses modifications permettant une simulation plus réaliste de la gestion des réservoirs. Ces modifications influent uniquement sur les inondations à l'aval et sur la production hydroélectrique.

Ensuite, il est montré que les changements opérés étaient des changements sans regret, puisqu'ils améliorent certains indicateurs de performances de la gestion sans en détériorer d'autres.

Ces modifications de la loi de gestion étaient nécessaires afin de réaliser l'étude de sensibilité dans les bonnes conditions. En effet, les critères pluviométriques aboutissaient à la réalisation de lâchers normaux ($1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant 6 heures) quels que soient les niveaux d'eau des réservoirs. De plus, la gestion simultanée des ouvrages de rétention d'eau conduisait à des lâchers au barrage de la Gileppe alors que le niveau du lac était bien inférieur au niveau normal. Enfin, l'élément [7], avant la modification réalisée, induisait des lâchers vers l'aval pouvant être importants, sans utiliser la possibilité d'écrêtage de crue offerte par le barrage.

Cette nouvelle loi de gestion fut validée par rapport à la précédente suite à une rencontre avec C. Grifnée (avril 2013), gestionnaire des barrages de la Vesdre, au cours de laquelle il en est ressorti que les modifications réalisées permettaient une meilleure représentation de la gestion réelle des ouvrages de rétention d'eau. De plus, en comparant l'analyse de sensibilité réalisée au chapitre 6 avec les études de S. Detrembleur, et al., (2012), réalisées à l'aide de l'ancien modèle de gestion, la nouvelle gestion montre une efficacité plus grande à tout point vue.

5.6. Comparaison entre la nouvelle simulation, la simulation initiale et les mesures disponibles

Sur la Figure 5-7, pour les faibles niveaux d'eau des retenues, le modèle tend à fortement surévaluer les valeurs mesurées (les tendances aux deux barrages sont semblables). Ceci est certainement la conséquence de plusieurs imprécisions. D'abord, certains choix concernant la gestion ont dû être effectués sans disposer d'informations officielles. Ensuite, les apports hydrologiques modélisés sont généralement supérieurs aux mesures d'été et inférieurs à celles d'hiver, pour des bilans annuels semblables. De plus, le gestionnaire du barrage peut

intentionnellement s'écarter de la loi de gestion lorsqu'il le juge nécessaire³. Enfin, il faut savoir que la loi de gestion a évolué au cours du temps alors que la modélisation considère la même loi de 1971 à 2005. Toutes ces raisons tendent à expliquer les différences entre les résultats du modèle et les mesures. La Figure 5-7 montre que les changements opérés sur les niveaux d'eau des retenues par la nouvelle simulation sont peu importants vis-à-vis de la simulation initiale. En tout cas, ils ne permettent pas une meilleure représentation des mesures réalisées au cours des trente dernières années.

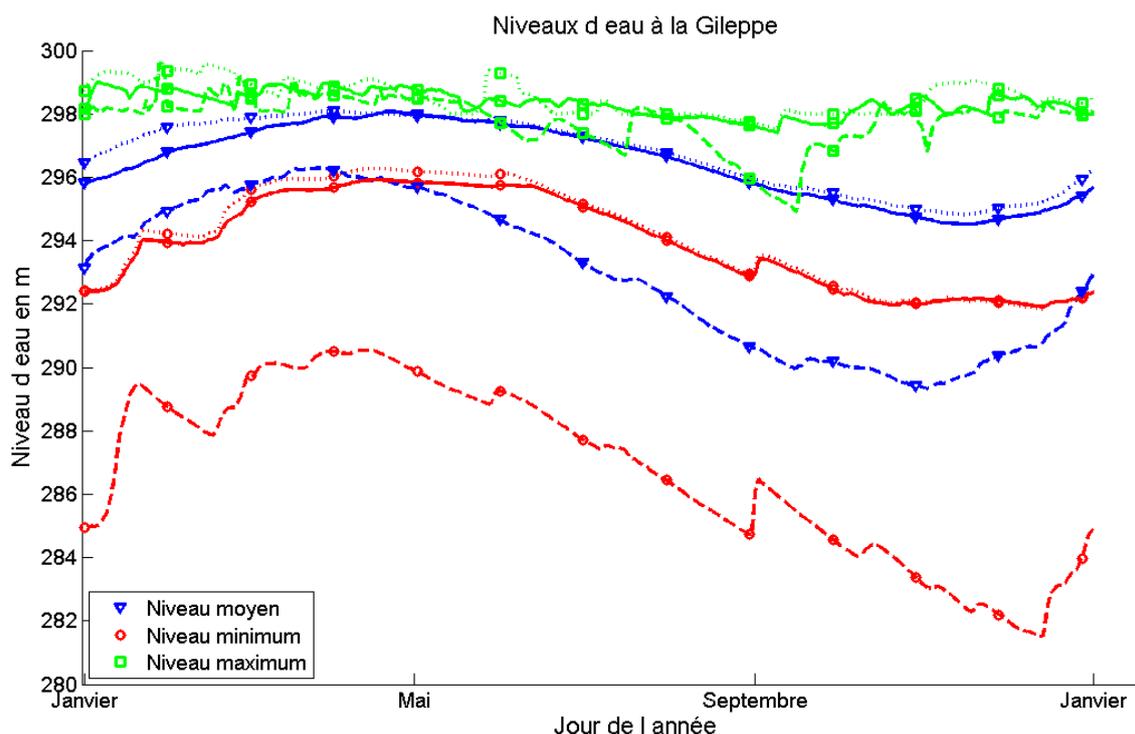


Figure 5-7 : Niveaux d'eau au barrage de la Gileppe à partir de valeurs entre 1982 à 2004 (les traits discontinus représentent les mesures, les traits pleins représentent les résultats de l'ancienne simulation et les pointillés représentent les résultats de la nouvelle simulation)

Puisque dépendant d'éléments extérieurs à ce travail, les écarts entre les niveaux des lacs simulés et mesurés n'ont pas pu être corrigés. Le modèle hydrologique utilisé est en effet le meilleur modèle, pour la Vesdre, actuellement disponible. Il conviendra donc de garder en mémoire la surestimation des niveaux d'eau des réservoirs estimés par la simulation.

La comparaison entre les débits caractéristiques à Chaudfontaine, pour diverses périodes de retour, est fournie au Tableau 5-5. Concernant les débits caractéristiques calculés à Chaudfontaine avec la nouvelle simulation, ces valeurs sont inférieures aux débits caractéristiques calculés à la fois à partir des mesures et à partir de la simulation initiale. La

³ A titre illustratif, les tunnels de la Helle et de la Soor étaient fermés le 26 avril 2013, en dehors d'une période de crue ou de décrue, privant ainsi les réservoirs d'un apport en eau possible.

nouvelle simulation semble ainsi s'écartier des mesures et donc, semble moins représenter la gestion réelle des ouvrages que la simulation initiale. Il pourrait en être ainsi si les apports simulés en période de crue étaient proches des apports mesurés. Or, comme présenté précédemment au chapitre 3.2, ces apports simulés, pour des débits de crue, sont généralement un peu inférieurs aux mesures réalisées. Il paraît donc compréhensible d'obtenir une simulation de référence pour laquelle les hauts débits sont inférieurs aux mesures. Il faut également remarquer que les différences obtenues ne sont que de l'ordre de quelques pourcents (de 3% à 7%) et la reproduction des épisodes de crue peut donc être jugée satisfaisante.

Période de retour	Mesures	Simulation initiale	Nouvelle simulation
Années	m^3/s	m^3/s	m^3/s
25	226	224	210
50	241	245	229
100	255	263	247

Tableau 5-5 : Comparaison des débits caractéristiques mesurés et simulés à Chaudfontaine

Dans sa thèse, S. Wildemeersch (2012) présente le critère de performance de Nash-Sutcliffe (NSE), repris à la formule (5-1), comme le critère le plus largement utilisé pour juger de l'efficacité de simulations donnant en sortie des débits. Au plus ce critère est éloigné de l'unité et au moins le modèle permet de reproduire les débits observés. Pour les hauteurs d'eau, le critère des moindres carrés (RMS), présenté à la formule (5-2), est utilisé. Une valeur nulle de ce second critère indique une correspondance parfaite entre le modèle et les observations.

$$NSE_q = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{nt} (q_t^{sim} - q_t^{obs})^2}{\sum_{t=1}^{nt} (q_t^{obs} - \mu^{obs})^2} \in] - \infty; 1] \quad (5-1)$$

$$RMS_h = \left(\frac{\sum_{t=1}^{nt} (h_t^{sim} - h_t^{obs})^2}{nt} \right)^{1/2} \in [0; +\infty[\quad (5-2)$$

Avec nt le nombre total de pas de temps t , q_t^{sim} le débit simulé au temps t , q_t^{obs} le débit mesuré au temps t , μ^{obs} la moyenne des débits mesurés, h_t^{sim} la hauteur simulée au temps t et h_t^{obs} la hauteur mesurée au temps t .

Modification de la loi de gestion initiale des réservoirs de la Vesdre

En appliquant ces critères aux débits à Chaudfontaine, entre 1974 et 2004, et aux niveaux d'eau des retenues, entre 1982 et 2004, les valeurs du Tableau 5-6 sont obtenues pour les ancienne et nouvelle simulations. Comme montrée précédemment, l'utilisation de la nouvelle simulation n'améliore pas la représentation des niveaux d'eau des réservoirs, qui reste faible. Par contre, la nouvelle simulation accroît le NSE calculé à Chaudfontaine. Cette valeur du critère de performance de Nash-Sutcliffe est d'ailleurs assez proche de l'unité.

	$NSE_q^{Chaudfontaine}$	RMS_h^{Eupen}	$RMS_h^{Gileppe}$
Ancienne simulation	0,78	2,80	3,96
Nouvelle simulation	0,81	2,80	3,96

Tableau 5-6 : Critères de performance appliqués aux débits à Chaudfontaine et aux niveaux d'eau des retenues d'Eupen et de la Gileppe

6. Analyse de sensibilité des paramètres de la loi de gestion

Les influences des paramètres de la nouvelle gestion de référence (Figure 6-1) sur les indicateurs de performance sont étudiées pour la période allant de 1974 à 2004. Une fois ces influences connues, la matrice de sensibilité est créée en accord avec le chapitre 2.4.

Suite à une amélioration réalisée à posteriori pour accroître le réalisme de la modélisation de la gestion de crue, l'analyse de sensibilité des seize paramètres de gestion est effectuée en distinguant les paramètres du mode de gestion de crue des autres paramètres.

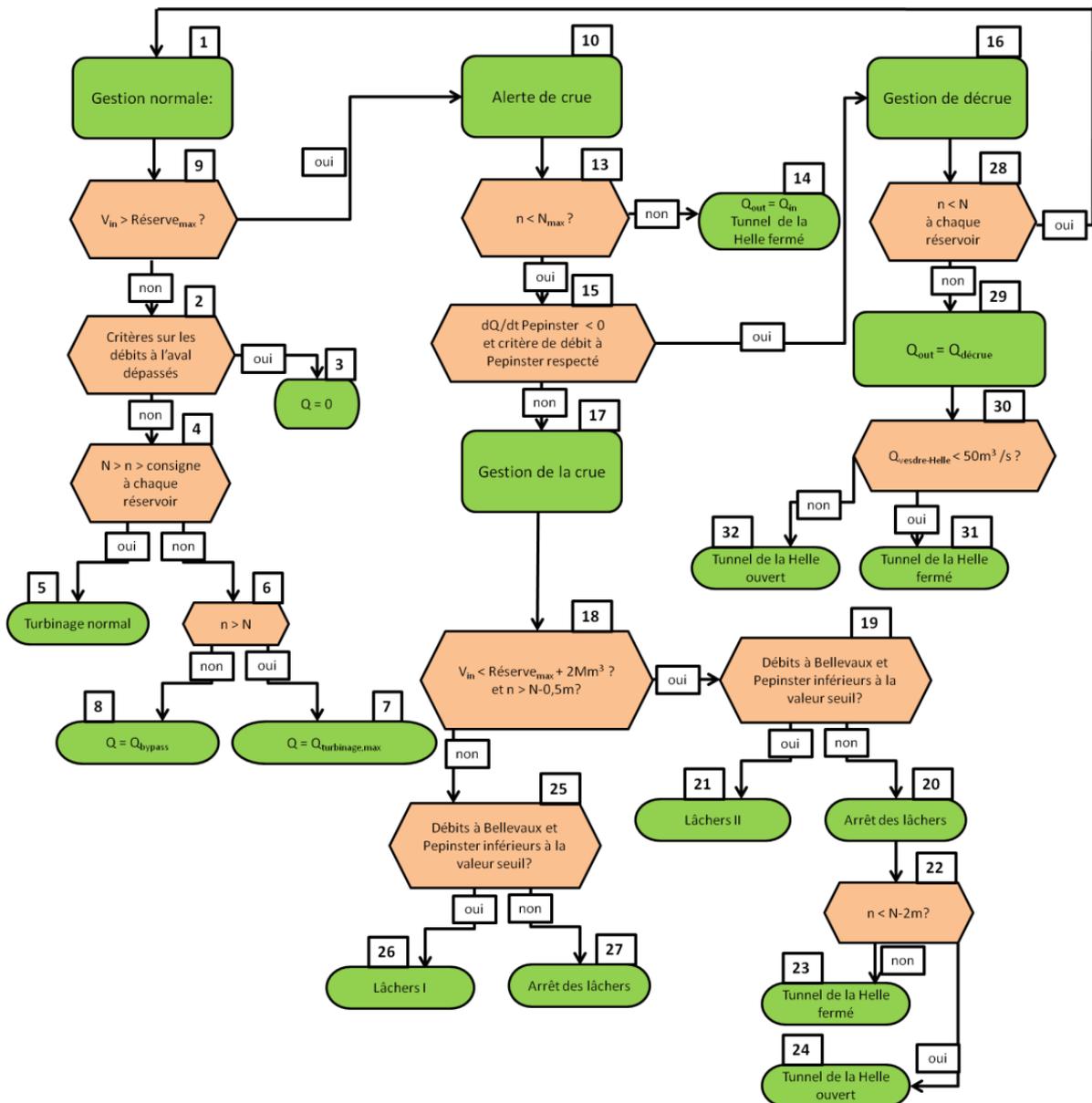


Figure 6-1 : Nouvelle loi de gestion de référence pour l'analyse de sensibilité des paramètres

6.1. Analyse de sensibilité des paramètres extrinsèques au mode de gestion de crue

Les paramètres utilisés en dehors du mode de gestion de crue sont d'abord étudiés par comparaison avec une première situation de référence, celle développée au chapitre 5.6.

6.1.1. Caractérisation de la première situation de référence

Pour la première situation de référence, dont la loi de gestion est présentée à la Figure 6-1, les valeurs des indicateurs de performance sont reprises au Tableau 6-1. Pour bien faire, l'indicateur y_1 (dommage moyen annuel dû aux crues) doit être le plus faible possible, alors que les indicateurs y_2 (faible niveau du lac d'Eupen), y_3 (faible niveau du lac de la Gileppe), y_4 (potentiel de production hydroélectrique total) et y_5 (débit caractéristique d'étiage à Verviers) doivent être les plus élevés possibles.

En comparant la valeur du DCE à Verviers, fournie par la simulation, avec les débits de by-pass des réservoirs, ces derniers ne représentent que 5% du premier. Il s'agit d'une conséquence de la surévaluation des faibles débits d'apport par le modèle Mohican.

y_1	y_2	y_3	y_4	y_5
€/an	m	m	kWh/an	m ³ /s
4.400.000	351,5	291,5	8.600.000	1,65

Tableau 6-1 : Indicateurs de performances dans la première situation de référence

Le Tableau 6-2 montre la répartition des dommages aux trois points de référence représentant une zone de la vallée de la Vesdre. La majorité de ces dommages est ainsi attribuable à la zone de Chaudfontaine (89%), dépendant du débit non contrôlé de la Hoëgne, alors que les dégâts pour la zone de Béthane sont minimales (<1%), suite à un contrôle important du débit par les barrages situés un peu en amont. En comparant ces valeurs avec celles obtenues par S. Detrembleur, et al., (2012) avec le modèle initial de gestion, l'amélioration effectuée est importante, puisque le dommage moyen annuel total dû aux crues est réduit de près de 17%.

Béthane	Verviers	Chaufontaine	Total
<i>€/an</i>	<i>€/an</i>	<i>€/an</i>	<i>€/an</i>
10.000	480.000	3.930.000	4.420.000

Tableau 6-2 : Première situation de référence – Distribution des dommages moyens annuels consécutifs à une crue

Au Tableau 6-3, le potentiel de production hydroélectrique est plus de deux fois supérieur au réservoir d'Eupen par rapport à celui de la Gileppe, puisque l'étendue du bassin versant y est double et que la capacité des turbines y est plus de deux fois plus importante. La SWDE renseigne une production hydroélectrique à Eupen de 5 millions de kWh par an (SWDE, 2013). Ainsi, en prenant un rendement hypothétique mais vraisemblable de 88% (Hendrick, et al., 2011), la production simulée par le modèle est légèrement supérieure (7%) à la production renseignée par la SWDE.

Eupen	Gileppe	Total
<i>kWh/an</i>	<i>kWh/an</i>	<i>kWh/an</i>
6.090.000	2.510.000	8.600.000

Tableau 6-3 : Première situation de référence – Distribution du potentiel de production hydroélectrique entre les deux barrages

Afin de pouvoir apprécier, à leurs justes valeurs, les variations des dommages moyens annuels dus aux inondations et du potentiel de production hydroélectrique, des valeurs extrêmes de ces indicateurs sont à présent évaluées.

Pour déterminer les réductions maximales des dommages moyens annuels dus aux crues par une amélioration de la loi de gestion des réservoirs, une simulation est lancée dans laquelle les barrages ne relâchent aucune eau à l'aval. Cela revient à considérer des réservoirs de capacités infinies, permettant d'étudier l'effet des bassins versants non régulés sur les dommages dus aux crues dans la vallée de la Vesdre. Ce faisant, les dommages obtenus sont présentés au Tableau 6-4 et une réduction maximale de 17% du dommage moyen annuel total est constatée, alors que la réduction maximale pour la zone de Verviers avoisine les 40%.

Ensuite, afin d'évaluer l'efficacité de la loi de gestion actuelle sur les inondations à l'aval, une nouvelle simulation est lancée. Dans celle-ci, un effacement artificiel des barrages est modélisé, en imposant une égalité entre les débits entrant aux réservoirs et les débits y sortant. Les résultats, fournis au Tableau 6-4, mettent en évidence une bonne gestion actuelle des réservoirs. En effet, sur une échelle allant de 0% à 100% d'efficacité, où 0% correspondant à une

Analyse de sensibilité des paramètres de la loi de gestion

situation sans barrages et 100% à une situation irréaliste de barrages de capacités infinies, la gestion actuelle des dommages totaux obtient une efficacité de 92%. De plus, l'efficacité de la loi de gestion est plus importante pour la zone de Béthane (99% d'efficacité) que pour celle de Verviers (94% d'efficacité) ou celle de Chaudfontaine (89% d'efficacité). Ainsi, la marge d'amélioration de la loi de gestion actuelle est faible.

Enfin, en comparant la situation extrême, considérant des barrages de capacités infinies, et la situation sans barrages, les réductions maximales des risques d'inondations, pour les zones de Béthane, Verviers et Chaudfontaine, valent respectivement 100%, 91% et 60%, avec une réduction maximale du risque total d'inondation égale à 73%. Les contributions de la Hoëgne, principalement, et de la Vesdre entre Béthane et Pepinster, dans une moindre mesure, limitent donc considérablement le potentiel de réduction des dommages, pour la zone de Chaudfontaine, par une gestion adéquate des réservoirs.

Damage en €/an	Béthane	Verviers	Chaudfontaine	Total
Première situation de référence	10.000	480.000	3.930.000	4.420.000
Situation extrême	0	290.000	3.380.000	3.670.000
Situation sans barrages	1.640.000	3.370.000	8.400.000	13.420.000

Tableau 6-4 : Réduction maximale des dommages moyens annuels dus aux crues dans la première situation de référence et dommages moyens annuels dus aux crues en l'absence de barrages

Afin de déterminer une valeur extrême du potentiel de production hydroélectrique, il est supposé que toute l'eau quittant les réservoirs vers la Vesdre est turbinée avec une chute maximale (le niveau du lac est égal au niveau maximal de sécurité). Cette situation correspondrait à une centrale hydroélectrique, de capacité infinie, installée au fil de l'eau et ne jouant aucun rôle de régulation des débits. Le Tableau 6-5 compare ces valeurs extrêmes obtenues avec la première situation de référence. Bien entendu, les valeurs extrêmes calculées ne sont pas atteignables en pratique mais fournissent un ordre de grandeur de l'amélioration pouvant être réalisée dans l'analyse de sensibilité qui suit.

Production en kWh/an	Eupen	Gileppe	Total
Première situation de référence	6.090.000	2.510.000	8.600.000
Situation extrême	14.170.000	6.480.000	20.650.000

Tableau 6-5 : Potentiel de production hydroélectrique moyen annuel extrême

6.1.2. Influence de la durée du turbinage normal

Pour commencer, l'influence de la durée du turbinage normal, noté [5] à la Figure 6-1, sur les indicateurs de performance est étudiée. Il s'agit du turbinage réalisé en mode de gestion normale lorsque le niveau du lac est compris entre le niveau normal de celui-ci et la consigne. Les différentes durées servant à l'analyse de sensibilité sont fournies au Tableau 6-6.

Unité : h/jour	Situation I - Référence I	Scénario II
Durée du turbinage	6	15

Tableau 6-6 : Paramètres d'étude de l'influence de la durée du turbinage normal

La Figure 6-2 illustre bien l'effet du paramètre [5] de durée du turbinage normal sur la gestion des réservoirs ; à savoir des niveaux d'eau aux barrages se rapprochant de la consigne tout au long de l'année. Les hauts niveaux des lacs sont moins impactés par ce paramètre que les bas niveaux rencontrés en période sèche.

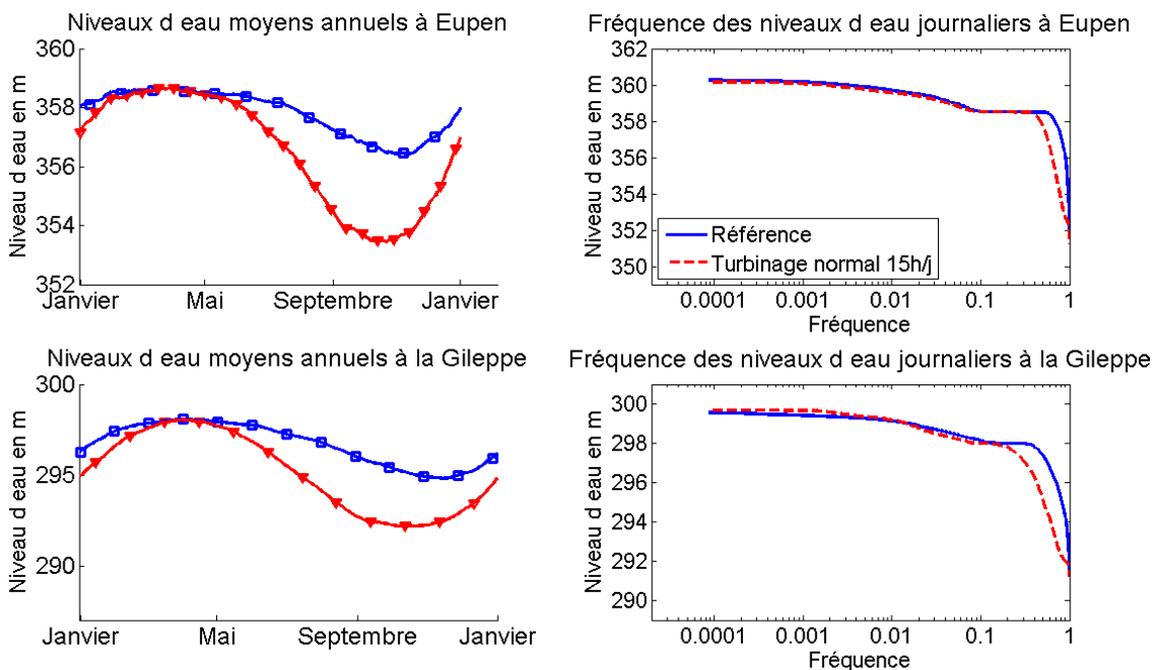


Figure 6-2 : Influence de la durée du turbinage - Niveaux d'eau des réservoirs

Les intensités des faibles débits de la Vesdre sont, pour leurs parts, diminués dans le cas d'une augmentation de la durée du turbinage normal, qui empêche une distribution homogène du turbinage durant la saison sèche (Figure 9-4 en Annexe). La consigne est, en effet, plus rapidement atteinte lorsque la durée du turbinage normal vient à augmenter. De plus, quand la durée du turbinage normal s'intensifie, le nombre de faibles débits dans la Vesdre croît (Figure 9-5 en Annexe).

Du point de vue des débits élevés occasionnant des inondations, le dommage moyen annuel décroît avec une augmentation de la durée de turbinage, suite à un accroissement de la réserve d'empotement. Les réductions des dommages aux zones de Béthane, Verviers et Chaudfontaine valent respectivement 83%, 10% et 3%, pour une diminution totale de 4%. De plus, les débits centennaux à Béthane diminuent à $52,5 \text{ m}^3/\text{s}$ (-13%) alors que ceux à Chaudfontaine ne changent pratiquement pas (<0,1%). Par après, les courbes de dommages dus aux inondations sont fournies à la Figure 6-3, pour la zone de Béthane, les variations pour les autres zones n'étant pas visibles graphiquement. Sur ces courbes, toutes les récurrences des débits sont réduites, diminuant ainsi le risque (égal à l'intégrale de la courbe de dommages). Ces tendances seront rencontrées sur les courbes de risques d'inondations des autres zones et des autres paramètres influençant les débits de crues.

Courbe de risques relative à la zone représentée par Bethane

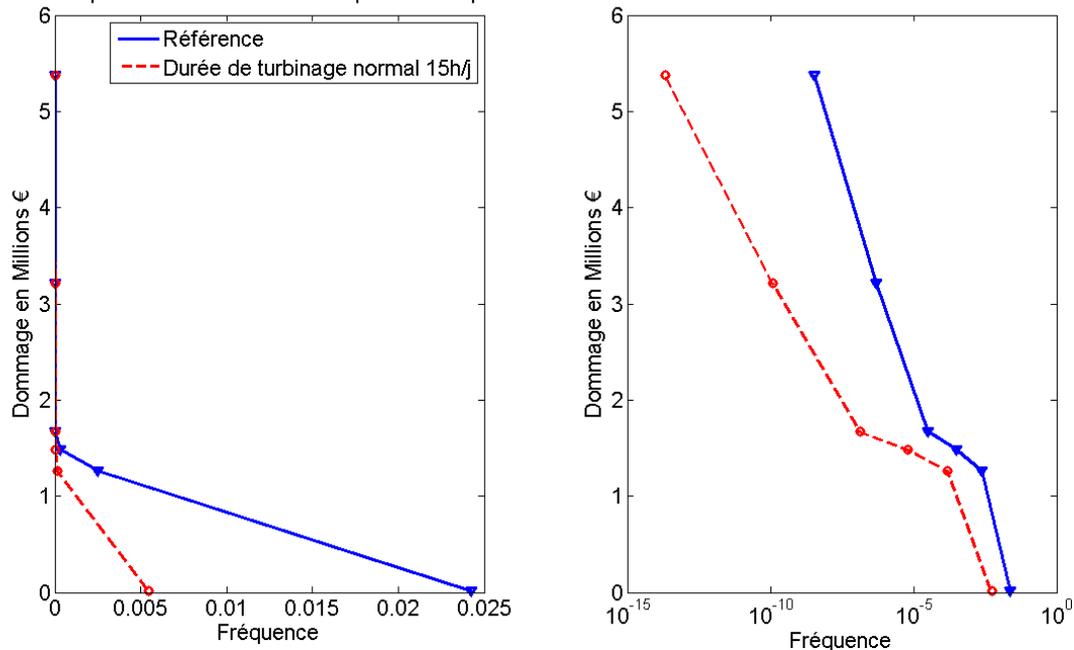


Figure 6-3 : Influence de la durée du turbinage – Courbes de risques pour la zone de Béthane

Ensuite, le potentiel de production hydroélectrique varie faiblement (1%). En effet, la légère diminution des lâchers non turbinés, lorsque la durée du turbinage normal est accrue, est compensée par une réduction de la chute. Par contre, le nombre de jours agréant une production hydroélectrique, au moins égale à celle du turbinage normal, diminue de 246 à 287 jours (-17%) au réservoir d'Eupen et de 314 à 221 jours (-30%) à celui de la Gileppe.

Les éléments permettant la construction de la première colonne de la matrice de sensibilité sont repris au Tableau 6-7. Le paramètre b représente la différence de durée du turbinage

normal entre la situation I et le scénario II. Les variations sont celles correspondant à l'augmentation du temps de turbinage de 6 heures par jour à 15 heures par jour.

Δb_1	Δy_1^1	Δy_2^1	Δy_3^1	Δy_4^1	Δy_5^1
h	€/an	m	m	kWh/an	m ³ /s
9	-160.000	-0,29	-0,29	-100.000	-0.36

Tableau 6-7 : Influence de la durée du turbinage normal – Eléments de la matrice de sensibilité

6.1.3. Influence des niveaux normaux des consignes

Le second paramètre traité est le niveau normal de la consigne à chaque lac, l'amplitude de cette dernière étant maintenue à 3 mètres. Pour quantifier l'influence de celui-ci, les valeurs reprises au Tableau 6-8 sont employées.

Unité : m	Situation I - Référence I	Scénario III	Scénario IV
Niveau normal à la Gileppe	298	–	296
Niveau normal à Eupen	358,5	356.5	–

Tableau 6-8 : Paramètres d'étude de l'influence des niveaux normaux des réservoirs

Logiquement, à la Figure 6-4, les niveaux d'eau moyens des réservoirs diminuent, consécutivement à un abaissement des niveaux normaux des consignes. Cependant, ces diminutions sont moins importantes pour les niveaux des lacs correspondant à de faibles fréquences (figures de droite), voir nulles pour les fréquences extrêmement faibles. De plus, malgré l'abaissement du niveau moyen de la consigne, l'utilisation de la réserve continue d'être efficace, puisque les niveaux d'eau correspondant à de très faibles fréquences ne sont pas modifiés.

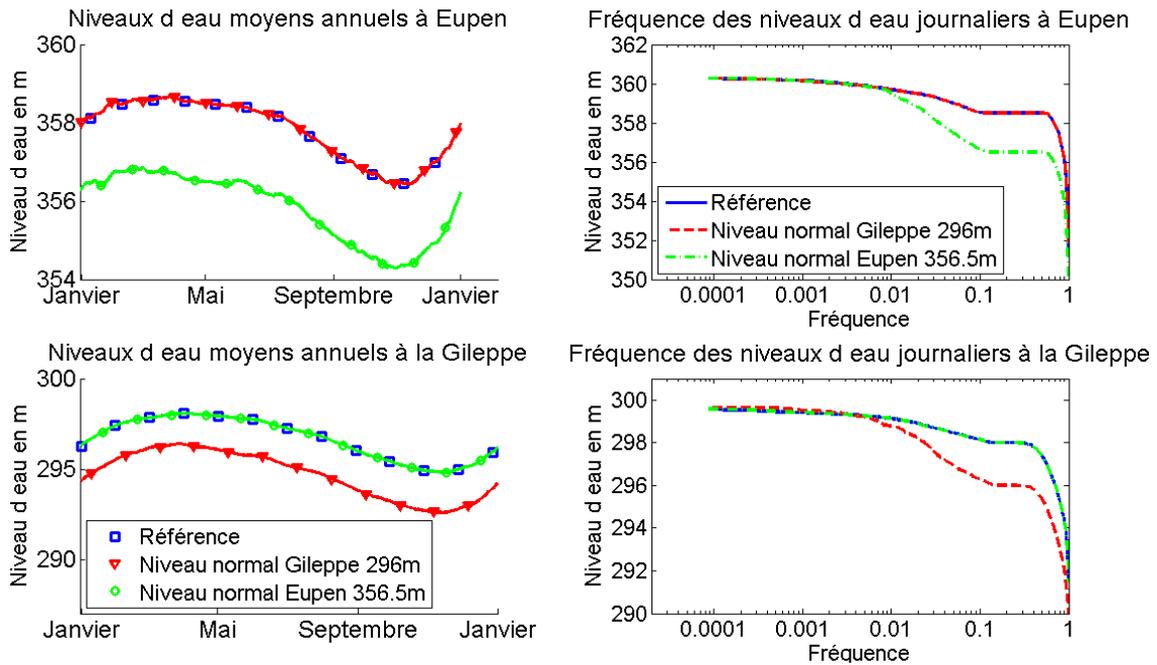


Figure 6-4 : Influence des niveaux normaux des consignes – Niveaux des lacs

Ensuite, de part l'augmentation de la réserve d'empotement, consécutive à la réduction du niveau normal de la consigne, une diminution du risque total d'inondations (de 5% pour le scénario III et de 2% pour le scénario IV) est réalisée par un écrêtage de la crue plus important (Figure 6-5). Pour un même abaissement du niveau normal de la consigne, l'effet constaté est plus significatif lorsque cet abaissement est appliqué au réservoir d'Eupen.

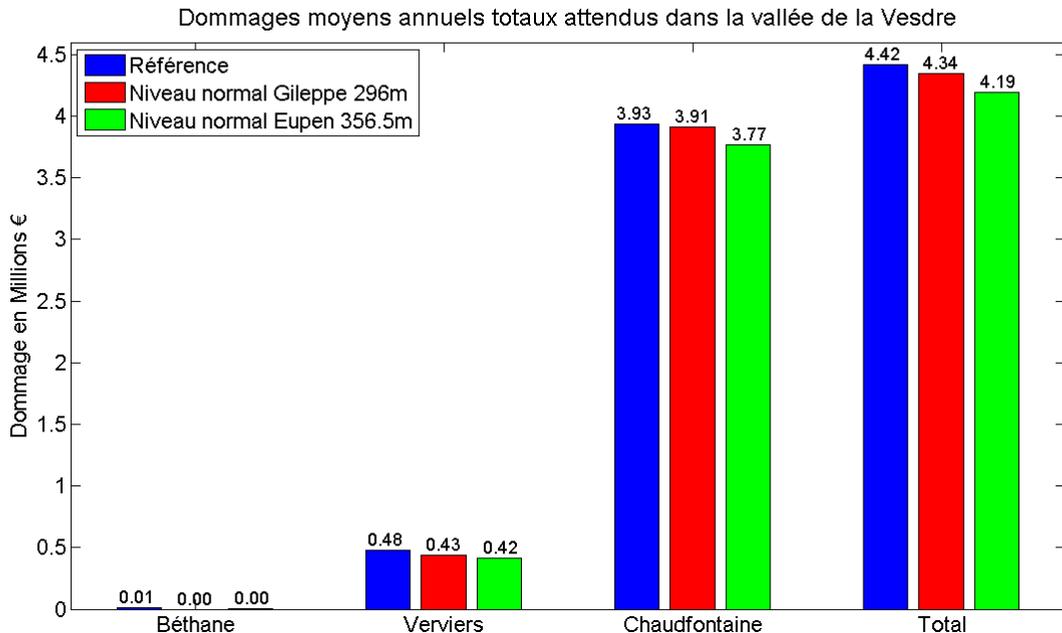


Figure 6-5 : Influence des niveaux normaux des consignes – Dommages moyens annuels dus aux crues dans la vallée de la Vesdre

Les Tableau 6-9 et Tableau 6-10 reprennent les deuxième et troisième colonnes de la matrice de sensibilité. Les variations en termes de potentiel de production hydroélectrique sont à nouveau faibles (-1% à Eupen).

Δb_2	Δy_1^2	Δy_2^2	Δy_3^2	Δy_4^2	Δy_5^2
<i>m</i>	€/an	<i>m</i>	<i>m</i>	kWh/an	m ³ /s
-2	-230.000	-2,28	0,00	-100.000	-0.02

Tableau 6-9 : Influence du niveau normal à la Eupen – Eléments de la matrice de sensibilité

Δb_3	Δy_1^3	Δy_2^3	Δy_3^3	Δy_4^3	Δy_5^3
<i>m</i>	€/an	<i>m</i>	<i>m</i>	kWh/an	m ³ /s
-2	-80.000	0,00	-2,16	-20.000	-0.01

Tableau 6-10 : Influence du niveau normal à la Gileppe – Eléments de la matrice de sensibilité

6.1.4. Influence des amplitudes des consignes

L'influence de l'amplitude de chaque consigne est à présent analysée, aux barrages d'Eupen et de la Gileppe, en considérant les mêmes cotes normales que pour la situation de référence. Les valeurs utilisées sont reprises au Tableau 6-11.

Unité : <i>m</i>	Situation I - Référence I	Scénario V	Scénario VI
Amplitude à Eupen	3	2	–
Amplitude à la Gileppe	3	–	2

Tableau 6-11 : Paramètres d'étude de l'influence de l'amplitude de la consigne

La Figure 6-6 représente les changements réalisés du point de vue des niveaux d'eau dans les réserves, suite aux modifications des amplitudes des consignes. Au printemps et en été, les niveaux d'eau moyens sont semblables, alors qu'ils augmentent en automne et en hiver, dans les scénarios V et VI, par rapport à la situation de référence.

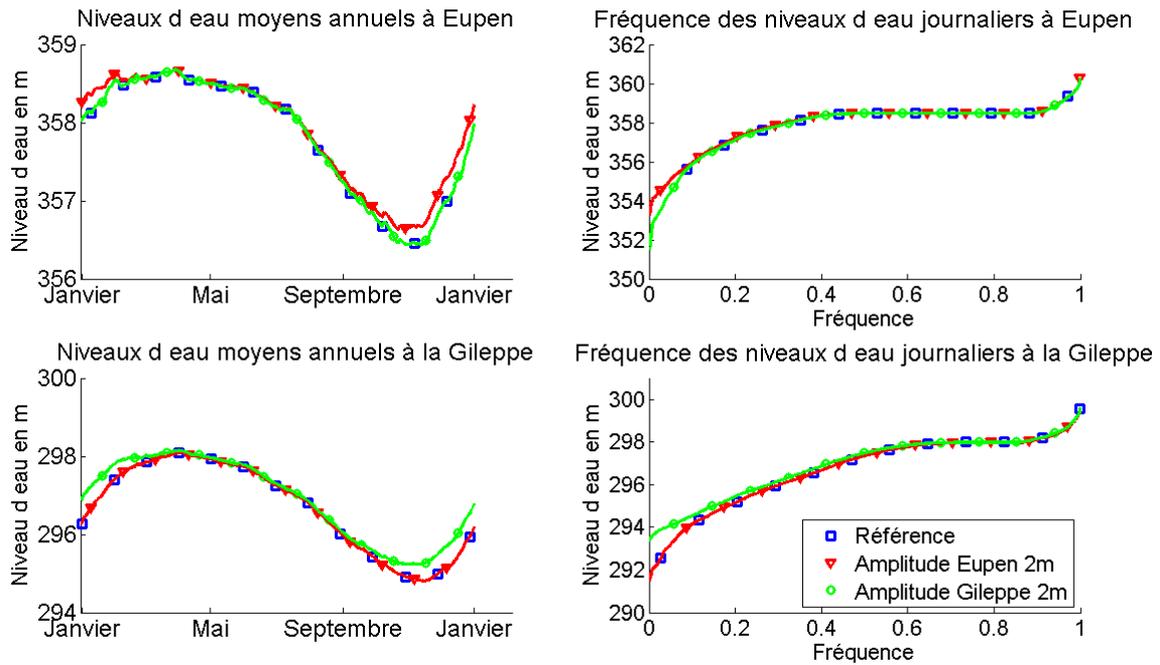


Figure 6-6 : Influence des amplitudes des consignes - Niveaux d'eau des réservoirs

Par contre, les débits de crue et d'étiage ne sont pas modifiés de manière conséquente, bien qu'une certaine augmentation du nombre de faibles débits soit constatée lors d'une diminution d'amplitude. Il en va de même pour le potentiel de production hydroélectrique qui est peu sensible à ce paramètre.

Il peut paraître étonnant que l'amplitude de la consigne n'ait pas un effet significatif sur les débits de crue et donc sur les dommages qu'elles occasionnent à l'aval, alors que sa diminution à un réservoir augmente les niveaux d'eau moyens annuels en période hivernale. En réalité, l'augmentation des niveaux d'eau moyens aux réservoirs provient principalement d'une augmentation des bas niveaux d'eau, alors que les niveaux d'eau courants et élevés sont peu impactés par une modification de l'amplitude (Figure 6-7). Ainsi, la réserve disponible pour les bas niveaux étant suffisante à l'empotement de crues, une augmentation de ces bas niveaux d'eau n'a que peu de conséquences sur le dommage moyen annuel total à l'aval.

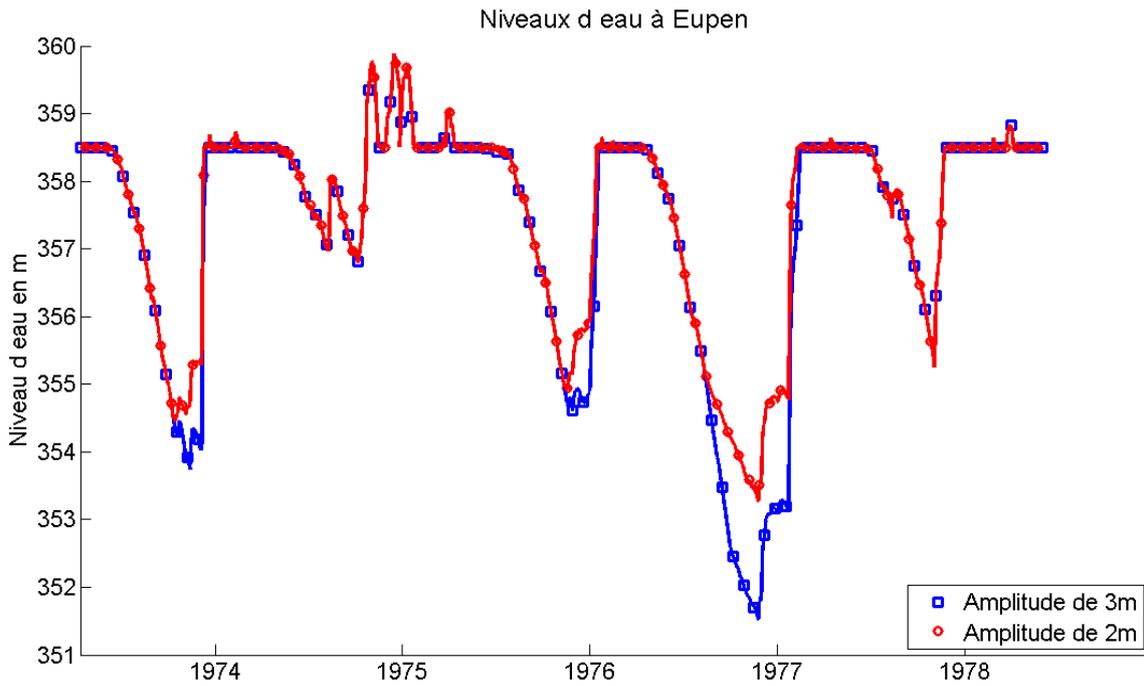


Figure 6-7 : Effets d’une modification d’amplitude de la consigne au barrage d’Eupen sur les faibles niveaux d’eau du lac

Dans la simulation, les faibles valeurs de la consigne servent à décider si un turbinage normal est, ou non, applicable, compte tenu du niveau d’eau dans la retenue et du moment de l’année considéré. Ainsi, l’augmentation générale des niveaux d’eau à un réservoir, suite à une diminution de l’amplitude de la consigne, est une conséquence de la réduction des configurations où un turbinage normal peut être effectué.

Δb_4	Δy_1^4	Δy_2^4	Δy_3^4	Δy_4^4	Δy_5^4
<i>m</i>	€/an	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>kWh/an</i>	<i>m³/s</i>
-1	0	1,75	0,00	20.000	-0.04

Tableau 6-12 : Influence de l’amplitude à Eupen – Eléments de la matrice de sensibilité

Δb_5	Δy_1^5	Δy_2^5	Δy_3^5	Δy_4^5	Δy_5^5
<i>m</i>	€/an	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>kWh/an</i>	<i>m³/s</i>
-1	0	0,00	1,84	20.000	-0.05

Tableau 6-13 : Influence de l’amplitude à la Gileppe – Eléments de la matrice de sensibilité

6.1.5. Influence du volume prélevé pour la production d'eau potable

Dans un contexte de recherche d'une gestion efficace des réservoirs, tenant compte d'horizons temporels futuristes, une étude de l'impact du volume prélevé pour la production d'eau potable sur les indicateurs de performance est toute indiquée. Pour cela, une augmentation conséquente de ce paramètre est étudiée, indépendamment sur chaque ouvrage.

Unité : $m^3/jour$	Situation I – Référence I	Scénario VII	Scénario VIII
Volume prélevé à Eupen	60.000	90.000	60.000
Volume prélevé à la Gileppe	30.000	30.000	60.000

Tableau 6-14 : Paramètres d'étude de l'influence de la production d'eau potable

Comme le montre la Figure 6-8, les niveaux d'eau dans les réservoirs sont fortement perturbés par les variations réalisées, d'autant plus pour les bas niveaux d'eau. De plus, l'influence d'une augmentation du volume prélevé dans la réserve sur les faibles niveaux d'eau des réservoirs est bien plus importante au réservoir de la Gileppe qu'à celui d'Eupen, suite aux apports moindres au premier en saison sèche. Ainsi, l'augmentation de la production à la Gileppe a de sérieuses conséquences sur les niveaux des lacs, particulièrement dans le cas d'une reconduction d'années sèches (années 1995 et 1996 à la Figure 6-9).

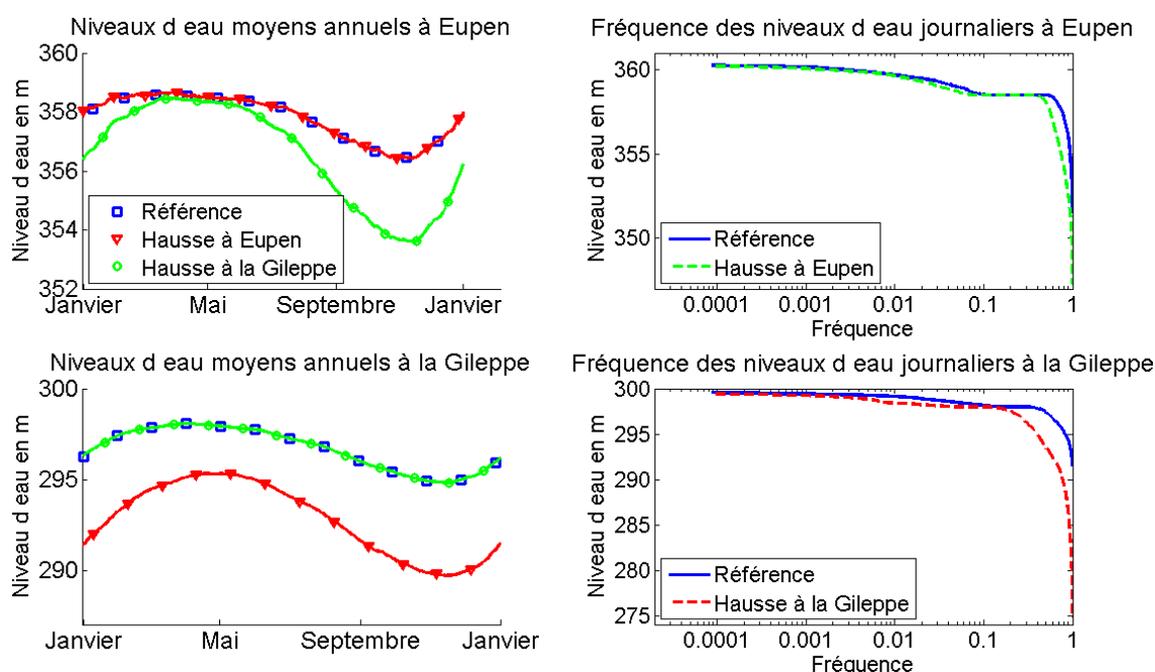


Figure 6-8 : Influence du volume prélevé pour la production d'eau potable - Niveaux d'eau des réservoirs

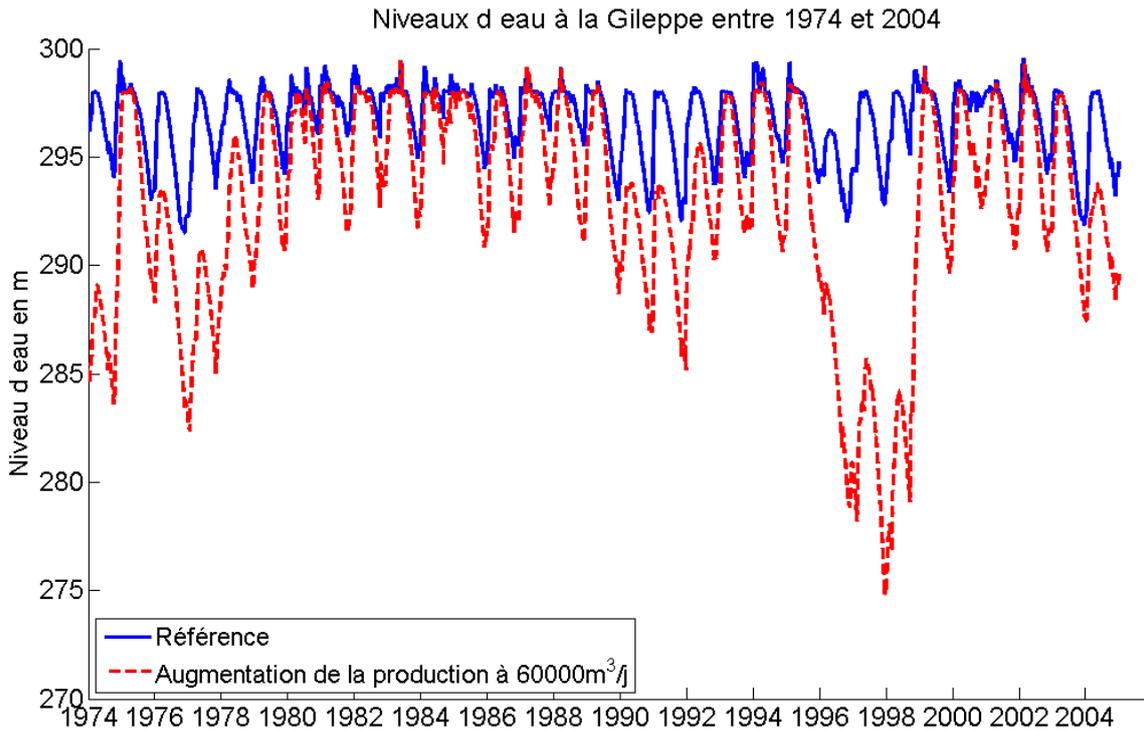


Figure 6-9 : Influence du volume prélevé pour la production d’eau potable - Niveaux d’eau au barrage de la Gileppe entre 1974 et2004

Suite à ces fortes réductions des niveaux d’eau dans les réservoirs, les débits d’étiages sont plus nombreux et d’intensités moindres (Figure 9-6 en Annexe) et les dommages moyens annuels dus aux inondations sont baissés (Figure 9-8 en Annexe). Forcément, le potentiel de production hydroélectrique diminue fortement (Figure 9-7 en Annexe).

Comme présenté ci-dessous, l’emprise de ce paramètre sur les indicateurs de performance des faibles niveaux des lacs et de la production hydroélectrique (-18%) est importante.

Δb_6	Δy_1^6	Δy_2^6	Δy_3^6	Δy_4^6	Δy_5^6
m^3	€/an	m	m	kWh/an	m^3/s
30.000	-70.000	-4,28	0,00	-1.588.000	-0.13

Tableau 6-15 : Influence du volume prélevé pour la production d’eau potable à Eupen – Eléments de la matrice de sensibilité

Δb_7	Δy_1^7	Δy_2^7	Δy_3^7	Δy_4^7	Δy_5^7
m^3	€/an	m	m	kWh/an	m^3/s
30.000	-110.000	0,00	-16,7	-1.478.000	-0.20

Tableau 6-16 : Influence du volume prélevé pour la production d’eau potable à la Gileppe – Eléments de la matrice de sensibilité

6.1.6. Influence des débits de by-pass des réservoirs

Le débit de by-pass, ou débit de base, est le débit minimal relâché par les réservoirs dans la Vesdre en l'absence de risques d'inondations. L'influence de ce débit de base est à présent analysée avec les valeurs prises au Tableau 6-17.

Unité : m^3/s	Situation I - Référence I	Scénario IX
Débit de by-pass à Eupen	0,04	0,10
Débit de by-pass à la Gileppe	0,04	0,10

Tableau 6-17 : Paramètres d'étude de l'influence des débits de by-pass des réservoirs

Suite à cette augmentation du débit de base, non turbiné, relâché dans la Vesdre, les faibles niveaux d'eau des réservoirs s'atténuent (Figure 9-9 en Annexe). De plus, le potentiel de production hydroélectrique est assez bien diminué (-7%). Par contre, les faibles débits sont augmentés suite à un soutien renforcé des débits d'étiage (Figure 6-10).

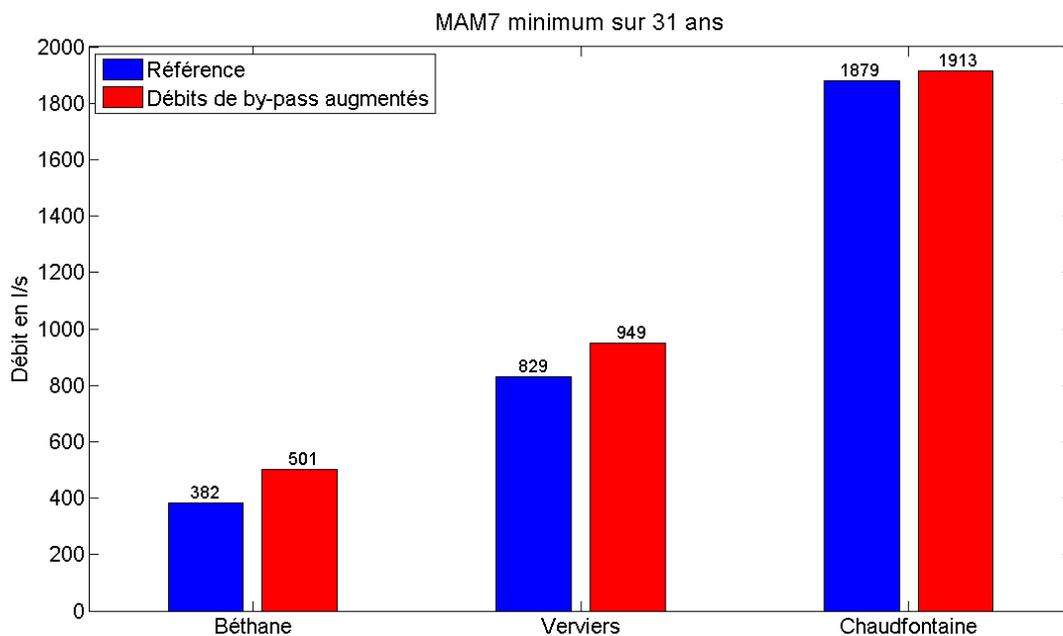


Figure 6-10 : Influence des débits de by-pass – MAM7 minimum

Δb_8	Δy_1^8	Δy_2^8	Δy_3^8	Δy_4^8	Δy_5^8
m^3/s	€/an	m	m	kWh/an	m^3/s
0,06	-10.000	-0,68	-0,49	-591.000	0.07

Tableau 6-18 : Influence des débits de by-pass – Éléments de la matrice de sensibilité

6.1.7. Influence des capacités de turbinage maximales

Un autre paramètre, dont l'influence est étudiée, est la capacité de turbinage maximale de chaque réservoir. Les valeurs utilisées sont données au Tableau 6-19.

Unité : m^3/s	Situation I – Référence I	Scénario X	Scénario XI
Capacité de turbinage à Eupen	4,5	5,5	4,5
Capacité de turbinage à la Gileppe	1,8	1,8	2,8

Tableau 6-19 : Paramètres d'étude de la capacité de turbinage maximale

L'augmentation de la capacité de turbinage maximale aux réservoirs induit principalement un léger accroissement du potentiel de production hydroélectrique (1%), suite à un turbinage plus conséquent des lâchers. Les effets constatés sont semblables, que cette élévation ait lieu au barrage d'Eupen ou à celui de la Gileppe.

Δb_9	Δy_1^9	Δy_2^9	Δy_3^9	Δy_4^9	Δy_5^9
m^3/s	€/an	m	m	kWh/an	m^3/s
1	-50.000	0,00	0,00	70.000	0.00

Tableau 6-20 : Influence de la capacité de turbinage maximale à Eupen – Eléments de la matrice de sensibilité

Δb_{10}	Δy_1^{10}	Δy_2^{10}	Δy_3^{10}	Δy_4^{10}	Δy_5^{10}
m^3/s	€/an	m	m	kWh/an	m^3/s
1	-50.000	0,00	0,00	90.000	0.00

Tableau 6-21 : Influence de la capacité de turbinage maximale à la Gileppe – Eléments de la matrice de sensibilité

6.1.8. Influence des débits lâchers en mode de décrue

En mode de décrue, le débit relâché pour ramener le niveau du lac sous le niveau normal constitue le paramètre suivant analysé.

Unité : m^3/s	Situation I – Référence I	Scénario XII	Scénario XIII
Débit de décrue à Eupen	20	30	15
Débit de décrue à la Gileppe	10	15	7,5

Tableau 6-22 : Paramètres d'étude de l'influence des débits de décrue

L'impact de ce facteur sur l'ensemble des indicateurs de performance est peu significatif, comme l'indiquent les valeurs reprises au Tableau 6-23 où la variation Δb est prise comme le passage du scénario XIII au scénario XII, à Eupen.

Δb_{11}	Δy_1^{11}	Δy_2^{11}	Δy_3^{11}	Δy_4^{11}	Δy_5^{11}
m^3/s	€/an	m	m	kWh/an	m^3/s
15	20.000	0,00	0,00	20.000	0.00

Tableau 6-23 : Influence des débits de décrue – Eléments de la matrice de sensibilité

6.1.9. Influence de l'ouverture du tunnel de la Helle en gestion de décrue

L'intérêt du test [22], permettant la fermeture du tunnel de la Helle en gestion de décrue, est maintenant critiqué. Dans le scénario XIV, ce test est simplement supprimé par ouverture obligatoire du tunnel en mode de gestion de décrue.

Comme montré au Tableau 6-24, les résultats obtenus révèlent uniquement une augmentation minime du potentiel de production hydroélectrique. Ce résultat logique puisque les lieux permettant le calcul des dommages occasionnés par des crues sont tous situés après la confluence entre la Vesdre et la Helle.

Δb_{12}	Δy_1^{12}	Δy_2^{12}	Δy_3^{12}	Δy_4^{12}	Δy_5^{12}
-	€/an	m	m	kWh/an	m^3/s
1	0	0,00	0,00	10.000	0.00

Tableau 6-24 : Influence de l'ouverture du tunnel de la Helle en gestion de décrue – Eléments de la matrice de sensibilité

6.1.10. Influence des débits d'alerte en aval [2]

Le paramètre suivant concerne les valeurs des débits d'alerte à Bellevaux et à Pepinster. En mode de gestion normale, ces débits d'alerte, une fois dépassés, entraînent une annulation des débits relâchés par les barrages.

Unité : m^3/s	Situation I - Référence	Scénario XV
Débit d'alerte à Bellevaux	40	35
Débit d'alerte à Pepinster - Hoëgne	80	70
Débit d'alerte à Pepinster - Vesdre	90.5	80.5

Tableau 6-25 : Paramètres d'étude de l'influence des débits d'alerte

La seule influence constatée est une légère réduction du risque total d'inondations et du potentiel de production hydroélectrique. En effet, les changements réalisés n'ont une influence que lorsque le mode d'alerte de crue n'est pas activé. Or, en dehors du mode d'alerte de crue, les débits relâchés par les barrages sont faibles, ce qui justifie l'emprise limitée constatée sur le dommage en aval.

Δb_{13}	Δy_1^{13}	Δy_2^{13}	Δy_3^{13}	Δy_4^{13}	Δy_5^{13}
m^3/s	€/an	m	m	kWh/an	m^3/s
-10	-30.000	0,00	0,00	-20.000	0.00

Tableau 6-26 : Influence des débits d'alerte – Éléments de la matrice de sensibilité

6.2. Analyse de sensibilité des paramètres intrinsèques au mode de gestion de crue

Dans la seconde situation de référence, employée pour l'étude des paramètres restant à étudier, les lâchers à Eupen tiennent compte des débits à Pepinster. Ainsi, ces lâchers ne peuvent être supérieurs au différentiel entre le débit seuil d'inondation à Pepinster et le débit en cours à cet endroit. Cette modification est en accord avec la gestion réelle des ouvrages.

6.2.1. Caractérisation de la seconde situation de référence

En comparant le second modèle de gestion des réservoirs (Référence II) à celui utilisé pour l'analyse des paramètres extrinsèques au mode de gestion de crue (Référence I), les seuls changements observés résident dans une utilisation plus importante du volume d'empotement (Figure 6-11), permettant une réduction des dommages à l'aval consécutifs aux crues de la Vesdre (Figure 6-12). Les variables hydrauliques de la Vesdre et les niveaux d'eau des réservoirs ne diffèrent pas en dehors des situations de pluviosités sérieuses. Au réservoir d'Eupen, le niveau maximal de sécurité est atteint lors d'une crue, sans toutefois induire des inondations à l'aval. Par contre, les niveaux lac de la Gileppe restent constamment inférieurs au niveau maximal de sécurité (300 mètres).

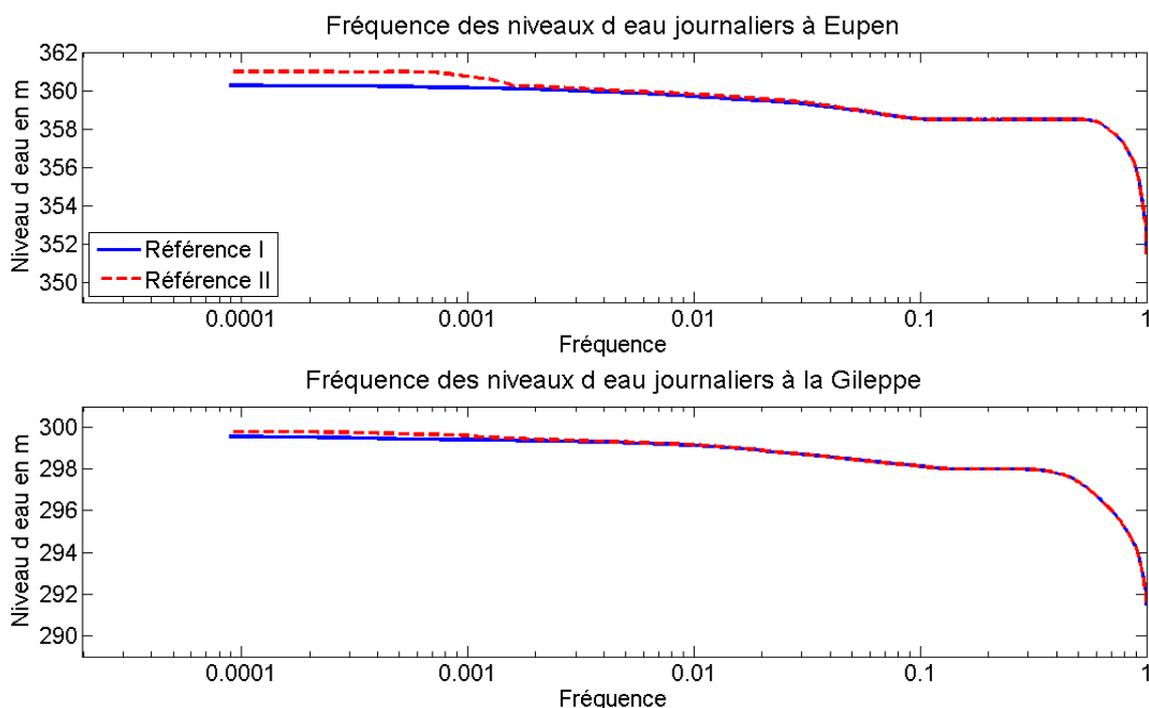


Figure 6-11 : Comparaison des deux simulations de référence - Fréquence des niveaux d'eaux aux réservoirs d'Eupen et de la Gileppe

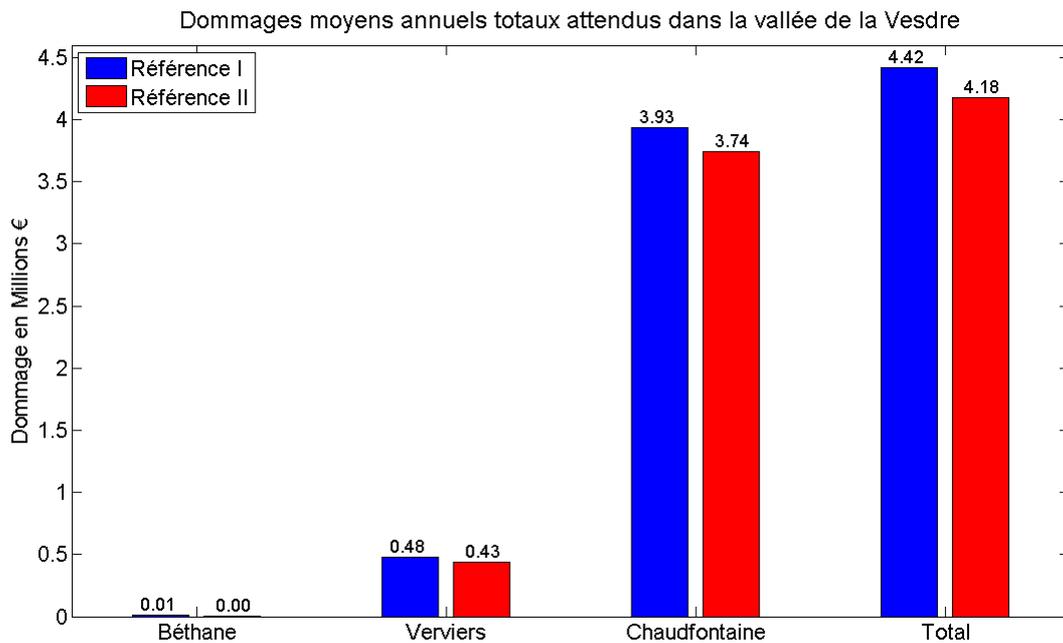


Figure 6-12 : Comparaison des simulations de référence – Dommages moyens annuels dus aux crues dans la vallée de la Vesdre

A partir des valeurs reprises à la Figure 6-12, les efficacités de la seconde situation de référence par rapport à la première, pour les zones de Béthane, Verviers et Chaudfontaine, passent respectivement de 99% à 100%, de 94% à 95% et de 89% à 93%. Au total, l'efficacité de la gestion des barrages, concernant les dégâts dus aux crues, passe de 92% à 94%.

La Figure 6-13 permet d'apprécier l'efficacité du second modèle de gestion de référence, appliqué pour gérer la crue majeure de 1983. Les éléments en pointillés représentent les valeurs des niveaux maximaux de sécurité aux réservoirs et du seuil d'inondation à Chaudfontaine. Le débit maximal atteint à Chaudfontaine ($156 \text{ m}^3/\text{s}$) est inférieur de respectivement $37 \text{ m}^3/\text{s}$ et $13 \text{ m}^3/\text{s}$ à ceux obtenus respectivement avec la simulation initiale, réalisée préalablement à ce travail, et avec le premier modèle de gestion de référence.

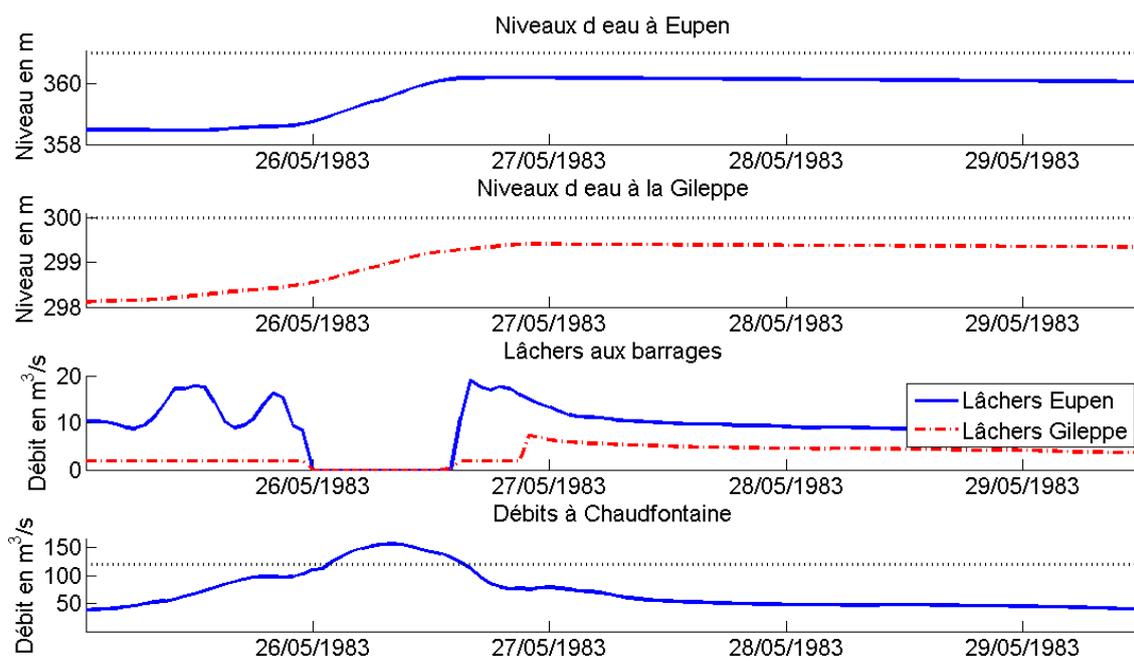


Figure 6-13 : Gestion de la crue de 1983 avec le second modèle de loi de gestion de référence

6.2.2. Influence de la fenêtre temporelle pour le calcul du volume entrant aux réservoirs

Comme précédemment expliqué, la fenêtre temporelle utilisée pour évaluer les volumes entrant aux réservoirs, dans la simulation, est une fenêtre de 48 heures. Cette valeur ne rencontre pas de vis-à-vis dans la pratique. En effet, en réalité, les prévisions des volumes susceptibles d’entrer aux réservoirs se basent sur des mesures pluviométriques et sur une éventuelle conversion neige/pluie. Ce paramètre, propre à la simulation, est à présent analysé avec le scénario XVII.

Unité : <i>h</i>	Situation XVI – Référence II	Scénario XVII
Débit seuil à Bellevaux	48	12

Tableau 6-27 : Paramètres d’étude de l’influence de la fenêtre temporelle

Comme illustré à la Figure 6-14, l’influence principale de ce paramètre concerne les dommages moyens annuels à l’aval, occasionnés par les crues de la Vesdre. Lorsque l’étendue de la fenêtre temporelle diminue, le nombre de lâchers de grande importance réalisés diminue également, ce qui explique la réduction des dommages moyens annuels calculés. Cependant, comme illustré à la Figure 6-15, cette réduction de l’étendue de la fenêtre temporelle s’accompagne également d’une utilisation plus importante de la réserve. Il y a ainsi un compromis à prendre pour atteindre une réduction maximale du dommage moyen annuel total dans la vallée de la Vesdre.

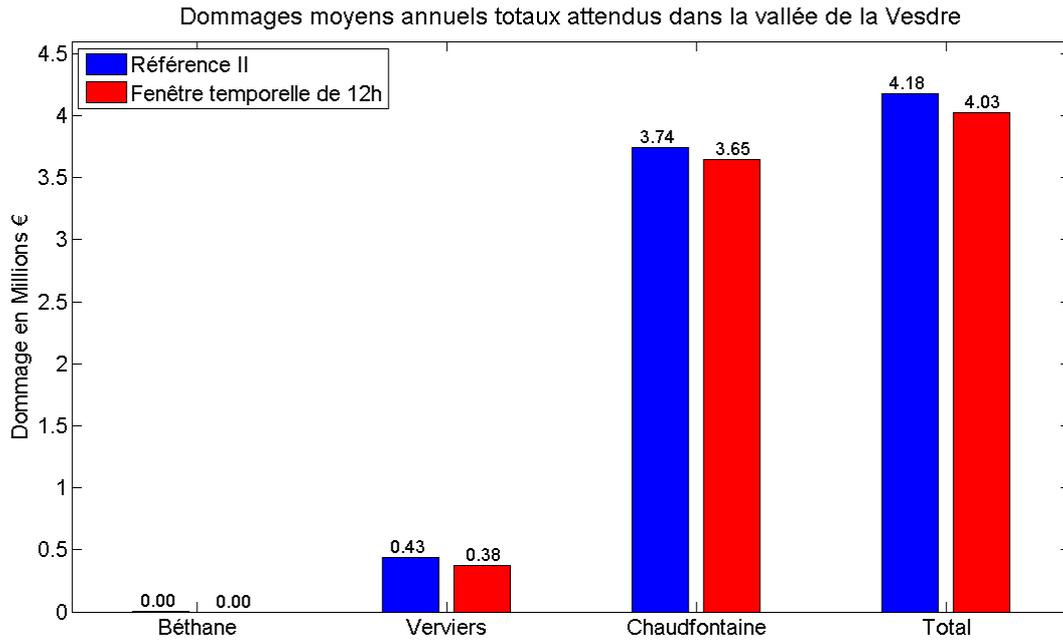


Figure 6-14 : Influence de la fenêtre temporelle – Dommages moyens annuels dus aux crues dans la vallée de la Vesdre

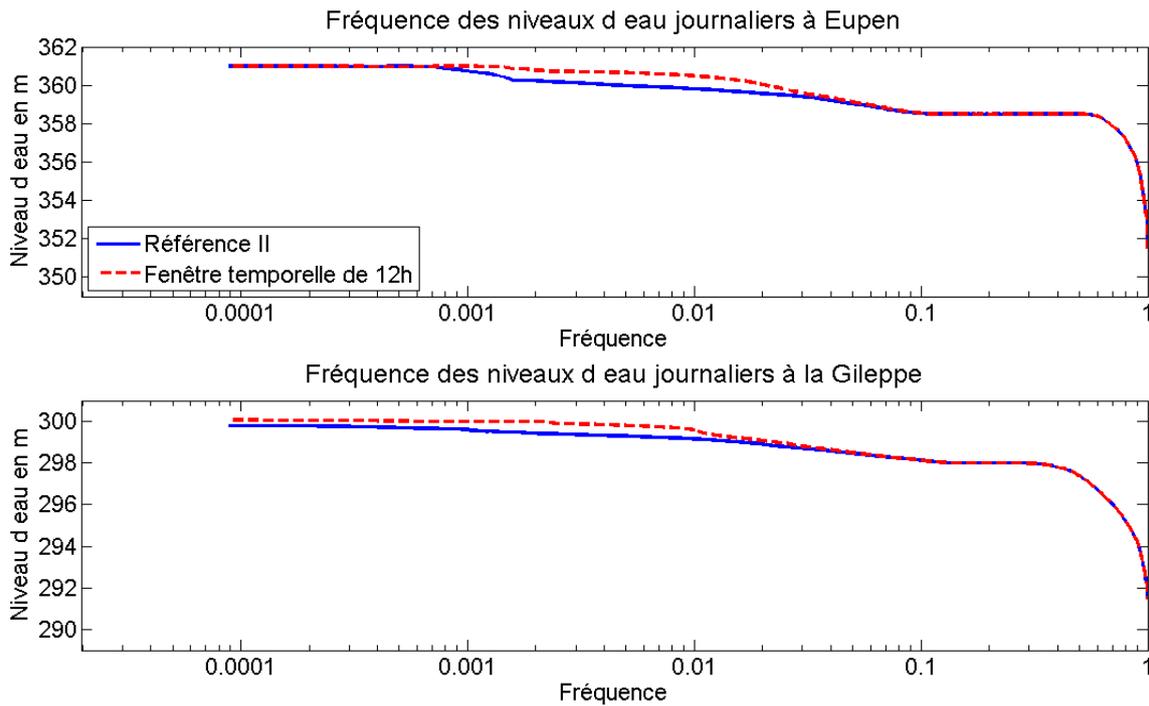


Figure 6-15 : Influence de la fenêtre temporelle – Fréquence des niveaux d'eaux aux réservoirs d'Eupen et de la Gileppe

Δb_{14}	Δy_1^{14}	Δy_2^{14}	Δy_3^{14}	Δy_4^{14}	Δy_5^{14}
h	€/an	m	m	kWh/an	m ³ /s
-36	-150.000	0,00	0,00	40.000	0.00

Tableau 6-28 : Influence de la fenêtre temporelle – Eléments de la matrice de sensibilité

6.2.3. Influence des débits seuils en aval [19], [25] et [15]

Les débits seuils sont utilisés en mode d’alerte de crue alors que les débits d’alerte sont relatifs à la gestion normale. Ils permettent l’évaluation des lâchers pouvant être réalisés sans provoquer d’inondations dans la vallée de la Vesdre. Les modifications effectuées au Tableau 6-29 devraient permettre de réaliser des lâchers plus conséquents en période d’alerte de crue.

Unité : m^3/s	Situation XVI – Référence II	Scénario XVIII
Débit seuil à Bellevaux	40	45
Débit seuil à Pepinster - Vesdre	90,5	100,5

Tableau 6-29 : Paramètres d’étude de l’influence des débits seuils

De part l’utilisation de ce paramètre uniquement en mode de gestion d’alerte, la seule influence significative concerne le risque total d’inondations à l’aval, qui augmente en allant de la situation de référence vers le scénario XVIII (Figure 9-10 en Annexe).

Δb_{15}	Δy_1^{15}	Δy_2^{15}	Δy_3^{15}	Δy_4^{15}	Δy_5^{15}
m^3/s	€/an	m	m	kWh/an	m^3/s
10	180.000	0,00	0,00	10.000	0.00

Tableau 6-30 : Influence des débits seuils – Eléments de la matrice de sensibilité

6.2.4. Influence de la Réserve supplémentaire à R_{max} [18] en mode d’alerte de crue

Dans l’organigramme de gestion des réservoirs (Figure 6-1), le test [18] permet de diriger vers un des deux types de gestion d’une crue. Lorsque ce test est positif, une crue importante est envisagée et les lâchers sont maximisés pour atteindre les débits seuils d’inondations en aval. Lorsque celui-ci est négatif, les lâchers sont égalés aux apports des réservoirs, lorsque ceux-ci ne provoquent pas des débits supérieurs aux débits seuils d’inondations à l’aval. Un test positif induit ainsi des lâchers plus importants.

L’influence de la réserve supplémentaire est étudiée en prenant un cas extrême où elle est annulée. Ainsi, le test [18] est plus facilement rendu positif dans le scénario XIX que dans la situation de référence.

Unité : m^3	Situation XVI – Référence II	Scénario XIX
Réserve supplémentaire à R_{max}	2.000.000	0

Tableau 6-31 : Paramètres d'étude de l'influence du volume additionnel en mode d'alerte de crue

Bien que les dommages d'inondations augmentent consécutivement à une réduction de la réserve supplémentaire, cette réduction demeure intéressante car elle permet le déclenchement de lâchers conséquents, préalablement à la venue du pic de crue. L'augmentation des dommages étant consécutive à ces lâchers importants, une option intéressante serait de réduire les intensités de ces derniers.

Δb_{16}	Δy_1^{16}	Δy_2^{16}	Δy_3^{16}	Δy_4^{16}	Δy_5^{16}
m^3	€/an	m	m	kWh/an	m^3/s
-2.000.000	140.000	0,00	0,00	10.000	0.00

Tableau 6-32 : Influence du volume additionnel en mode d'alerte de crue – Eléments de la matrice de sensibilité

6.3. Matrice de sensibilité locale appliquée à la gestion des réservoirs de la Vesdre

En appliquant l'analyse locale de sensibilité, développée au chapitre 2.4, au cas des réservoirs de la Vesdre, la matrice de sensibilité locale peut être construite. Les éléments de cette matrice donnent les variations attendues des indicateurs de performance lors de variations des paramètres de gestion.

Premièrement, les indicateurs de performance, notés y , prennent les valeurs correspondant aux situations de référence I ou II (Tableau 6-1 et Figure 6-12), à l'exception des indicateurs des faibles niveaux d'eau des retenues. Ces derniers sont égalés à la différence entre les indicateurs de performance des faibles niveaux d'eau, calculés dans la situation de référence I, et les plus faibles niveaux d'eau aux réservoirs permis par les consignes utilisées par le gestionnaire des barrages. Ces dernières valeurs sont respectivement égales à 343 mètres et 284 mètres aux barrages d'Eupen et de la Gileppe, donnant ainsi des valeurs y_2 et y_3 égales à 8,5 mètres et 7,5 mètres.

Ensuite, les valeurs des paramètres, notés b , sont également celles des situations de référence I ou II, à l'exception des deux paramètres des niveaux normaux des consignes. Ces derniers prennent les valeurs 7,5 mètres (Eupen) et 7 mètres (la Gileppe) car, en supposant une relation

linéaire entre le niveau de la consigne et les faibles niveaux des lacs, une diminution des niveaux normaux des consignes de ces valeurs correspondrait à atteindre les niveaux minimaux des lacs acceptables par le gestionnaire des barrages.

L'objectif est de fournir des grandeurs physiques représentatives des paramètres et indicateurs de performance. Le Tableau 6-33 reprend la numérotation attribuée aux seize paramètres étudiés.

Numéro	Paramètre	Numéro	Paramètre
1	Durée du turbinage normal	9	Capacité de turbinage à Eupen
2	Niveau normal à Eupen	10	Capacité de turbinage à la Gileppe
3	Niveau normal à la Gileppe	11	Débit en mode de décrue
4	Amplitude à Eupen	12	Ouverture du tunnel en décrue
5	Amplitude à la Gileppe	13	Débits d'alerte
6	Production d'eau potable à Eupen	14	Fenêtre temporelle
7	Production d'eau potable à la Gileppe	15	Débits seuils d'inondation
8	Débit de by-pass	16	Réserve de crue

Tableau 6-33 : Numérotation des paramètres de gestion étudiés

Une présentation des éléments de la matrice dss (équation (2-2) au chapitre 2.4), forme adimensionnelle de la matrice de sensibilité J , est présentée de la Figure 6-16 à la Figure 6-18. Celles-ci permettent, au premier coup d'œil, de se rendre compte de l'influence relative de chaque paramètre sur les indicateurs de performance, sur une échelle de -100% à 100% par rapport au paramètre le plus influent. L'influence de chaque paramètre sur un indicateur est ici comparée à celle des autres paramètres uniquement sur cet indicateur.

En ce qui concerne les dommages dus aux inondations dans la vallée de la Vesdre, la Figure 6-16 souligne les influences majeures des seuils d'inondations à Bellevaux et à Pepinster (15) ainsi que du niveau normal à Eupen (2). Ensuite, plusieurs paramètres ont une influence du même ordre : la capacité maximale de turbinage à Eupen (9), les débits d'alerte de crue (13) et le niveau normal au barrage de la Gileppe (3).

Analyse de sensibilité des paramètres de la loi de gestion

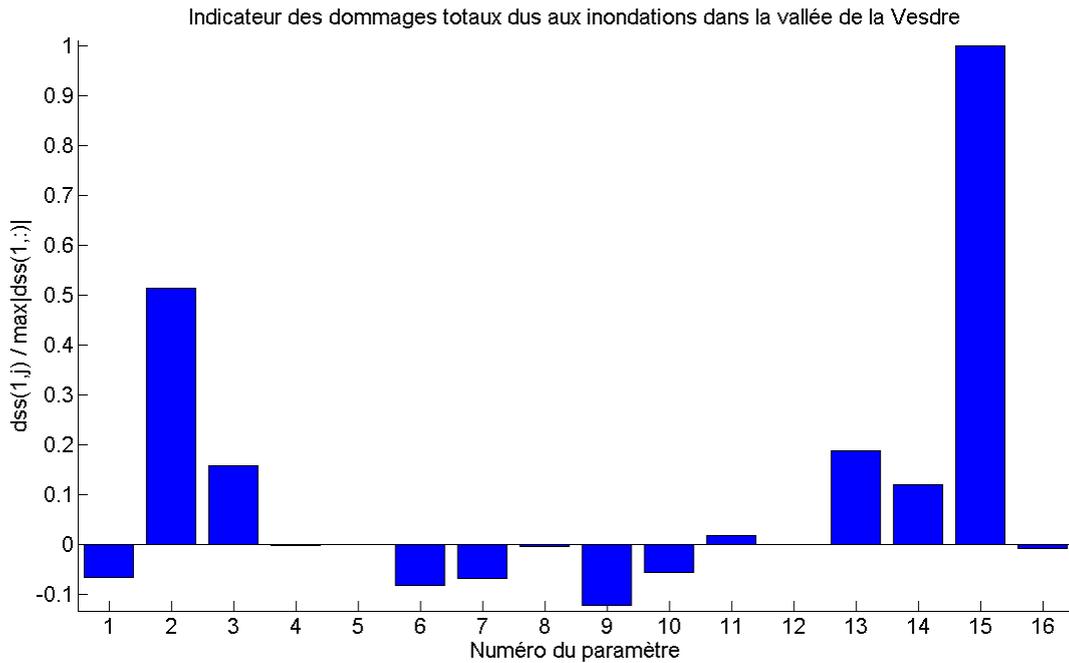


Figure 6-16 : Comparaison adimensionnelle de l'influence relative des seize paramètres sur l'indicateur des dommages dus aux inondations

Ensuite, la Figure 6-17 montre une prépondérance marquée de la consommation d'eau potable (6 - 7), du niveau normal de la consigne (2 - 3) et de l'amplitude de cette consigne (4 - 5) sur les faibles niveaux des lacs. L'emprise de chacun de ces paramètres se limite au réservoir sur lequel il s'applique.

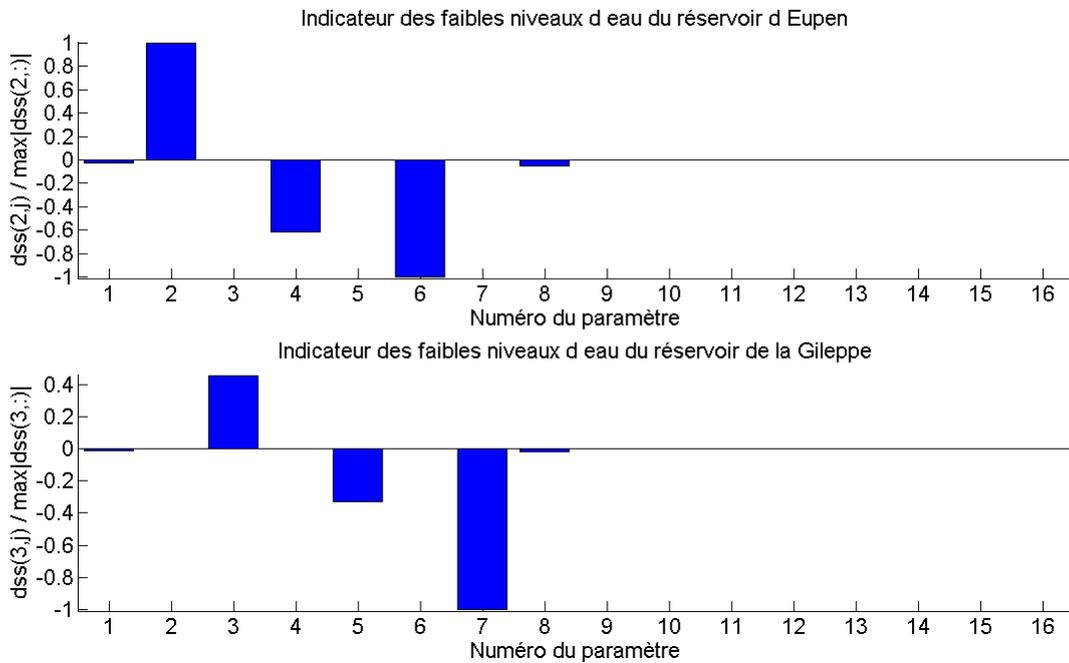


Figure 6-17 : Comparaison adimensionnelle de l'influence relative des seize paramètres sur les indicateurs des faibles niveaux d'eau des réservoirs

Concernant la production hydroélectrique aux réservoirs (Figure 6-18 en haut), celle-ci est principalement dépendante des volumes non turbinés sortant de ceux-ci (6 - 7 - 8). Les améliorations du potentiel de production hydroélectrique, à volumes prélevés aux lacs et à débits de by-pass constants, sont peu significatives. En effet, une diminution des lâchers non turbinés s'accompagnent généralement d'une réduction de la chute, ou inversement.

Enfin, comme illustré à la Figure 6-18 en dessous, les faibles débits dans la Vesdre sont dépendants uniquement des paramètres utilisés en mode de gestion normale. Leurs variations découlent en grande partie de la possibilité de turbiner en période sèche.

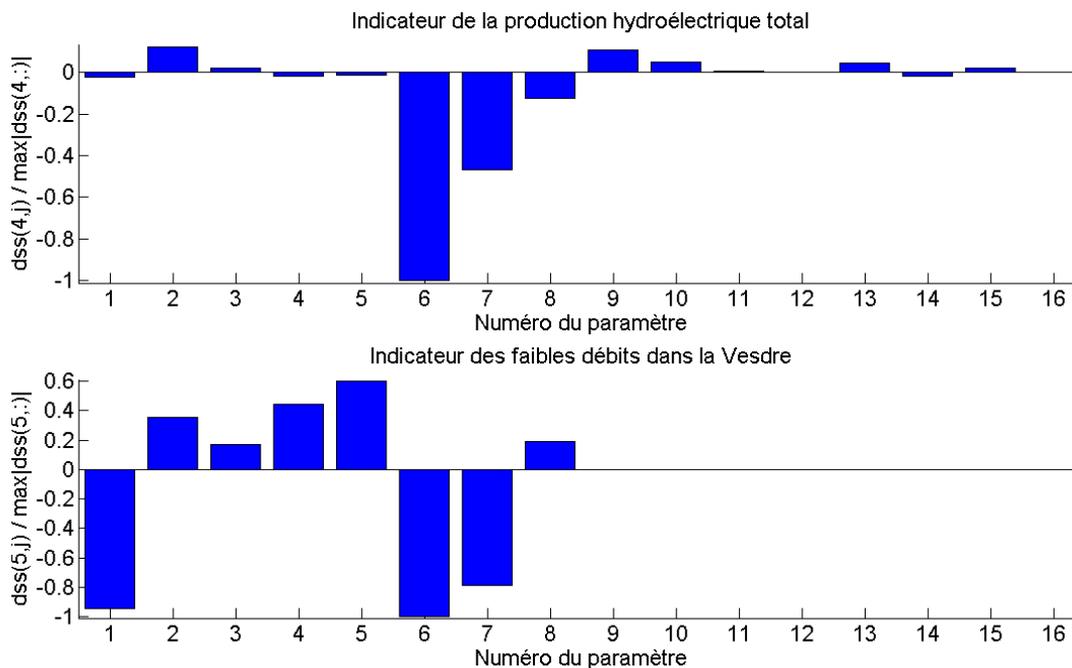


Figure 6-18 : Comparaison adimensionnelle de l'influence relative des seize paramètres sur les indicateurs de production hydroélectrique et de faibles débits

La Figure 6-19 synthétise les cinq graphiques précédents en un seul, afin de voir, sur une même image, l'effet d'un paramètre sur les cinq indicateurs de performance à la fois. Sur cette image, les paramètres supérieurs au numéro 11 ont une influence quasi exclusive sur les dommages dus aux crues. De plus, les augmentations des amplitudes des consignes (4 - 5) élèvent les niveaux des lacs sans changement sur les dégâts dus aux inondations. Après, les volumes prélevés pour la production d'eau potable (6 - 7) et les niveaux normaux des consignes (2 - 3) ont un impact considérable sur l'ensemble des indicateurs de performance.

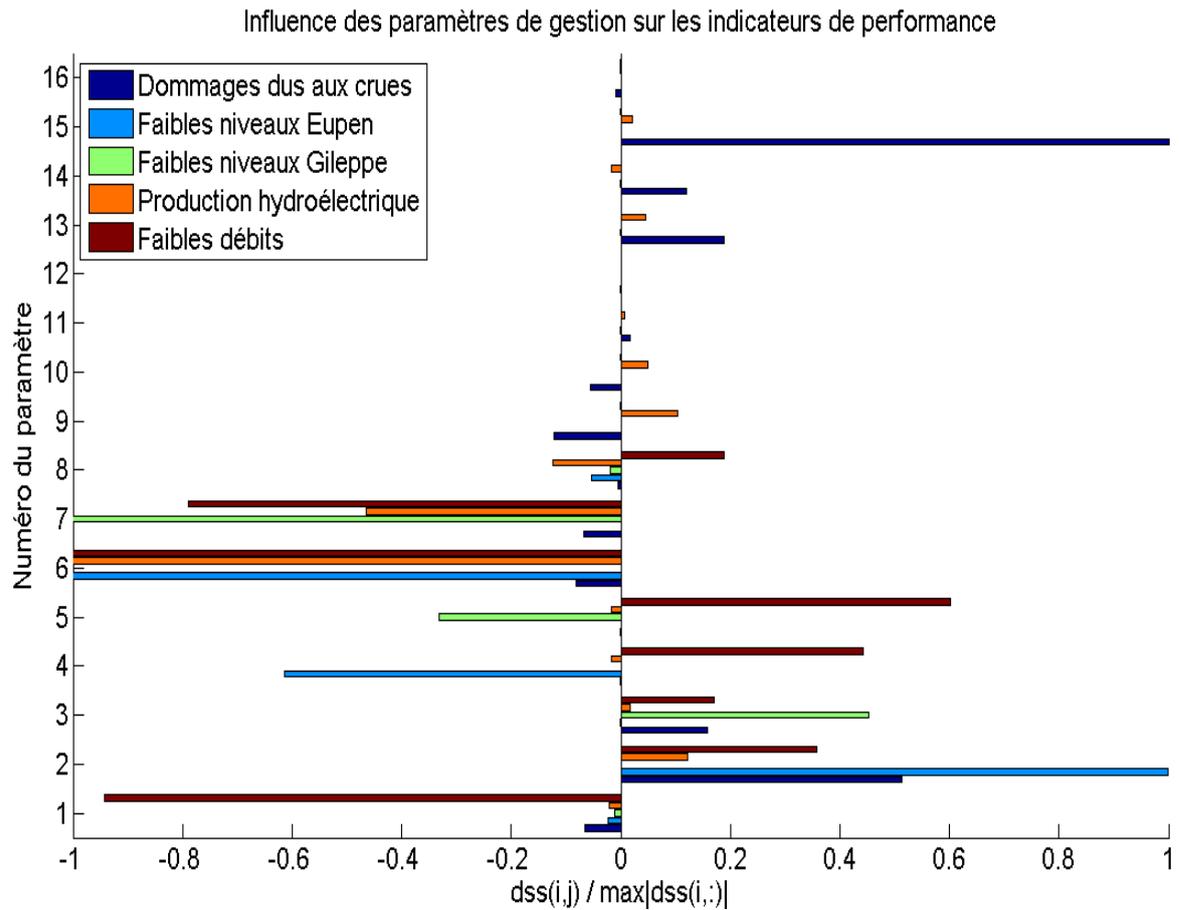


Figure 6-19 : Comparaison adimensionnelle de l'influence relative des seize paramètres sur chacun des cinq indicateurs de performance

Ensuite, la Figure 6-20 représente l'effet de chaque paramètre sur l'ensemble des indicateurs de performance, sans une mise à échelle des éléments dss_{ij} . De cette image, il ressort que les indicateurs des faibles niveaux des lacs sont, de loin, les plus variables. L'utilité des ouvrages de rétention d'eau pour soutenir les faibles débits est moins déterminante dans la simulation que dans la pratique, suite à la surestimation des faibles débits d'apport par le modèle hydrologique. Cela explique pourquoi les faibles débits sont si peu sensibles aux variations des paramètres.

Analyse de sensibilité des paramètres de la loi de gestion

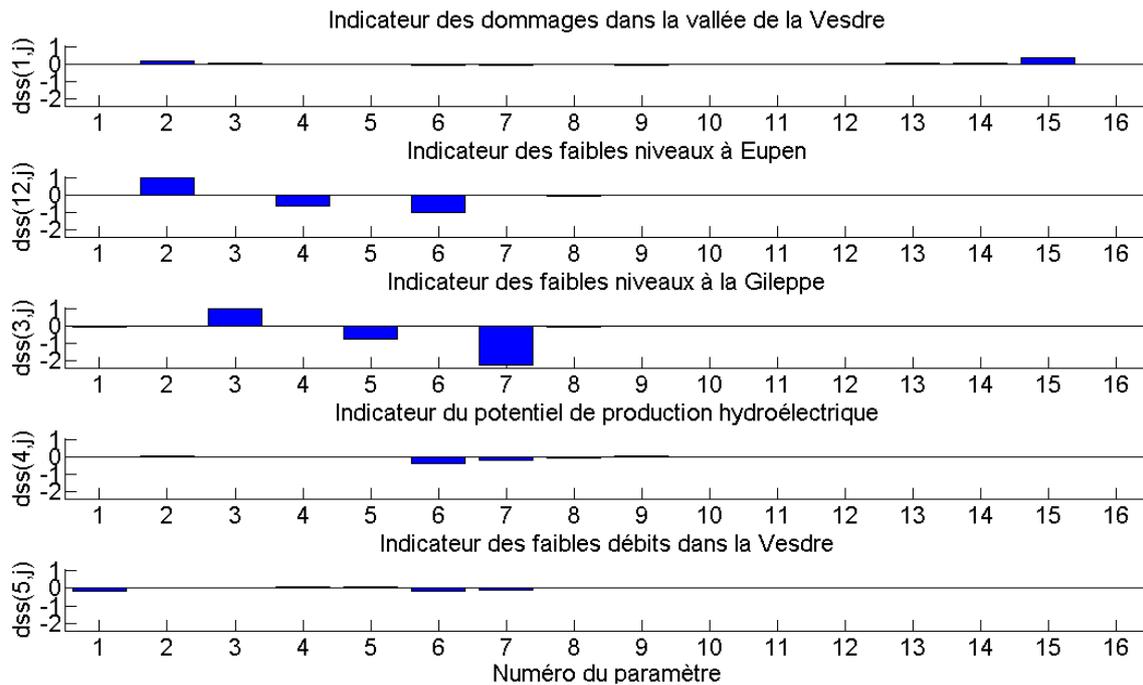


Figure 6-20 : Comparaison des éléments de la matrice de sensibilité *dss*

Enfin, le calcul des éléments du *css* (équation (2-3) au chapitre 2.4) permet de considérer les incidences des seize paramètres sur l'entière des indicateurs de performance à la fois. Ces valeurs sont fortement influencées par les faibles niveaux d'eau des réservoirs. Elles mettent toutefois en évidence les influences prépondérantes des consignes (2 - 3 - 4 - 5) et des prélèvements pour la production d'eau potable (6 - 7) sur l'ensemble des indicateurs.

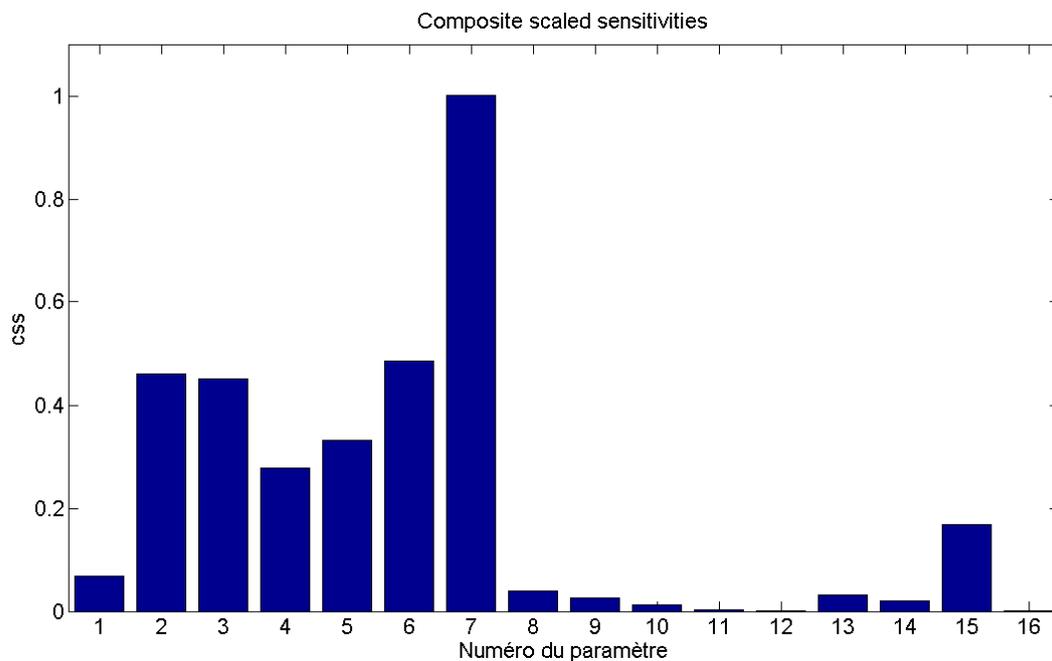


Figure 6-21 : Composite scaled sensitivities (*css*)

7. Etude de la procédure de gestion avec prise en compte du changement climatique

L'analyse de la gestion des réservoirs aux horizons temporels 2020-2050 et 2070-2100, pour des scénarios sec et humide, est à présent effectuée. Les résultats obtenus sont comparés vis-à-vis de la seconde situation de référence (Référence II), présentée au chapitre 6.2.1. Pour rappel, les scénarios sec et humide représentent des situations extrêmes, délimitant l'éventail des variations possibles du climat, à l'horizon temporel étudié.

Ensuite, en se basant sur la matrice de sensibilité discutée au chapitre 6.3, diverses adaptations de la loi de gestion sont recherchées, dans le but de pallier aux dégradations constatées de certains indicateurs de performance. Certaines adaptations sont simulées à l'horizon 2070-2100, auxquelles les détériorations sont les plus accentuées. C'est également à cet horizon temporel que l'analyse des résultats est la plus approfondie, de façon à ne pas surcharger ce travail en présentant, en détail, les résultats obtenus pour la période 2020-2050.

En guise d'introduction à ce chapitre, une représentation synoptique originale de l'historique des débits à Pepinster, entre 1974 et 2004, est présentée à la première image de la Figure 7-1, dont les débits cibles sont définis au Tableau 3-3. Ensuite, à partir de perturbations des précipitations et des températures, par la méthode du changement Delta, de façon à représenter les effets du changement climatique en 2020-2050 et 2070-2100, ces débits sont modifiés pour fournir des historiques fictifs, représentatifs des changements attendus.

Ces historiques fictifs sont représentés aux images du milieu (scénario sec) et du dessous (scénario humide) de la Figure 7-1, pour la période 2070-2100. Sur ces représentations, les changements produits sur les débits sautent aux yeux. Dans le scénario sec, à la figure du milieu, le nombre de très faibles débits à Pepinster (< DCE) explose et une réduction des hauts débits (> Alerte) est observée. Dans le scénario humide, le nombre de débits élevés (> DCC) est visiblement en forte augmentation. Une quantification de ces représentations et les courbes des débits classés à Verviers et à Pepinster peuvent être consultées en Annexe, pour les périodes 2020-2050 (Figure 9-17 et Figure 9-18) et 2070-2100 (Figure 9-11 et Figure 9-12). A l'horizon 2020-2050, les changements suivent les mêmes tendances que pour l'horizon 2070-2100, mais de façon moins prononcée.

Etude de la procédure de gestion avec prise en compte du changement climatique

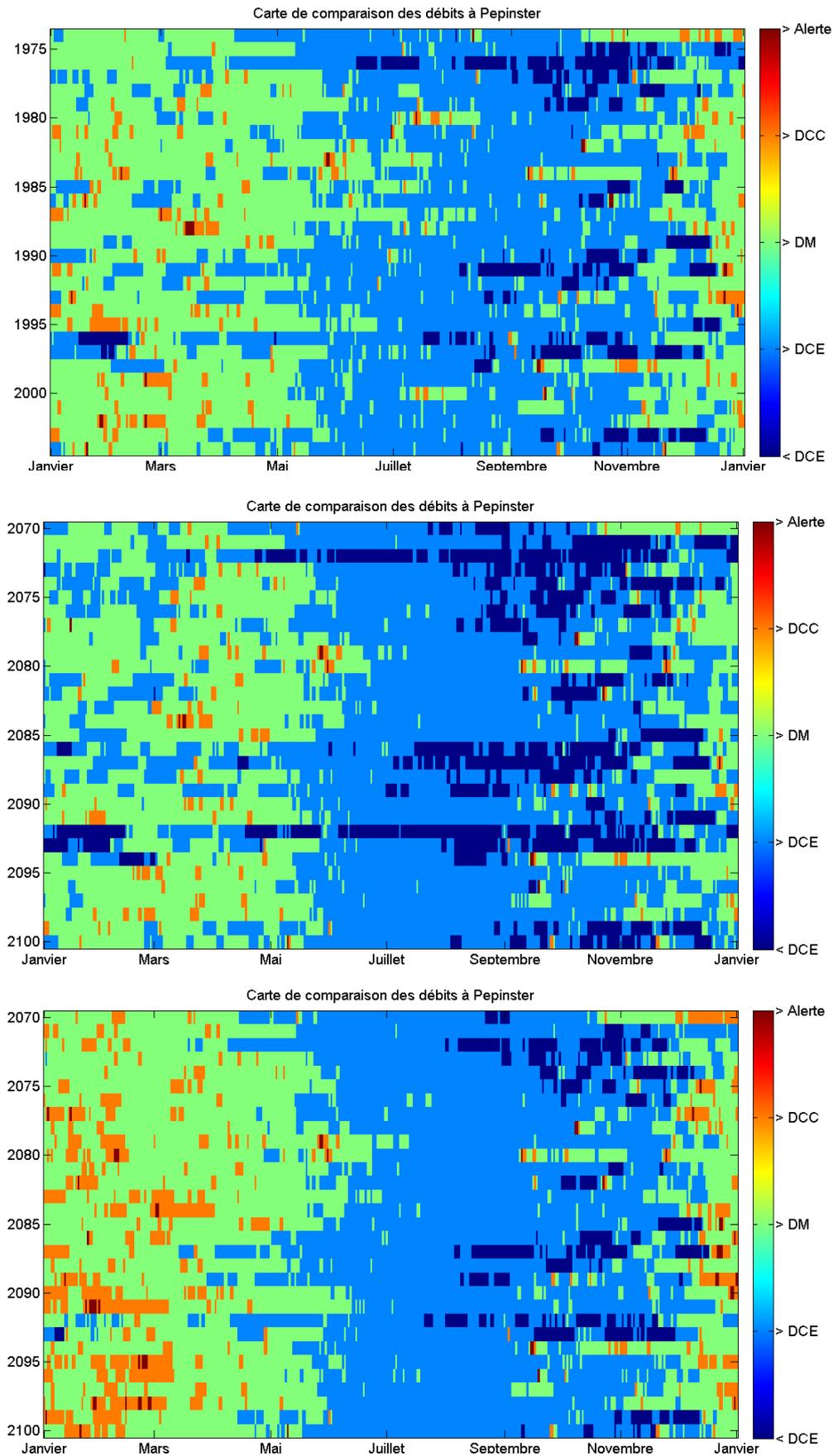


Figure 7-1 : Au dessus : Représentation synoptique de l'historique des débits entre 1974 et 2004. Au milieu et au dessous : Représentation synoptique à l'horizon 2100 pour les scénarios sec et humide

7.1. Effets du changement climatique à l'horizon temporel 2070-2100

L'étendue des variations des niveaux des lacs, à l'horizon 2070-2100, est large entre les deux scénarios extrêmes (sec ou humide). En période de crues, les niveaux moyens des lacs atteignent des cotes plus importantes dans le scénario humide par rapport à la situation actuelle, et inversement pour le scénario sec (Figure 7-2). De plus, dans le scénario humide, les niveaux maximaux de sécurité sont atteints bien plus fréquemment (Figure 7-3). Certaines tendances sont cependant communes aux deux scénarios. Ainsi, en période sèche, les niveaux d'eau des réservoirs sont abaissés dans les deux cas, bien que plus intensément pour le scénario sec. Les niveaux d'eau minimaux des réservoirs d'Eupen et de la Gileppe sont fournis au Tableau 7-1. Ceux-ci montrent que ces indicateurs ne sont pas fortement modifiés. En effet, la loi de gestion des barrages permet de réduire fortement le turbinage réalisé en saison sèche, pour atténuer les effets de la réduction des apports aux réservoirs.

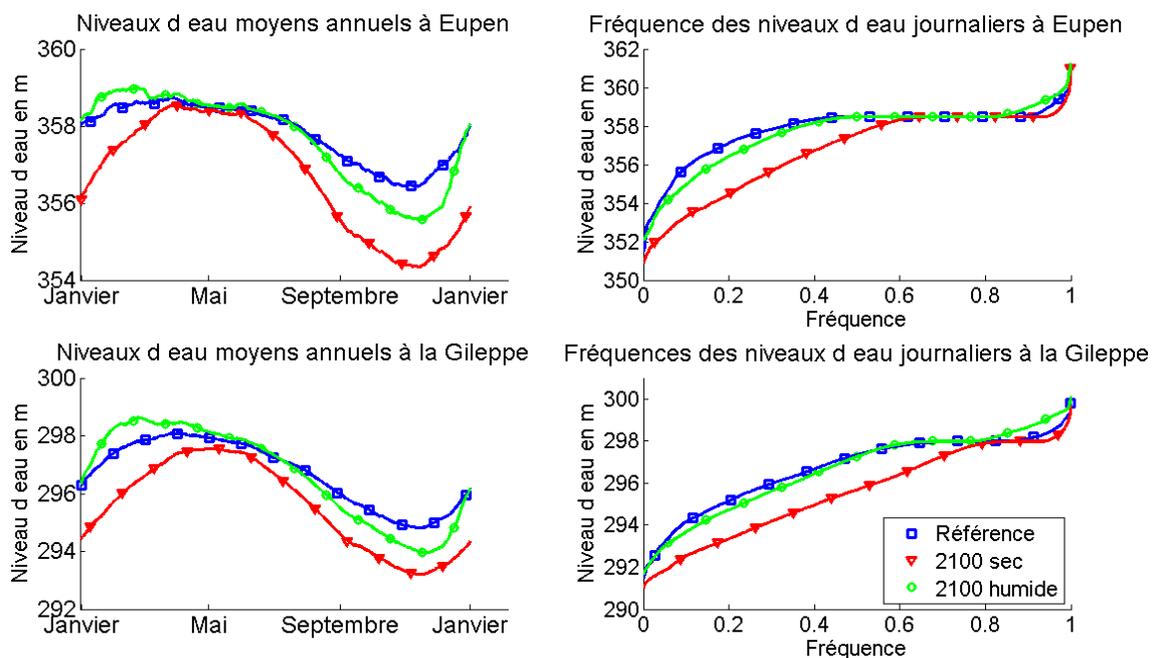


Figure 7-2 : Effets du changement climatique à l'horizon 2070-2100 – Niveaux des lacs

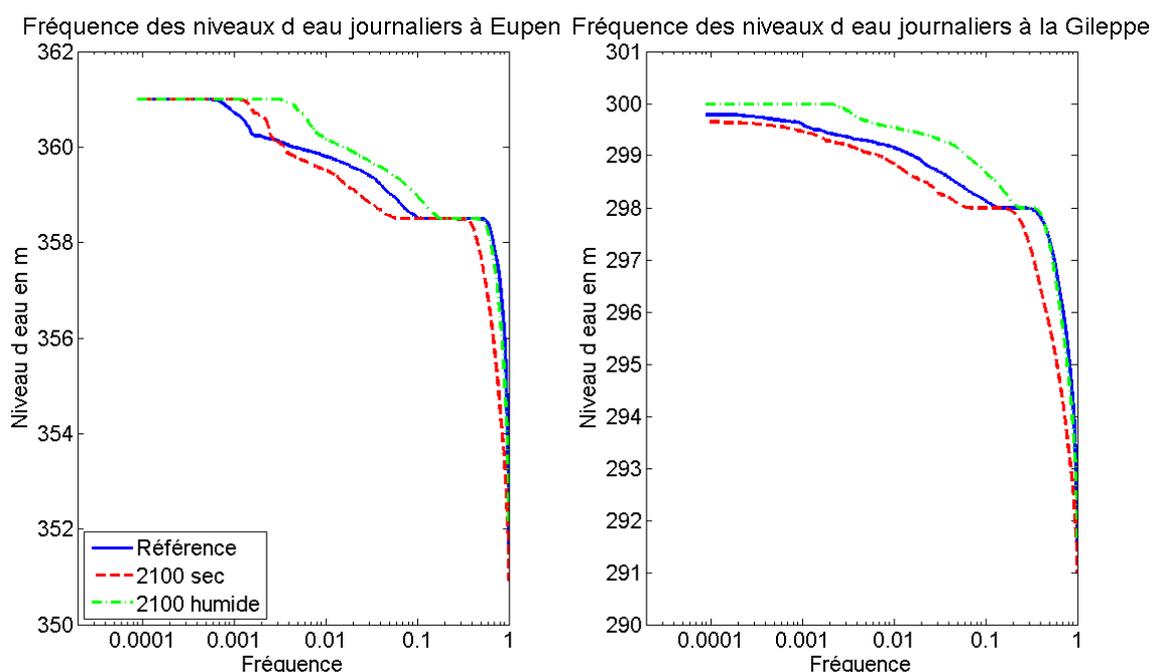


Figure 7-3 : Effets du changement climatique à l'horizon 2070-2100 – Fréquences d'apparition des hauts niveaux des lacs

Unité : m	Réservoir d'Eupen	Réservoir de la Gileppe
Référéce	351,5	291,5
2070-2100 sec	350,9	291
2070-2100 humide	352	291,7

Tableau 7-1 : Effets du changement climatique à l'horizon 2070-2100 – Indicateurs des faibles niveaux des lacs

Ensuite, comme montré à la Figure 9-13 en Annexe, les faibles débits ne varient guère dans le scénario climatique humide. Par contre, dans le scénario sec, les débits caractéristiques d'été diminuent de près de 15%, valeur proche de celle annoncée au chapitre 3.2 (13%).

De plus, l'étendue des changements liés au potentiel de production hydroélectrique est large et s'étend de part et d'autre de la situation initiale. Une réduction de près 35% est calculée pour le scénario sec et un accroissement de près de 15% est simulé pour le scénario humide (Figure 9-14 en Annexe). Ainsi, le changement climatique a un effet beaucoup plus important sur la production hydroélectrique que des modifications de la loi de gestion. Le volume d'eau moyen annuel passant à Chaudfontaine croît de 340 millions de m^3 à 410 millions de m^3 dans le scénario humide (+20%) et diminue à 270 millions de m^3 dans le scénario sec (-20%).

Après, les débits caractéristiques à Chaudfontaine, suivant une courbe de Weibull, sont comparés à la Figure 7-4. Dans le scénario humide, le débit centennal augmente de 32% par

rapport à la situation de référence (Tableau 7-2), conformément aux valeurs annoncées. Les courbes caractéristiques pour Béthane et Verviers sont fournies en Annexe (Figure 9-15 et Figure 9-16).

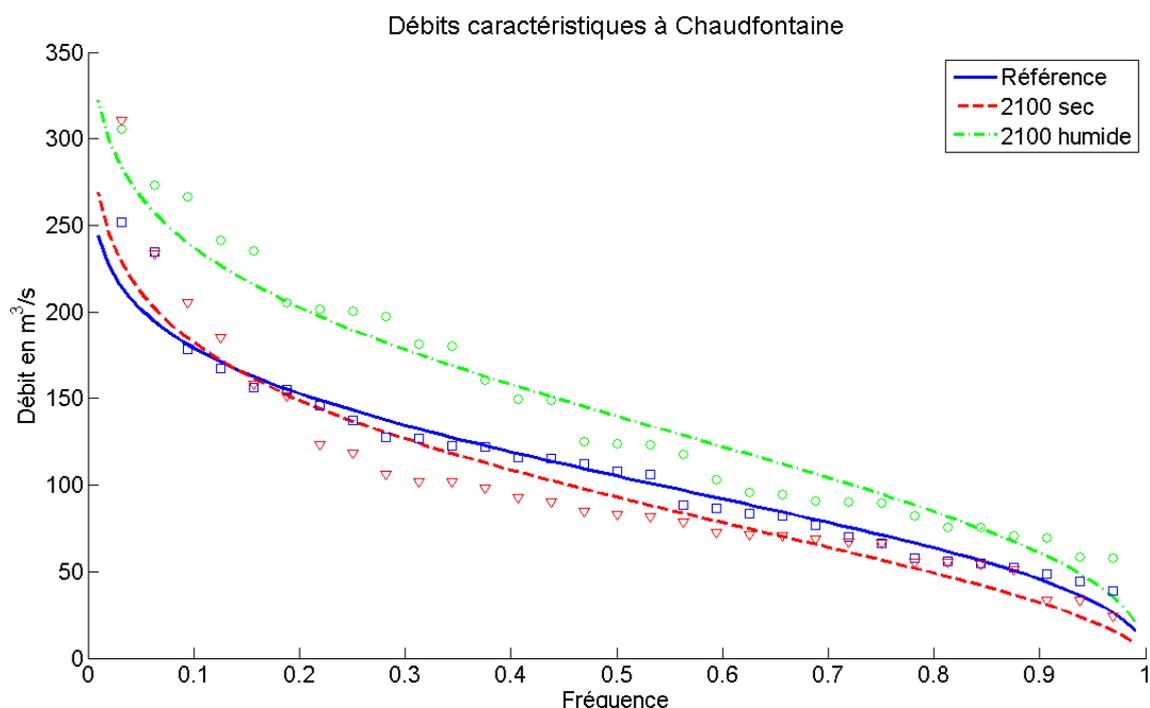


Figure 7-4 : Effets du changement climatique à l'horizon 2070-2100 – Débits caractéristiques à Chaudfontaine suivant une courbe de Weibull

Unité : m^3/s	Référence : 1974-2004	Scénario Sec	Scénario Humide
Béthane	54	59	62
Verviers	111	125	141
Chaudfontaine	244	269	322

Tableau 7-2 : Débits centennaux à l'horizon 2070-2100

A partir des courbes de débits caractéristiques, les courbes de dommages dus aux crues peuvent être construites dans la vallée de la Vesdre. La Figure 7-5 représente les différentes courbes de risques pour la zone de Chaudfontaine. Ainsi, dans le scénario humide, toutes les récurrences des débits augmentent, ce qui n'est pas le cas dans le scénario sec dans lequel seuls les plus hauts débits ont une récurrence supérieure. Ces constatations peuvent être étendues aux zones de Béthane et de Verviers.

Etude de la procédure de gestion avec prise en compte du changement climatique

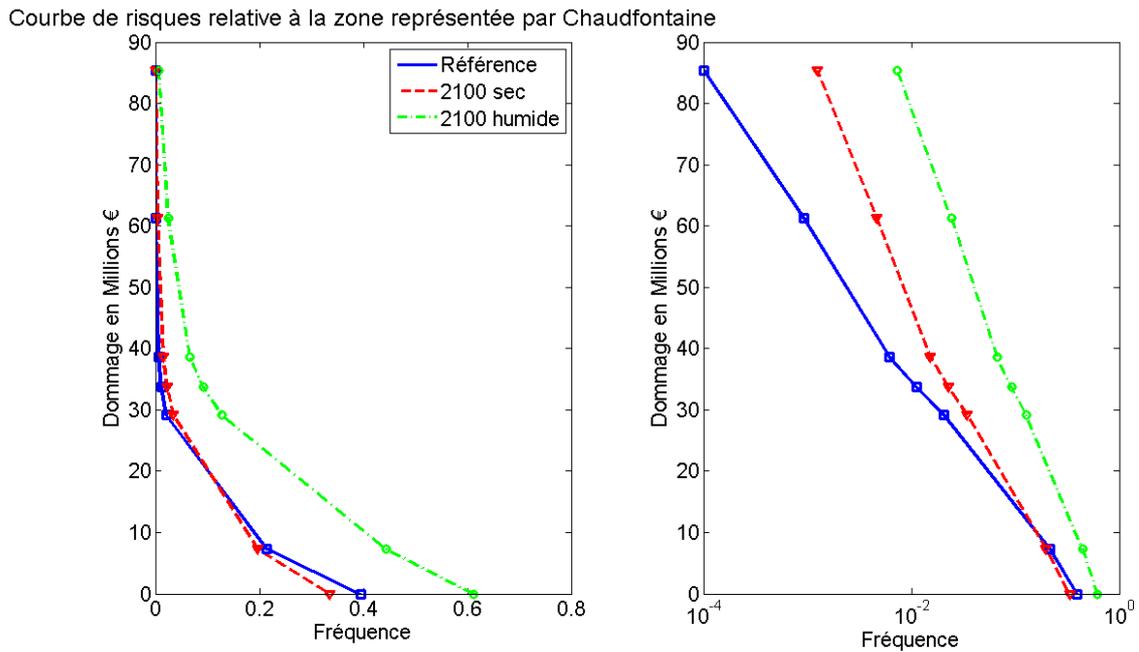


Figure 7-5 : Effets du changement climatique à l'horizon 2070-2100 – Courbes de risques pour la zone de Chaudfontaine

A la Figure 7-6, des augmentations du risque total, comprises entre 8% et 200%, sont attendues à l'horizon 2070-2100, suite aux effets du changement climatique. Les intensités des variations sont fort dispersées mais annoncent, en tout cas, une augmentation du dommage moyen annuel dans la vallée de la Vesdre. Ainsi, dans le scénario sec, malgré la réduction des fréquences des deux débits les plus faibles, à la Figure 7-5, le risque total augmente, suite à l'augmentation des fréquences des débits occasionnant le plus de dommages.

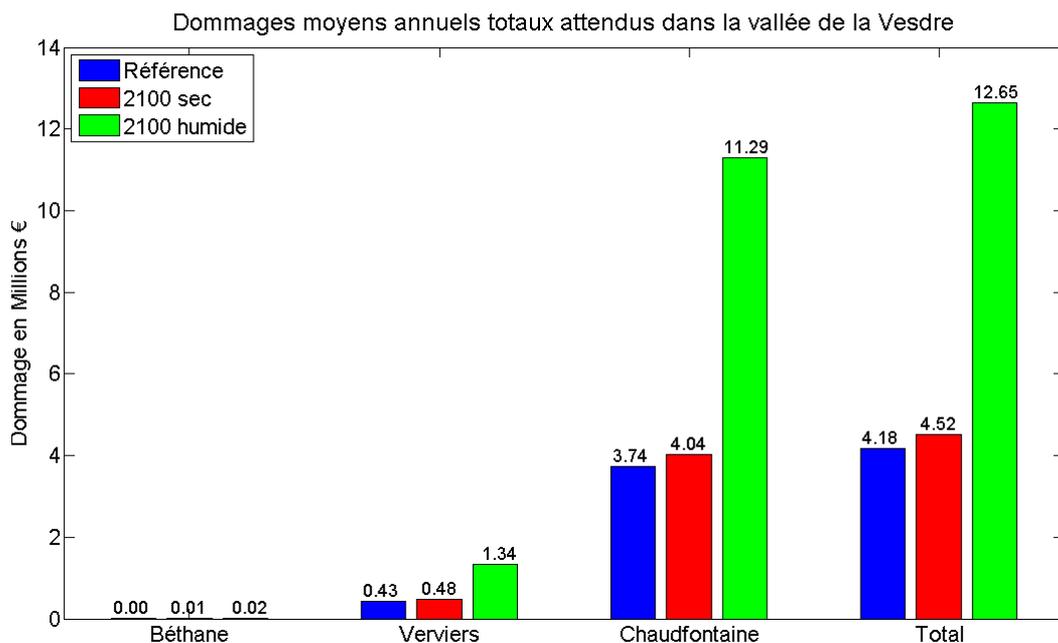


Figure 7-6 : Effets du changement climatique à l'horizon 2070-2100 – Dommages moyens annuels dus aux crues dans la vallée de la Vesdre

Etude de la procédure de gestion avec prise en compte du changement climatique

De même que les dégâts minimaux dans la vallée de la Vesdre furent évalués dans la situation de référence en supposant une réserve infinie, ces dégâts extrêmes sont calculés dans le scénario humide. Les valeurs obtenues sont présentées au Tableau 7-3. Les réductions maximales du risque aux zones de Verviers et de Chaudfontaine valent respectivement 15% et 5%. Ainsi, la capacité de réduction des dégâts induits par les crues est fort limitée, malgré un accès important au niveau maximal de sécurité des retenues. En effet, ce dernier est atteint après le passage du pic de crue, comme illustré à la Figure 7-7, avec des lâchers réalisés au barrage de la Gileppe négligeables. Cette figure est représentative de la gestion d'un grand nombre de crues. Le modèle de gestion des barrages utilisé peut donc être considéré comme performant.

De plus, le dommage moyen annuel total dû aux inondations, obtenu avec le modèle amélioré de gestion, est de 36% inférieur à celui calculé par S. Detrembleur, et al., (2012) avec le modèle initialement disponible. L'amélioration du modèle accomplie au chapitre 5 a donc porté ses fruits !

Dommage en €/an	Béthane	Verviers	Chaudfontaine	Total
Scénario humide	20.000	1.340.000	11.290.000	12.650.000
Situation extrême	10.000	1.140.000	10.690.000	11.850.000

Tableau 7-3 : Réduction maximale des dommages moyens annuels dus aux crues, à l'horizon 2070-2100, dans le scénario humide

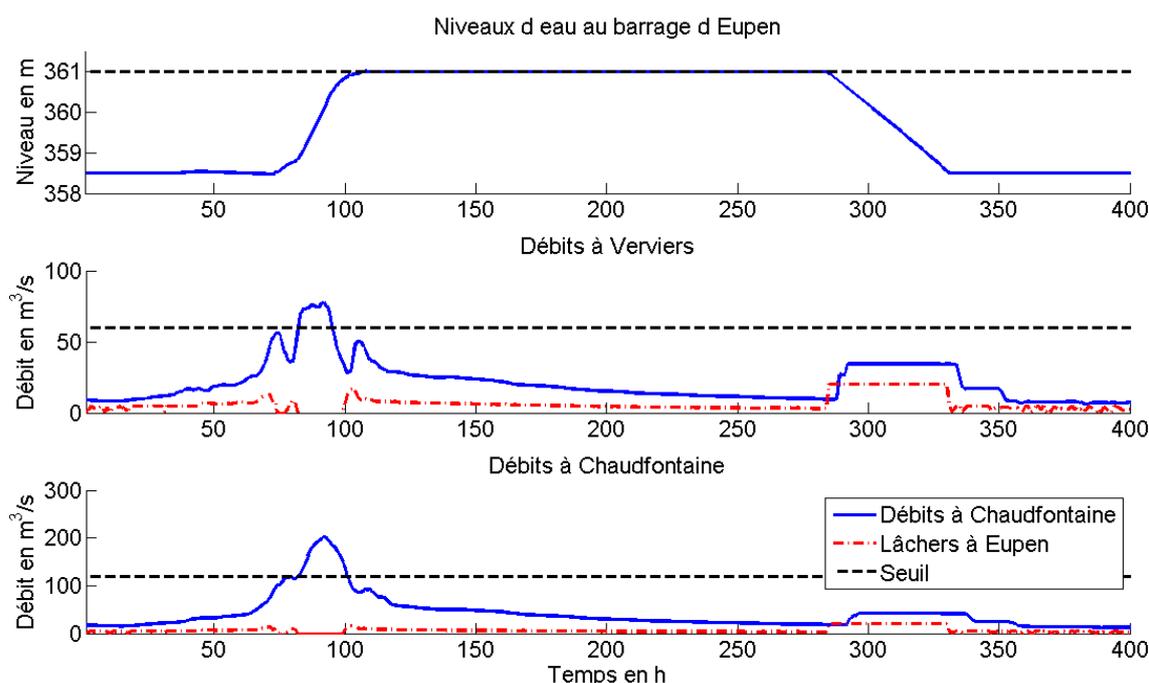


Figure 7-7 : Gestion d'un épisode de crue à l'horizon 2070-2100, scénario humide

En conclusion de l'analyse qui vient d'être menée, les impacts du changement climatique à l'horizon 2070-2100 peuvent être synthétisés en quatre points. Le premier est une réduction générale des niveaux d'eau des réservoirs, en période sèche, et une atteinte plus fréquente des niveaux maximaux de sécurité, en période humide. Le second point est une réduction maximale des faibles débits de l'ordre de 15%. Après, la variation du potentiel de production hydroélectrique est difficile à quantifier mais pourrait être importante, tant en croissance qu'en décroissance. Enfin, les dommages dans la vallée de la Vesdre sont amenés à augmenter de façon plus ou moins importante, quelle que soit la loi de gestion adoptée.

7.2. Effets du changement climatique à l'horizon temporel 2020-2050

A l'horizon temporel 2020-2050, comme le montre le Tableau 7-6, les tendances des variations des indicateurs de performance vont dans le même sens qu'à l'horizon 2070-2100, mais avec une intensité inférieure. De ce tableau, les faibles niveaux des lacs sont peu impactés par le changement climatique, suite à la réduction du turbinage en période sèche, alors que le dommage moyen annuel dû aux crues augmente entre 25% et 130%. Pour ne pas alourdir le rapport avec une discussion des résultats, semblable à celle réalisée au chapitre 7.1, seules les variations des dommages moyens annuels et des débits caractéristiques, éléments les plus sensibles au changement climatique, sont présentées aux Figure 7-4 et Tableau 7-4.

Unité : m^3/s	Référence : 1974-2004	2020-2050 sec	2020-2050 humide
Béthane	54	59	60
Verviers	111	130	138
Chaufontaine	244	277	304

Tableau 7-4 : Débits centennaux à l'horizon 2020-2050

Etude de la procédure de gestion avec prise en compte du changement climatique

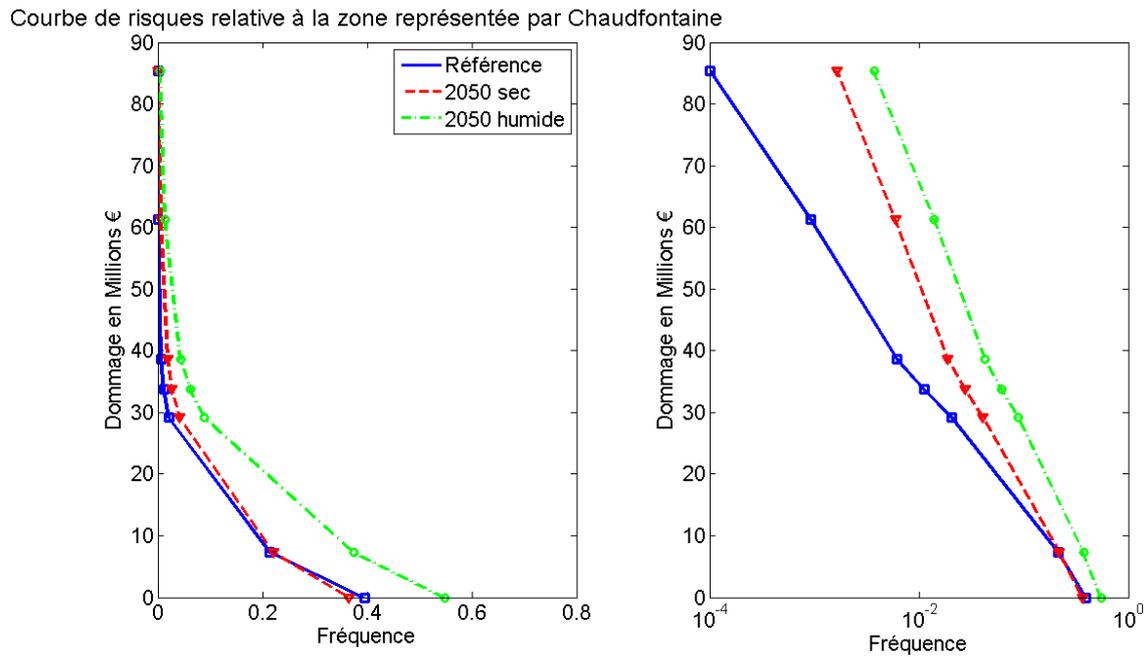


Figure 7-8 : Effets du changement climatique à l'horizon 2020-2050 – Courbes de risques pour la zone de Chaudfontaine

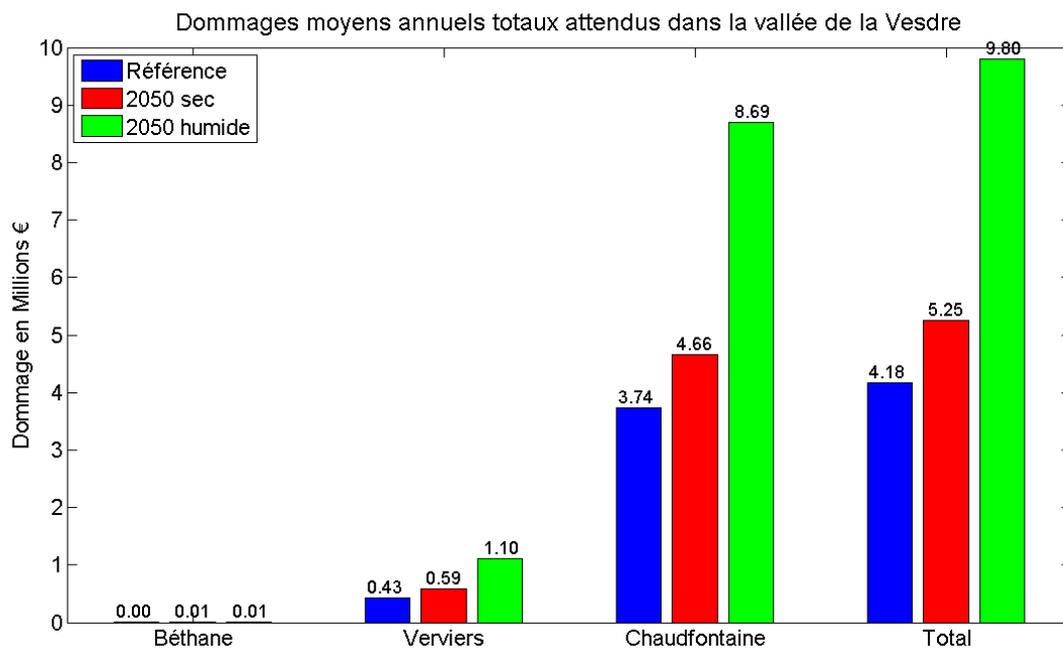


Tableau 7-5 : Effets du changement climatique à l'horizon 2020-2050 – Domages moyens annuels dus aux crues dans la vallée de la Vesdre

	Δy_1^{16}	Δy_2^{16}	Δy_3^{16}	Δy_4^{16}	Δy_5^{16}
Unité	€/an	m	m	kWh/an	m ³ /s
Référence	4.180.000	351,5	291,5	8.600.000	1,65
Scénario sec	5.250.000	351,0	291,4	7.780.000	1,51
Scénario humide	9.800.000	352,0	291,6	9.550.000	1,70

Tableau 7-6 : Variation des indicateurs de performance à l'horizon 2020-2050

7.3. Recherche d'adaptations de la loi de gestion

Il est délicat de proposer des adaptations générales à la loi de gestion actuelle. En effet, les impacts du changement climatique sur les objectifs de gestion des barrages sont fort différents selon que le scénario considéré soit le scénario sec ou le scénario humide. Toutefois, certaines modifications sont communes aux deux scénarios, si non en intensité, du moins en effet. Ainsi, dans ce chapitre, sont considérées deux adaptations pour remédier à la réduction des faibles débits, d'une part, et une adaptation pour adoucir au mieux l'augmentation des dégâts dus aux crues, d'autre part. Les deux premières adaptations sont appliquées au scénario sec à l'horizon 2070-2100, le plus défavorable pour les faibles quantités d'eau, et la troisième adaptation concerne le scénario humide pour la même période, le plus défavorable pour les hauts débits. Ces adaptations sont choisies par rapport à l'analyse de sensibilité réalisée au chapitre 6.3.

Afin d'accroître les faibles débits dans la Vesdre, les débits de by-pass des réservoirs sont augmentés pour contrebalancer le déficit des apports hydrologiques. Egalement, les amplitudes des consignes sont réduites afin de limiter les conséquences de l'élévation des débits de by-pass sur les niveaux des lacs. Remarquons cependant que les plus faibles niveaux des lacs obtenus (respectivement près de 351 mètres et 291 mètres) restent largement supérieurs aux cotes des prises d'eau (respectivement 324 mètres et 260 mètres). Pour cela, une augmentation des faibles débits dans la Vesdre par un débit de by-pass plus important pourrait se faire, à l'avenir, sans compensation sur les faibles niveaux d'eau des retenues, à condition toutefois que la production d'eau potable ne varie pas dans le temps et en gardant à l'esprit la surévaluation des débits en saison sèche par le modèle hydrologique. L'augmentation du débit de by-pass est plus conséquente au réservoir d'Eupen dont le bassin versant vaut près du double de celui propre au barrage de la Gileppe.

Pour limiter l'impact de l'augmentation des hauts débits, des réductions des niveaux normaux des consignes aux réservoirs d'Eupen et de la Gileppe de respectivement 2 mètres et 1 mètre sont envisagées, en plus d'une réduction des débits seuils à l'aval des barrages.

Le Tableau 7-7 reprend les différentes adaptations simulées.

Adaptation	Unité	A	B	C
Scénario	-	sec	sec	humide
Amplitude Eupen	<i>m</i>	/	2	/
Amplitude Gileppe	<i>m</i>	/	2	/
Débit de by-pass Eupen	m^3/s	0,20	0,20	/
Débit de by-pass Gileppe	m^3/s	0,10	0,10	/
Niveau normal Eupen	<i>m</i>	/	/	356.5
Niveau normal Gileppe	<i>m</i>	/	/	297
Débit seuil Pepinster	m^3/s	/	/	35
Débit seuil Béthane	m^3/s	/	/	80,5

Tableau 7-7 : Adaptation de la loi de gestion actuelle

7.3.1. Adaptations relatives au scénario sec (Adaptations A et B)

Comme attendu, les impacts des adaptations A et B sur le dommage moyen annuel total dû aux crues (< 1%) et sur le potentiel de production hydroélectrique ($\approx 1\%$) sont négligeables.

Le Tableau 7-8 synthétise les effets de ces adaptations sur les débits d'étiage de la Vesdre. Le DCE_{min} et le $MAM7_{min}$ sont augmentés de l'accroissement du débit de by-pass ($0,22 m^3/s$). Par contre, les DCE_{moyen} et $MAM7_{moyen}$ s'accroissent légèrement pour l'adaptation A et décroissent pour l'adaptation B. En fait, le turbinage normal influence l'évaluation de ces valeurs et la réduction du turbinage normal dans l'adaptation B explique ainsi la réduction de celles-ci.

Unité : m^3/s	DCE_{min}	DCE_{moyen}	$MAM7_{min}$	$MAM7_{max}$
Référence	0,83	1,65	0,83	1,59
2070-2100 sec	0,79	1,38	0,76	1,31
Adaptation A	1,01	1,43	0,98	1,35
Adaptation B	1,01	1,21	0,98	1,18

Tableau 7-8 : Effets des adaptations A et B sur les faibles débits à l'horizon 2070-2100 en scénario sec

Enfin, les faibles niveaux des lacs sont fortement réduits suite à l'adaptation A, surtout au lac d'Eupen, principalement à cause de la reconduction d'années sèches en 1995 et 1996. Le Tableau 7-9 montre également la compensation obtenue par la réduction de l'amplitude de la consigne dans l'adaptation B. Remarquons cependant que les plus faibles niveaux des lacs restent bien supérieurs aux cotes des prises d'eau.

Unité : m	Eupen	La Gileppe
Référence	351,5	291,5
2070-2100 : scénario sec	350,9	291
Adaptation A	340,9	288,0
Adaptation B	342,8	289,2

Tableau 7-9 : Effets des adaptations A et B sur les faibles niveaux des lacs à l'horizon 2070-2100 en scénario sec

L'étude des adaptations A et B a montré que l'augmentation des débits de by-pass, bien que permettant un accroissement des DCE_{min} et $MAM7_{min}$, a peu d'effets sur les DCE_{moyen} et $MAM7_{moyen}$. De plus, l'impact de cette augmentation des débits de base sur les faibles niveaux des lacs est grand puisque le volume d'eau quittant le lac, lorsque le niveau de celui-ci est inférieur au niveau de la consigne, est augmenté de $14.000 m^3$ par jour, au barrage d'Eupen.

Il conviendrait, de façon à rendre plus efficace la lutte contre les débits d'étiage de la Vesdre, d'utiliser un test sur les faibles débits de celle-ci, pour déterminer si un soutien au débit de la Vesdre est nécessaire et, dans le cas contraire, d'annuler, ou en tout cas de réduire, le débit de base des réservoirs.

7.3.2. Adaptation relative au scénario humide (Adaptation C)

L'adaptation C, destinée à limiter les dommages causés par les inondations, ne permet qu'une réduction du risque total de 300.000 euros (2% de réduction). Par contre, les plus faibles niveaux des lacs d'Eupen et de la Gileppe sont réduits respectivement de 2,3 mètres et de 1,1 mètre. Ces dernières valeurs sont semblables à celles prédites par l'analyse de sensibilité du chapitre 6.1.3.

Ainsi, l'amélioration de la gestion, en termes de dégâts dus aux crues, est limitée par une loi de gestion initiale déjà performante et par le décalage temporel entre les décisions prises aux barrages et leurs conséquences à l'aval.

8. Conclusions et perspectives

8.1. Conclusions

Les acquis principaux de ce travail de fin d'étude sont triples. Premièrement, une analyse en profondeur de la loi de gestion des barrages d'Eupen et de la Gileppe a abouti à l'amélioration du modèle de gestion initialement disponible, afin d'accroître la concordance entre le modèle et la réalité. Deuxièmement, une analyse détaillée de l'influence de seize paramètres, couvrant l'entièreté de la loi de gestion, a mis en lumière l'incidence de chacun de ces paramètres sur les objectifs de gestion des réservoirs. Troisièmement, la prise en compte du changement climatique, annoncé dans les années à venir, sur la gestion efficace des barrages, a montré les effets probables attendus et a conduit à des recherches d'adaptations de la loi de gestion actuelle pour faire face aux effets néfastes obtenus.

Les retenues d'eau étudiées sont les barrages d'Eupen (ou de la Vesdre) et de la Gileppe. Celles-ci alimentent la rivière Vesdre qui se jette elle-même dans l'Ourthe, peu avant sa confluence avec la Meuse. La Hoëgne, rivière non régulée, se jette dans la Vesdre vers la mi-distance entre les barrages et la confluence avec l'Ourthe. Préalablement à la réalisation de ce travail, un modèle intégré de la Vesdre était disponible, permettant de simuler les débits dans ce cours d'eau et les niveaux d'eau des réservoirs, à partir de données climatiques sur le bassin versant. Des discussions avec les acteurs de la gestion des barrages ont indiqué que celle-ci était peu automatique mais découlait principalement du jugement apporté par ces acteurs sur la situation en cours. Pour cela, le modèle de gestion créé ne peut prétendre reproduire exactement la gestion des barrages. Cependant, la gestion réelle est balisée par une note de manutention présentant les lignes directrices à suivre et, le modèle étant basé sur cette note, on peut considérer que sa représentation de la gestion réelle est acceptable.

Afin de pouvoir étudier les effets du changement climatique et des influences des paramètres de gestion des ouvrages, des indicateurs de performance originaux sont définis de manière à être représentatifs des divers objectifs de gestion. Ainsi, le dommage moyen annuel total dû aux crues, ou risque total d'inondations, les plus faibles niveaux de chaque réservoir, le potentiel de production hydroélectrique annuel moyen et le débit caractéristique d'étiage à Verviers sont proposés comme indicateurs de performance de la gestion des barrages.

Un premier aspect de ce travail est d'apporter des modifications au modèle de gestion initiale des réservoirs, afin d'approcher au mieux la gestion réalisée en pratique. A ce niveau, la

prévision du volume susceptible d'entrer au barrage, réalisée à l'aide de mesures pluviométriques et d'une conversion neige/pluie, est artificiellement remplacée par une prévision parfaite des apports sur une fenêtre temporelle arbitraire de 48h. De plus, la gestion indépendante des ouvrages est montrée plus efficace que leurs gestions combinées. Les modifications réalisées ont prouvé leurs utilités puisque le risque total, calculé entre 1974 et 2004, a chuté de près de 20% par rapport à la simulation initiale.

La comparaison des valeurs fournies par le modèle de gestion amélioré avec les mesures faites ces dernières années indique une représentation correcte des hauts débits de la Vesdre. En effet, les débits caractéristiques, calculés avec la loi de Weibull, ne diffèrent que de l'ordre de 5%, selon l'utilisation des débits simulés ou mesurés. Egalement, le potentiel de production hydraulique est vraisemblablement bien estimé, suite à une bonne concordance entre les apports hydriques annuels aux réservoirs, qu'ils soient simulés ou mesurés. Par contre, le modèle hydrologique utilisé n'a pas été développé dans un objectif de bonne reproduction des faibles débits. Ceci se ressent dans les bas niveaux d'eau des réservoirs, fortement surestimés, et dans les faibles débits de la Vesdre, également surestimés. La surestimation des faibles débits a pour conséquence que l'utilité des barrages pour soutenir les débits d'étiage est peu mise en évidence. Suite à ces observations, les conclusions tirées dans ce travail concernant les débits élevés, les conséquences de ceux-ci sur les dommages dus aux inondations de la Vesdre, et la production hydroélectrique peuvent être franchement généralisées à la gestion réelle des ouvrages. Par contre, celles relatives aux faibles débits de la Vesdre et aux faibles niveaux d'eau des réservoirs doivent être transférées à l'existant avec plus de précaution.

La majorité des dégâts consécutifs aux crues (près de 90%) apparaissent dans la région de Chaudfontaine, après la confluence avec la Hoëgne. Suite à cela, une étude du potentiel de réduction des dommages dus aux crues a mis en évidence qu'une part importante du risque total actuel (88%) est indépendante de la gestion des barrages. Par contre, pour les zones de Béthane et de Verviers, en amont de la confluence avec la Hoëgne, les dommages pourraient être réduits respectivement de 100% et de 33%. De plus, l'efficacité de la gestion actuelle des barrages a été jugée comme bonne puisque permettant une réduction de 94% des dégâts moyens annuels totaux pouvant être évités.

Une fois la modélisation de la loi de gestion amenée au plus près de la gestion réelle, compte tenu des données disponibles et de la complexité du modèle, une analyse détaillée de seize paramètres de cette loi est réalisée sur une période allant de 1974 à 2004.

Le premier enseignement de cette analyse de sensibilité concerne la mise en évidence des paramètres les plus influents sur les indicateurs de performance définis. Ainsi, le volume d'eau prélevé aux réservoirs pour la production d'eau potable est le paramètre le plus influent sur la totalité des indicateurs. Son principal effet est d'abaisser fortement les niveaux des lacs, particulièrement au lac de la Gileppe, entraînant comme effet secondaire une réduction des dommages à l'aval. D'ailleurs, si la demande en eau potable venait à augmenter, il serait préférable de répercuter le prélèvement supplémentaire en eau au réservoir d'Eupen plutôt qu'à celui de la Gileppe. De plus, l'évolution de la consommation dans les années à venir a un effet plus important sur les niveaux des lacs que les perturbations des précipitations et des températures occasionnées par le changement climatique. Ensuite, la forme de la consigne, déterminée par son niveau normal et par son amplitude, influence la majorité des indicateurs. Une découverte intéressante est que la réduction de l'amplitude des consignes à 2 mètres augmente le niveau minimal des lacs sans accroître les dommages dans la vallée de la Vesdre. Après, le potentiel de réduction des dommages dus aux crues est faible, malgré des dommages assez importants, ce qui montre une bonne gestion actuelle des ouvrages de rétention d'eau. Dans la situation actuelle, les résultats des simulations ont toutefois montré qu'une réduction des débits de référence à l'aval permettrait une réduction des dommages occasionnés en période de crue. Enfin, la capacité d'amélioration du potentiel de production hydroélectrique est faible, de l'ordre de quelques pourcents, suite aux effets antagonistes d'une réduction des lâchers non turbinés sur la chute, et inversement. Ce potentiel de production est par contre fortement influencé par le volume d'eau prélevé aux lacs pour la potabilisation de l'eau.

Une application des enseignements tirés de l'analyse de sensibilité à la gestion réelle des ouvrages est désormais abordée. Premièrement, la gestion réelle des ouvrages utilise une amplitude de consigne importante (de 7 mètres à 8 mètres). Or, l'étude a montré que cette amplitude pouvait être diminuée à 2 mètres sans porter préjudices aux risques d'inondations à l'aval et à la production hydroélectrique. Ainsi, les diminutions des amplitudes des consignes peuvent alors être utilisées pour un soutien plus efficace des faibles débits, en période sèche, et constitue, en tout cas, un potentiel de production d'eau potable plus important. Deuxièmement, en termes de dégâts produits par les inondations, l'analyse a mené à la constatation que les débits d'alerte et les débits seuils pourraient être diminués dans le but de réduire légèrement les dommages consécutifs à une crue. Troisièmement, concernant l'étude des débits d'étiage, la limitation du turbinage induite par la réduction de l'amplitude préconisée pourrait être efficacement couplée avec un test sur les faibles débits pour déterminer si des lâchers doivent ou non être effectués pour soutenir ces faibles débits.

Par rapport à ce qu'il vient d'être dit au chapitre précédent, une limitation forte de l'étude réalisée est qu'elle n'a considéré des modifications que sur un seul paramètre à la fois. Ce qui rend délicat une quantification de changements effectués sur plusieurs paramètres.

Ensuite, des simulations utilisant des projections climatiques aux horizons temporels 2020-2070 et 2070-2100 ont montré que les effets du changement climatique sont encore fort incertains, bien que certaines tendances soient soulignées. Il ressort en effet, de l'analyse menée, que les saisons sèche et humide seront vraisemblablement plus marquées à l'avenir. Ainsi, en saison sèche, les niveaux des lacs seront globalement plus faibles et les débits d'étiage auront une intensité moindre. A l'opposé, en saison humide, des crues plus virulentes apparaîtront, susceptibles de produire plus de dégâts dans la vallée de la Vesdre. Cependant, les effets sur les faibles niveaux d'eau des réservoirs sont réduits par une gestion efficace, permettant une diminution du volume turbiné lorsque les niveaux des lacs sont bas. Les faibles niveaux des lacs sont majoritairement influencés par la production d'eau potable alors que les débits de crue sont principalement impactés par le changement climatique. Le potentiel de production hydroélectrique est influencé considérablement par ces deux éléments.

De plus, la compensation de la réduction de l'intensité des débits d'étiage, en période sèche, pour l'horizon 2070-2100, par un accroissement des débits de by-pass des réservoirs va avec une réduction importante des faibles niveaux des lacs. Dans le cas où cette réduction n'est pas compatible avec la production d'eau potable, une modification de la loi, limitant l'utilisation des débits de base aux périodes de pénuries d'eau, pourrait être envisagée.

Enfin, la loi de gestion actuelle des réservoirs est efficace du point de vue de la gestion des crues aux horizons temporels futurs. En effet, concernant le risque total d'inondations, l'écart entre une gestion parfaite et la gestion actuelle est faible et peut difficilement être comblé, car dépendant essentiellement du décalage temporel entre les décisions prises au niveau des réservoirs et les conséquences de celles-ci à l'aval. Une réduction des débits seuils utilisés dans la loi de gestion permet toutefois de réduire cet écart.

Pour terminer sur une phrase synthétique, disons qu'une amélioration de la loi de gestion actuelle peut être envisagée pour augmenter le potentiel de prélèvement d'eau potable et le soutien aux débits d'étiage, alors que cette gestion actuelle est efficace concernant la gestion des débits de crues à l'aval et la production d'énergie hydroélectrique.

8.2. Perspectives

D'abord, il serait intéressant de présenter la loi de gestion modélisée, dans sa version finale, au gestionnaire des barrages, ainsi que l'analyse de sensibilité des paramètres qui la constituent et que les conclusions qui en sont tirées. En effet, la plus belle récompense de ce travail serait son utilisation pour la réalisation d'éventuels changements de cette loi, tant dans une perspective d'adaptation aux changements climatiques en cours que d'optimisation de la gestion actuelle des réservoirs.

Après, le réalisme de la représentation des faibles débits dans la Vesdre pourrait être renforcé en utilisant un modèle d'écoulements souterrains plus développé. Cette amélioration du modèle permettrait une étude des faibles niveaux d'eau dans les réservoirs plus proches de la réalité. De plus, elle permettrait de prendre en compte, à leurs justes valeurs, les nécessités des barrages pour le soutien des faibles débits. Egalement, le réalisme du modèle de gestion des ouvrages devraient encore s'accroître en tenant compte de l'historique des lâchers effectués en période de crue. Ainsi, les lâchers réalisés à un pas de temps donné tiendraient compte de ceux réalisés aux pas de temps précédents.

De plus, une étude de la robustesse du modèle de gestion simulé permettrait de déterminer l'impact de certaines imprécisions, inévitablement rencontrées en pratique, dans les mesures des débits de la Vesdre, des apports à venir aux barrages, etc. Egalement, l'analyse de sensibilité pourrait être utilisée pour déterminer une priorité quant à l'amélioration de ces mesures réalisées sur le terrain. Pour illustrer ce qui vient d'être dit, ce travail a montré l'impact significatif des débits seuils à Pepinster et à Bellevaux sur les dommages dus aux crues.

Ensuite, dans ce travail, la projection dans une situation future n'a impacté que les apports hydriques du bassin versant de la Vesdre, perturbés par un modèle climatique tenant compte du changement climatique. Cependant, il va de soi que de nombreux autres facteurs sont variables temporellement et, en particulier, deux mériteraient une attention particulière et une étude complémentaire. Le premier est la demande en eau qui est supposée constante dans ce rapport aux horizons temporels futurs. Or, l'augmentation des périodes sèches, à l'avenir, ira certainement avec un accroissement de la demande en eau. De plus, l'analyse de sensibilité a montré une dépendance importante des indicateurs de performance au volume prélevé pour la consommation en eau potable. Un second facteur négligé dans ce travail est la prise en compte de l'évolution de l'urbanisation sur les dommages futurs dus aux crues. Un travail réalisé dans une portion de la vallée de la Meuse, en Région Wallonne, par A. Beckers (2011), a mis en évidence que la contribution du changement climatique aux dommages d'inondations

supplémentaires à l'horizon 2100 est supérieure à celle de l'évolution de l'urbanisation. Les études de te Linde, et al., (2011), dans la vallée du Rhin, évaluent à 1/8 l'importance de l'urbanisation sur les dégâts supplémentaires dus aux crues, à l'horizon 2030, par rapport au changement climatique. Par contre, Bouwers, et al., (2010) ont trouvé des importances proches de la moitié pour les deux facteurs, dans les polders néerlandais, à l'horizon 2040.

Enfin, l'étude réalisée a montré que, malgré une gestion efficace des réservoirs, les dégâts dus aux crues restent importants. Une nouvelle étude, portant à présent sur la réduction du dommage causé par les débits de crue, et non plus sur la réduction de la fréquence de récurrence de ces débits, pourrait idéalement compléter cette première étude.

9. Annexes

9.1. Informations techniques sur les barrages

CARACTERISTIQUES TECHNIQUES		
CARACTERISTIQUES	BARRAGE INITIAL	BARRAGE SURHAUSSE
1. type de barrage	poids en maçonnerie de moellons et mortier de chaux	poids en enrochement dont le noyau central est constitué par le barrage initial surélevé
2. buts	distribution d'eau potable et industrielle, protection contre les crues	distribution d'eau potable et industrielle, protection contre les crues
3. cours d'eau	la Gileppe	la Gileppe
4. province	Liège	Liège
5. année d'achèvement	1876	1971
6. bassin versant	3.430 ha + 1.970 ha (Soor)	3.430 ha + 1.970 ha (Soor)
7. pluviosité moyenne	1.263 mm/an	1.263 mm/an
8. cote de la rivière	244 m	244 m
9. cote du lac - max.	288 m	300 m
10. cote de la crête	288,76 m	305 m
11. hauteur maximale au-dessus des fondations	51,76 m	68 m
12. volume du barrage	260.000 m ³	1.433.000 m ³
13. longueur en crête	235 m	365 m
14. rayon de courbure	510 m	510 m
15. superficie du plan d'eau	85,70 ha	130 ha
16. capacité du lac	13,3 hm ³	26,4 hm ³
17. évacuateur de crues	2 déversoirs à seuil fixe (+ ventelles)	1 déversoir à 2 pertuis - (8 m × 4 m) et vannes wagon descendantes
18. débit max.	-	185 m ³ /s
19. vidange	4 conduites D : 850 mm	2 conduites D : 2200/1800 mm
20. débit max.	-	89 m ³ /s
21. équipement hydro-électrique	-	2 turbines type Francis à axe horizontal
puissance totale apparente	néant	950 kVA
débit maximum		1,805 m ³ /s

Figure 9-1 : Informations techniques concernant le barrage de la Gileppe (Ministère des Travaux publics, 1986)

CARACTERISTIQUES TECHNIQUES	
1. type de barrage	pois en béton
2. buts	distribution d'eau potable et industrielle, protection contre les crues
3. cours d'eau	la Vesdre
4. province	Liège
5. année d'achèvement	1949
6. bassin versant	6.920 ha + 3.675 ha (la Helle)
7. pluviosité moyenne	1.269 mm/an
8. cote de la rivière	304 m
9. cote du lac - max.	361 m
10. cote de la crête	362 m
11. hauteur maximale au-dessus des fondations	66 m
12. volume du barrage	450.000 m ³
13. longueur en crête	410 m
14. rayon de courbure	375 m
15. superficie du plan d'eau	126 ha
16. capacité du lac	25 hm ³
17. évacuateur de crues	1 déversoir à 2 pertuis (12,5 m × 3 m) et vannes wagon descendantes
18. débit max.	230 m ³ /s
19. vidange	2 conduites D : 1.800/1.500 mm
20. débit max.	70 m ³ /s
21. équipement hydro-électrique	4 turbines type Francis à axe horizontal
puissance totale apparente	2.538 kVA
débit maximum	4,5 m ³ /s

Figure 9-2 : Informations techniques concernant le barrage d'Eupen (Ministère des Travaux publics, 1986)

9.2. Influence d'autres modifications dans les modes de gestion d'alerte et de gestion normale

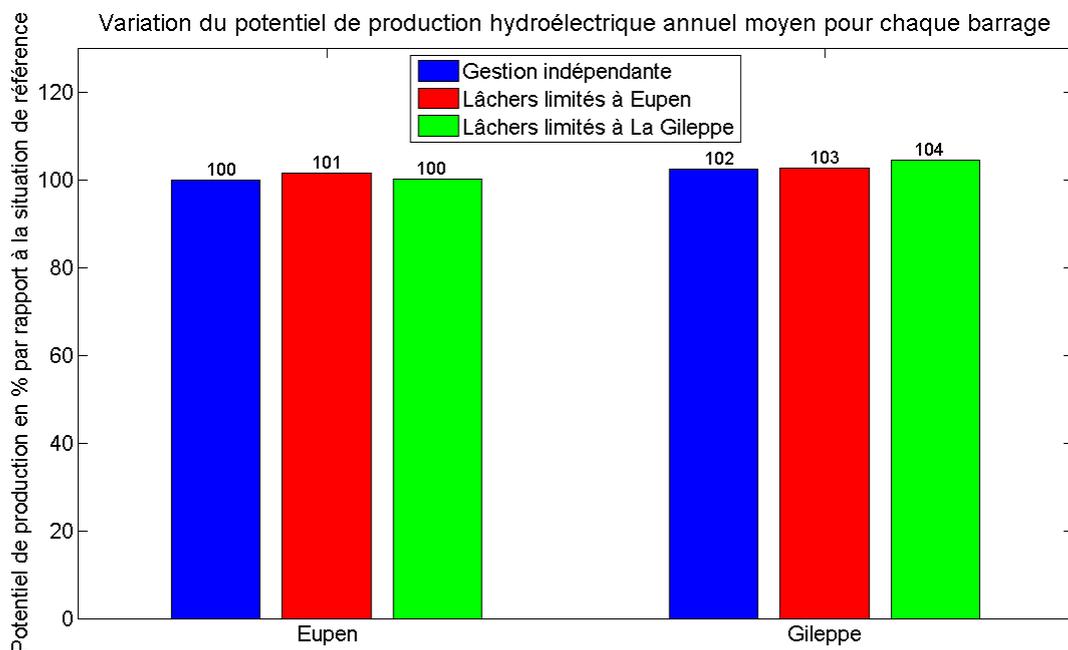


Figure 9-3 : Influence des modifications dans les modes de gestion d'alerte et de gestion normale – Potentiel de production hydroélectrique

9.3. Influence de la durée du turbinage normal

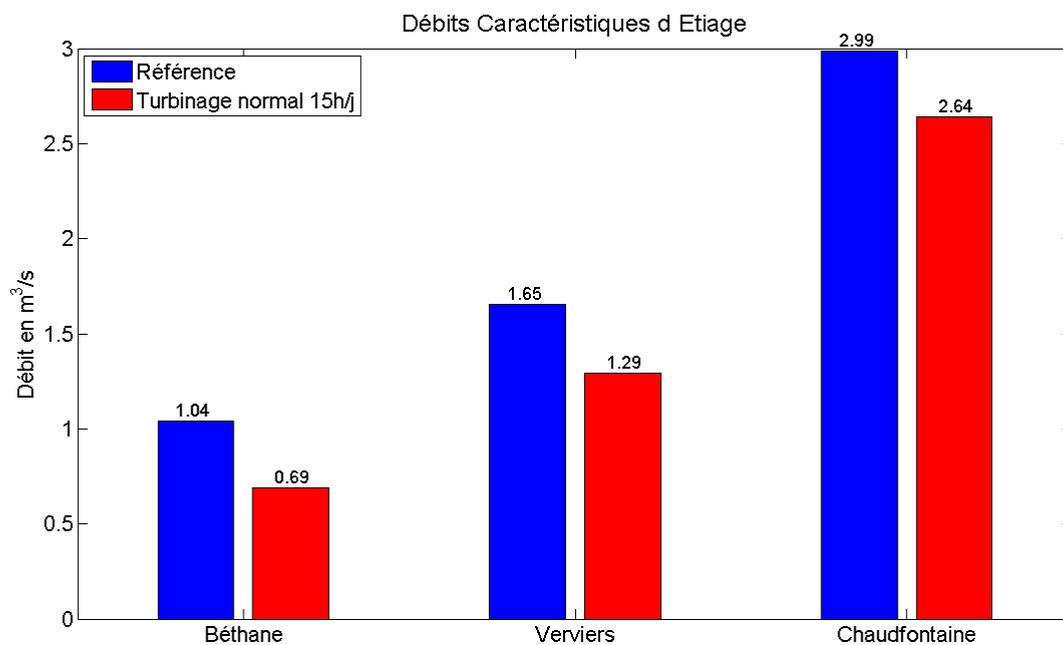


Figure 9-4 : Influence de la durée du turbinage normal –DCE

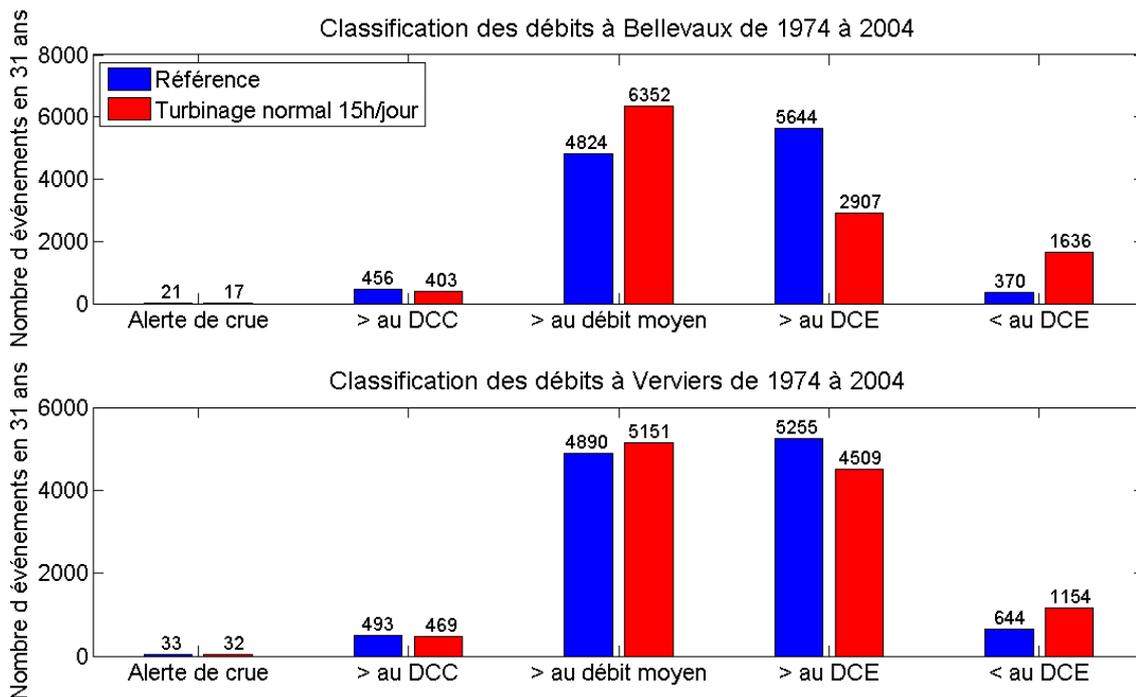


Figure 9-5 : Influence de la durée du turbinage normal – Classification des débits par rapport à des débits cibles

9.4. Influence du volume prélevé pour la production d'eau potable

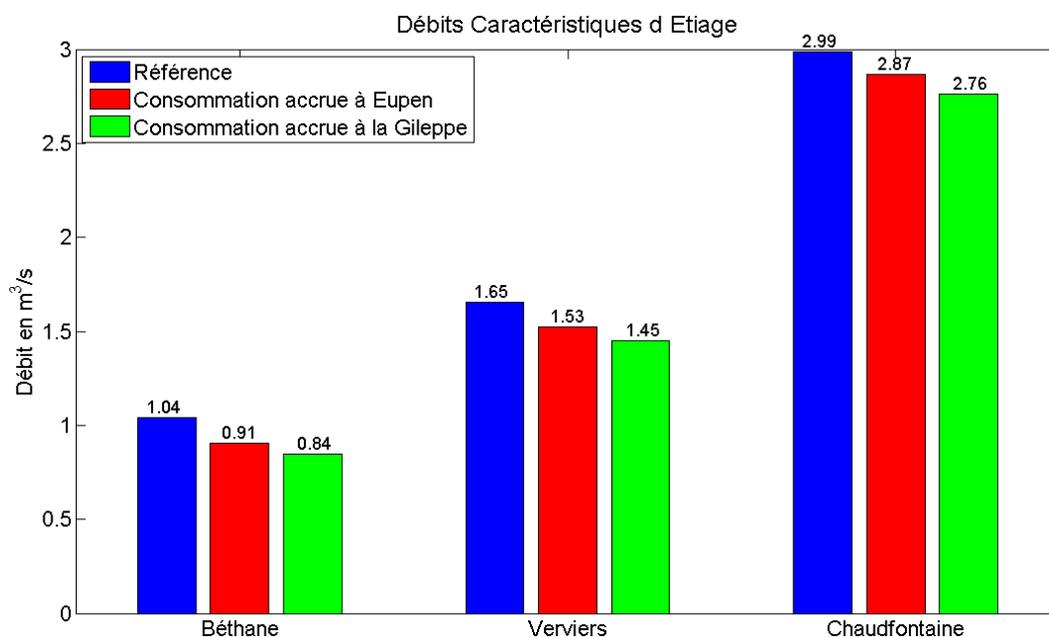


Figure 9-6 : Influence du volume prélevé pour la production d'eau potable – DCE

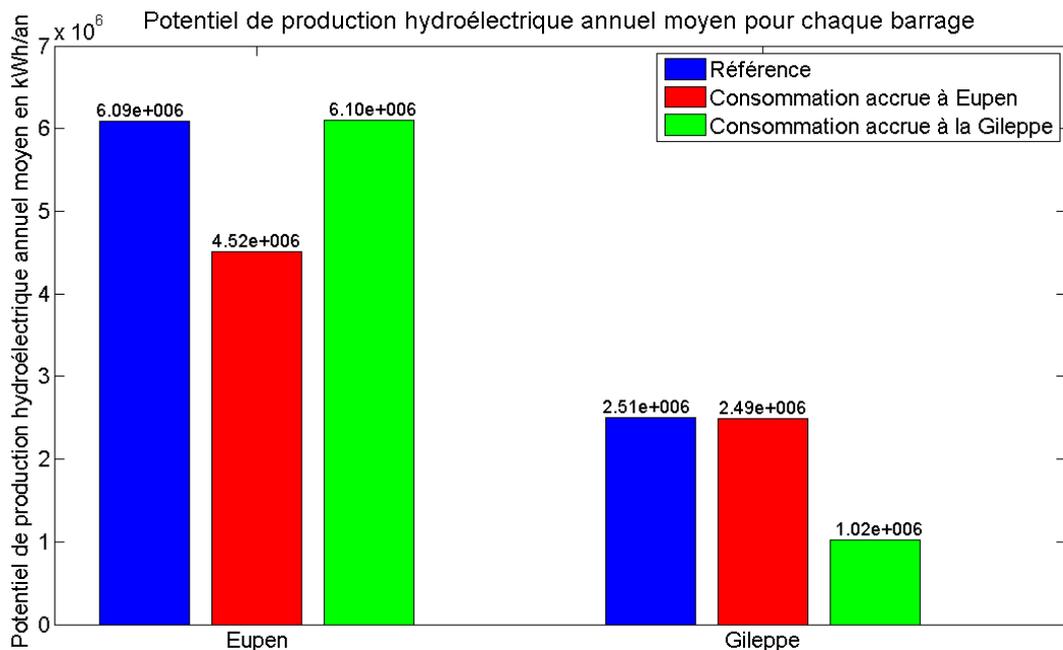


Figure 9-7 : Influence du volume prélevé pour la production d'eau potable – Potentiel de production hydroélectrique

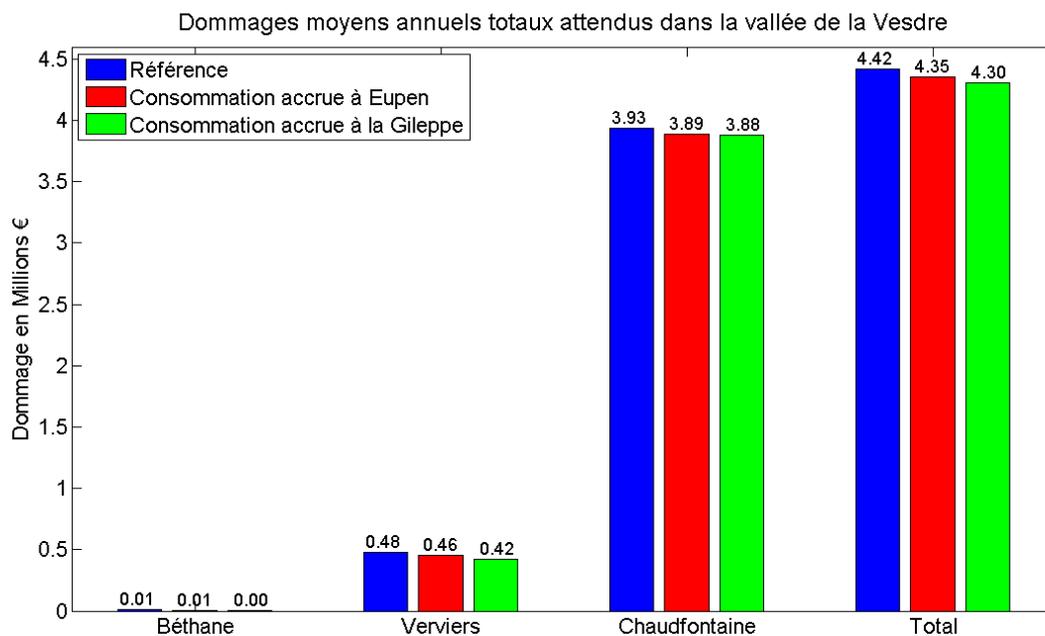


Figure 9-8 : Influence du volume prélevé pour la production d'eau potable – Dommages moyens annuels dus aux crues dans la vallée de la Vesdre

9.5. Influence des débits de by-pass des réservoirs

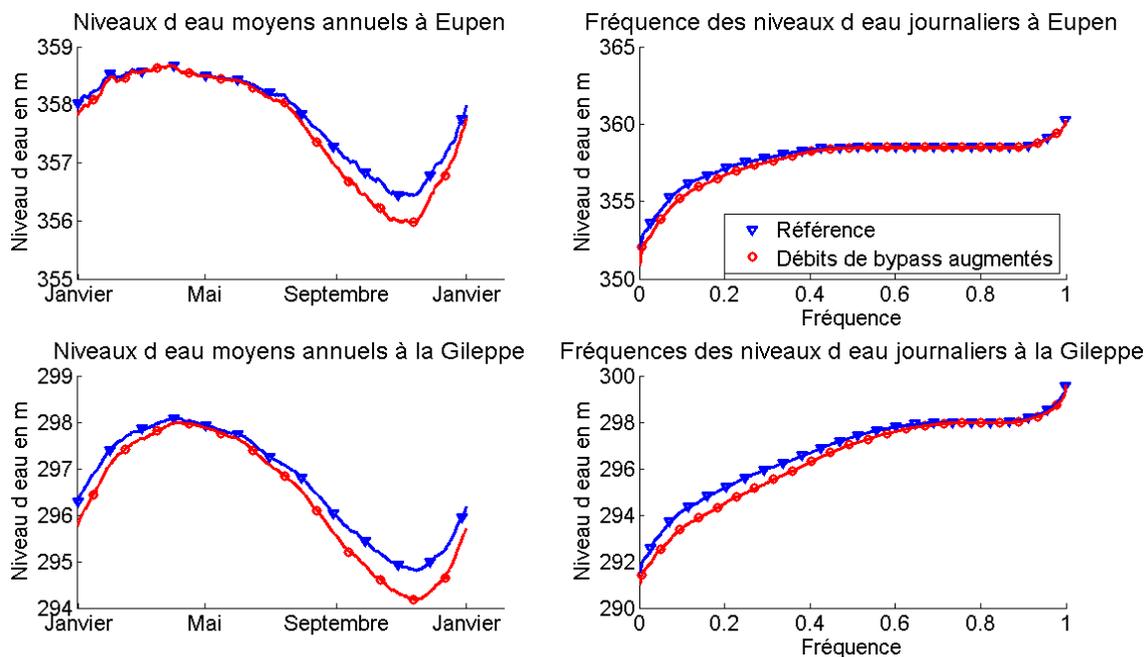


Figure 9-9 : Influence des débits de by-pass – Niveaux d'eau des lacs

9.6. Influence des débits seuils en aval [19], [25] et [15]

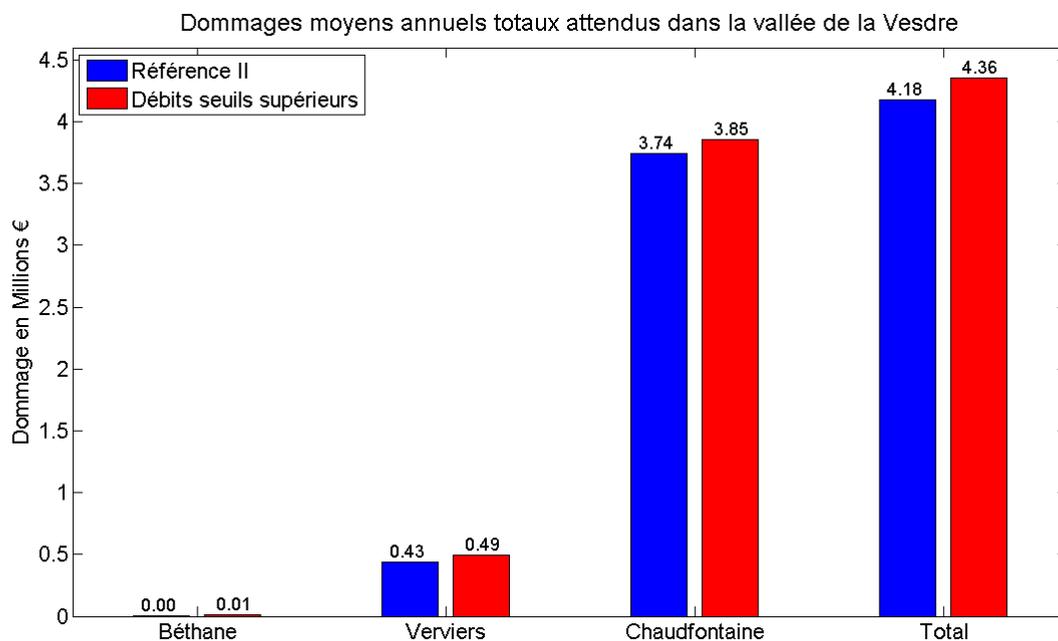


Figure 9-10 : Influence des débits seuils en aval – Dommages moyens annuels dans la vallée de la Vesdre

9.7. Effets du changement climatique à l'horizon 2070-2100

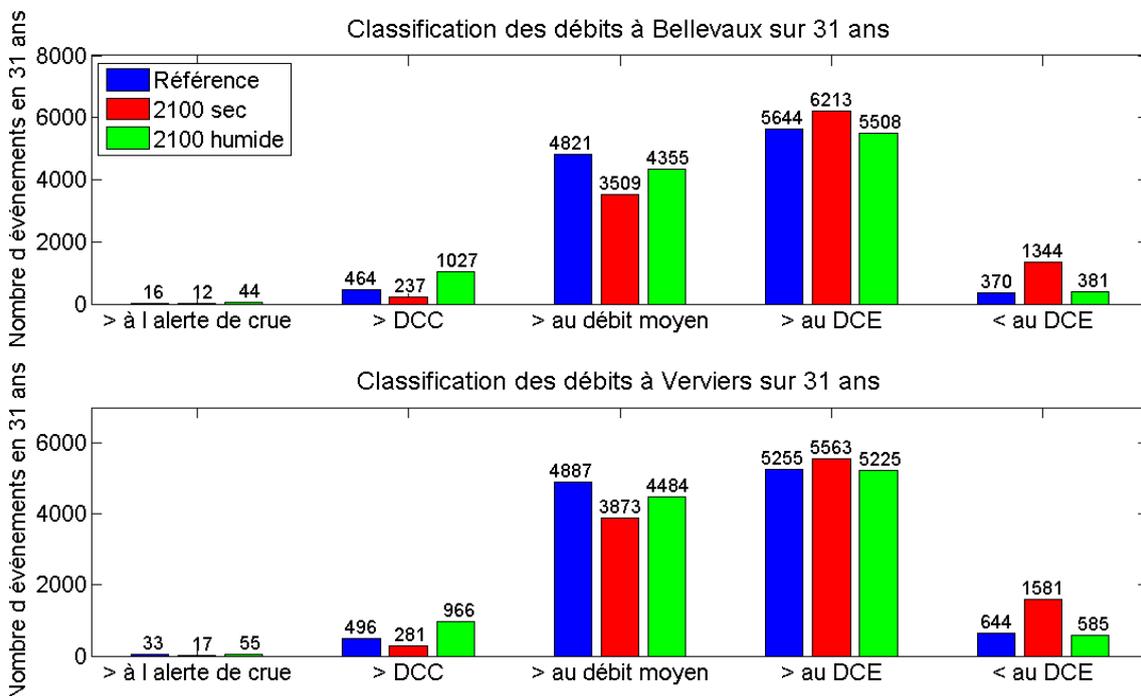


Figure 9-11 : Effets du changement climatique à l'horizon 2070-2100 – Classification des débits par rapport à des débits cibles

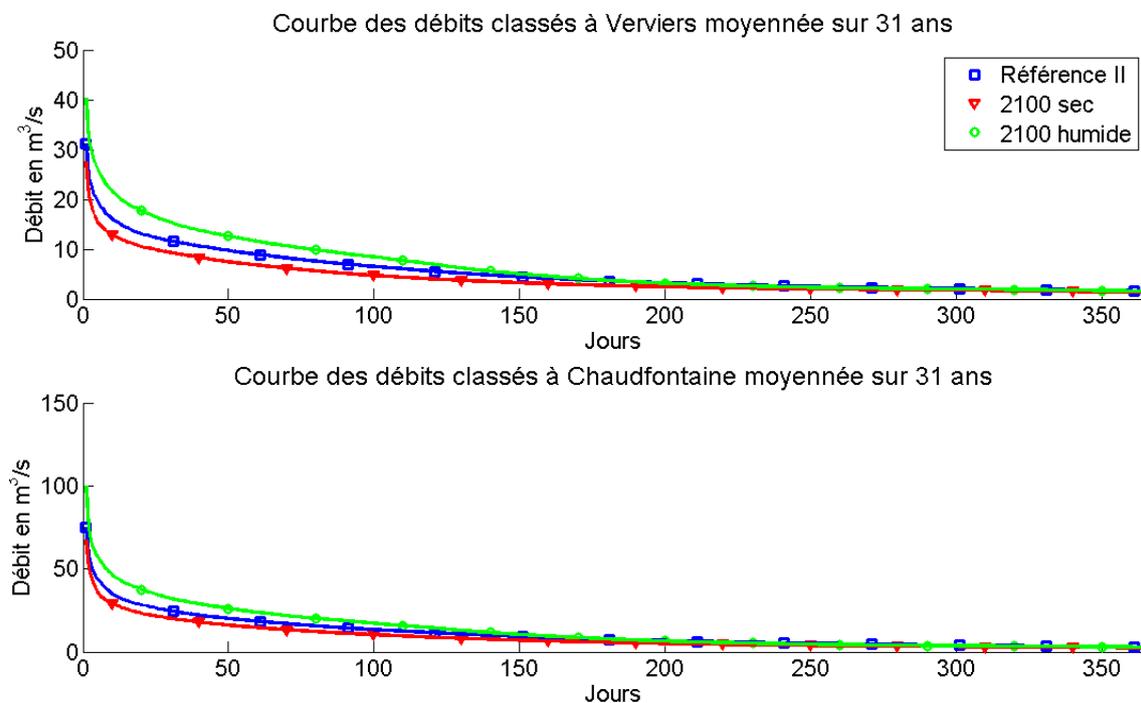


Figure 9-12 : Effets du changement climatique à l'horizon 2070-2100 – Courbe des débits classés

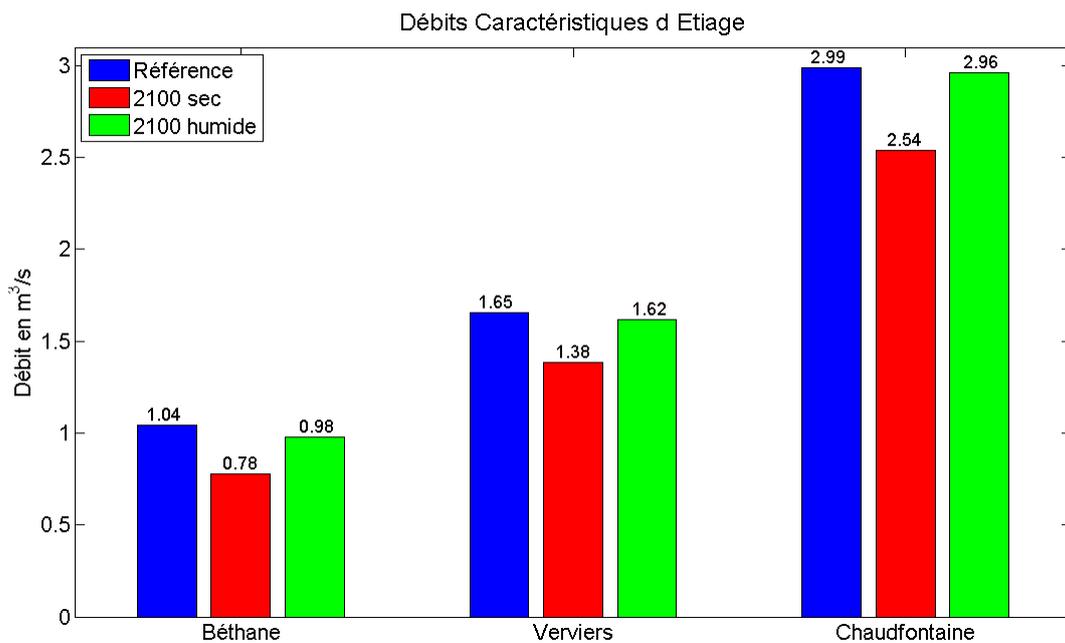


Figure 9-13 : Effets du changement climatique à l'horizon 2070-2100 – DCE

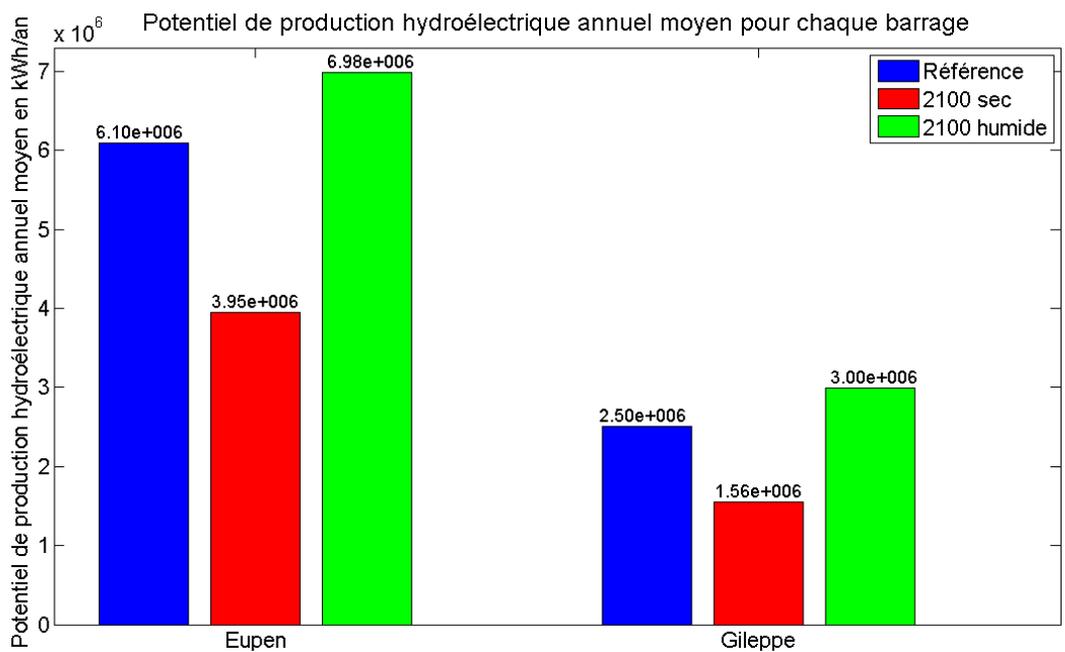


Figure 9-14 : Effets du changement climatique à l'horizon 2070-2100 – Potentiel de production hydroélectrique

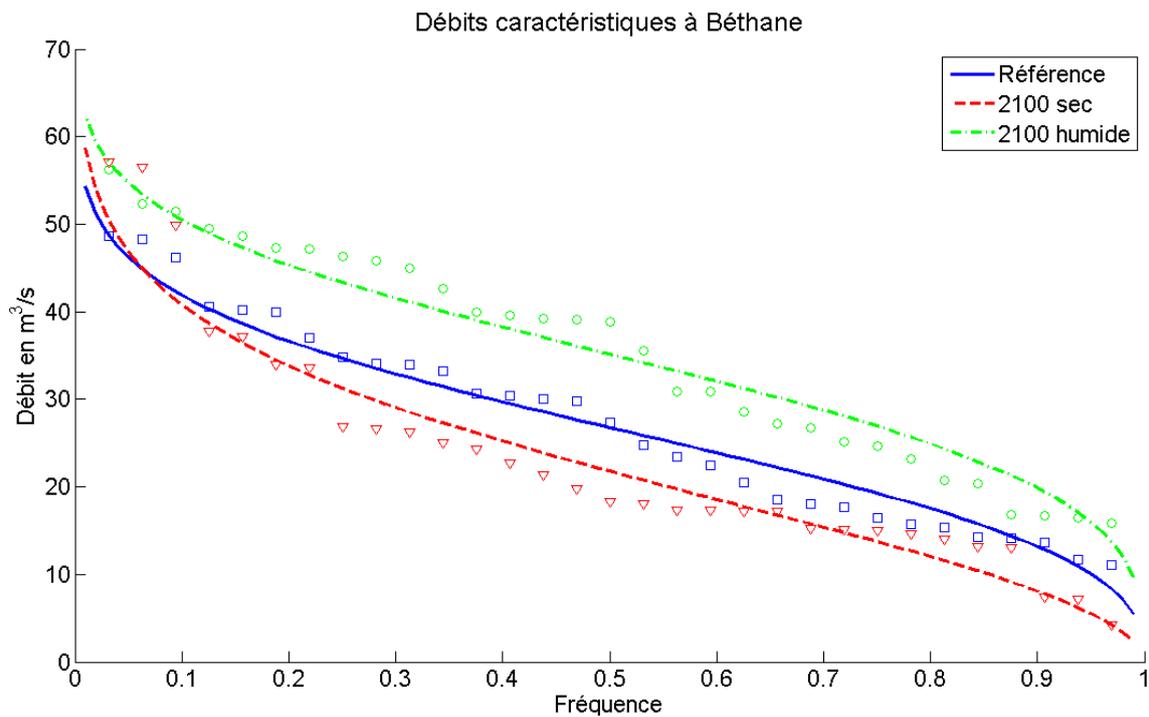


Figure 9-15 : Effets du changement climatique à l'horizon 2070-2100 – Débits caractéristiques à Béthane suivant une courbe de Weibull

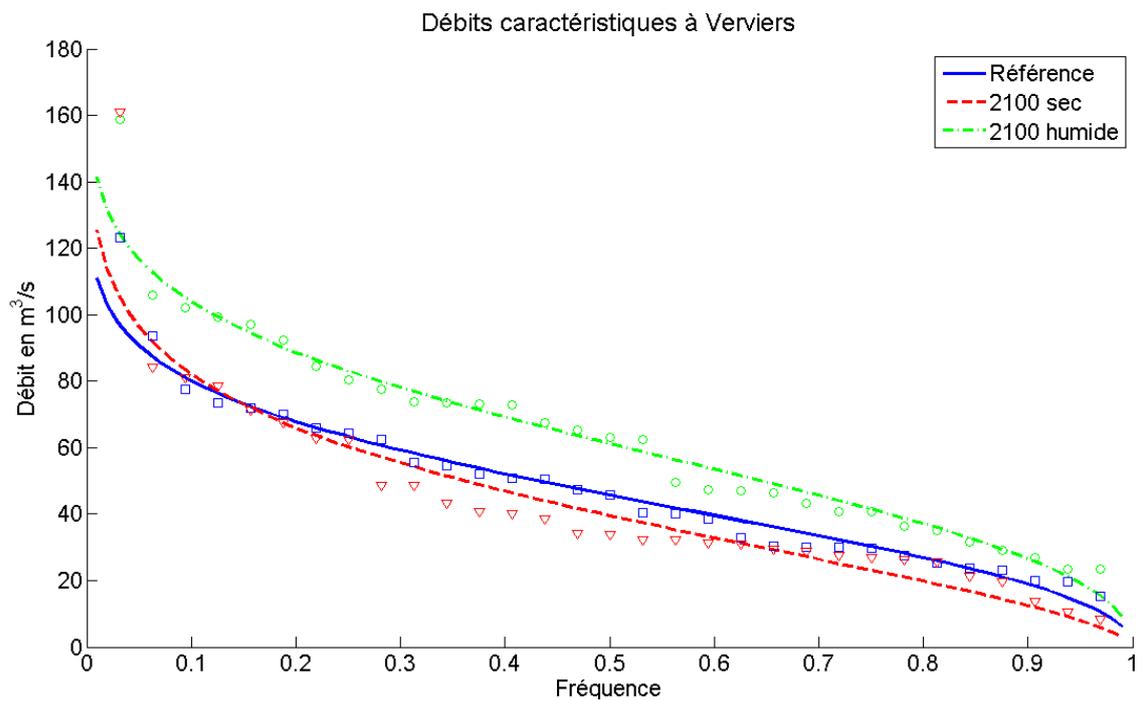


Figure 9-16 : Effets du changement climatique à l'horizon 2070-2100 – Débits caractéristiques à Verviers suivant une courbe de Weibull

9.8. Effets du changement climatique à l'horizon 2020-2050

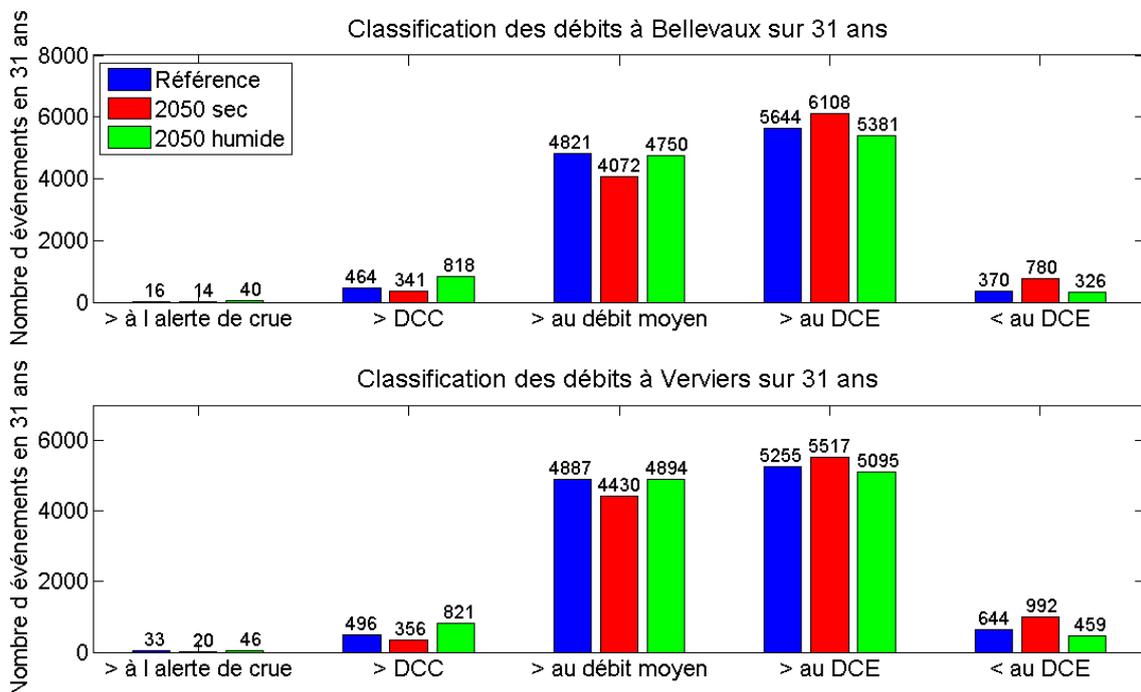


Figure 9-17 : Effets du changement climatique à l'horizon 2020-2050 – Classification des débits par rapport à des débits cibles

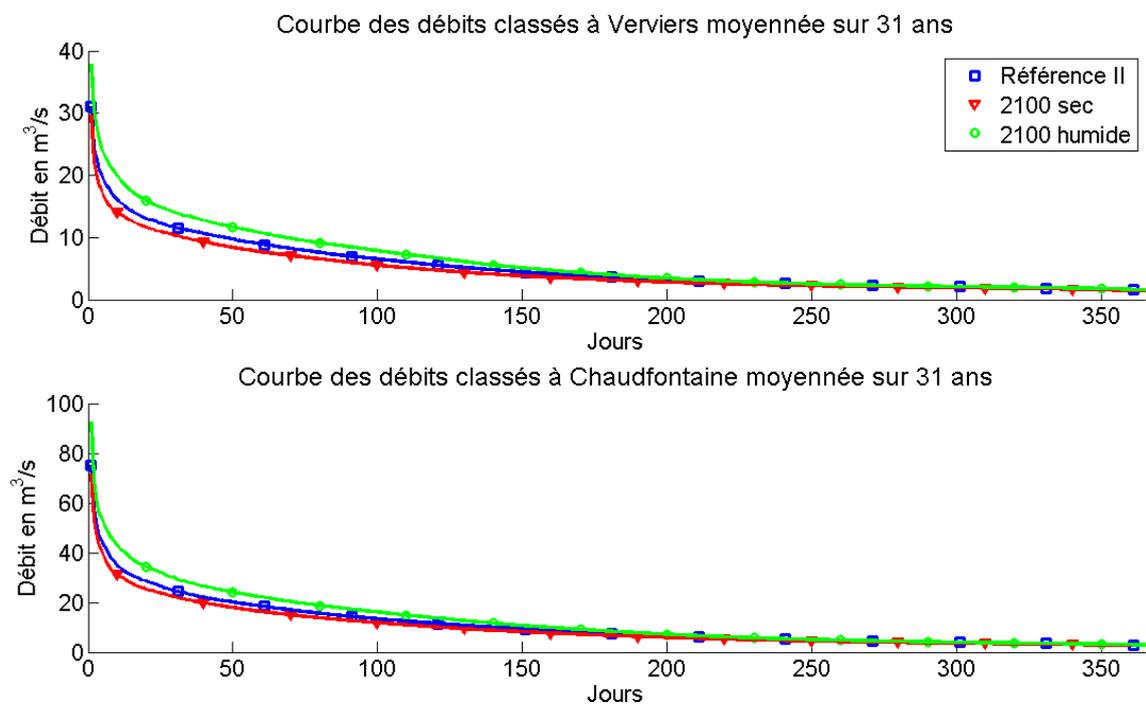


Figure 9-18 : Effets du changement climatique à l'horizon 2020-2050 – Courbe des débits classés

Bibliographie

Aubin, D. (2007). L'eau en partage: l'activation des règles dans les rivalités d'usages en Belgique et en Suisse. Peter Lang.

Bader, J.-C., Lamagat, J.-P., & Guiguen, N. (2003). Gestion du barrage de Manantali sur le fleuve Sénégal: analyse quantitative d'un conflit d'objectifs. Dans *Hydrological Sciences Journal*, 48:4 (pp. 525-538).

Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S., & Palutikof, J. P. (2008). Le changement climatique et l'eau. Dans *Relation entre le changement climatique et les ressources en eau: incidences et mesures d'intervention* (pp. 48-53). Genève: GIEC.

Bauwens, A., Sohler, C., & Degré, A. (2010). The Hydrological response to climate change of the Lesse and the Vesdre catchments (Wallonia, Belgium). Dans *Hydrology and Earth System Sciences (HESS)*.

Beckers, A. (2011). Etude du risque lié aux inondations de la Meuse en Région wallonne. Intégration de l'évolution de l'urbanisation dans le calcul du dommage.

Bieri, M., Schleiss, A. J., & Jordan, F. (2013). Active flood management in Alpine catchment areas equipped.

Bouwer, L. M., Budeck, P., & Aerts, J. C. (2010). Changes in future flood risk due to climate and development in a Dutch polder area. Dans *Global Environ. Chang.* (Vol. 20, pp. 463–471).

Brahy, V., Lange, S., & Ramelot, C. (2007). Les débits, les crues et les étiages des cours d'eau. Dans *SPW, Rapport Analytique 2006-2007* (pp. 433-445).

Camnasio, E., & Becciu, G. (2010). Evaluation of the Feasibility of Irrigation Storage in a Flood Detention Pond in an Agricultural Catchment in Northern Italy.

Castelleti, A., Pianosi, F., & Soncini-Sessa, R. (2007). Water reservoir control under economic, social and environmental constraints.

de Wit, M. (2008). *Gouttes de pluies, flux de Meuse. Une gestion transnationale de l'eau par temps sec et humide*. Veen Magazines.

de Wit, M. J., Peeters, H. A., Gastaud, P. H., Dewil, P., Maeghe, K., & Baumgart, J. (2007). Floods in the Meuse basin: Event descriptions and an international view on ongoing measures. Dans *Intl. J. River Basin Management* 5(4) (pp. 279–292).

Detrembleur, S., Dewals, B., Archambeau, P., & Piroton, M. (2012). Hydraulic modelling of the Meuse. Towards improved operation rules for the Vesdre reservoirs : WP1 report – Action 8.

Dewals, B., Detrembleur, S., Archambeau, P., Epicum, S., & Piroton, M. (2011). Incorporating climate change scenarios into new operating rules for large reservoirs: a transnational assessment in the Meuse basin.

Dewals, B., Drogue, G., Epicum, S., Piroton, M., & Archambeau, P. (2013). Impact of climate change on inundation hazard along the river Meuse. Dans *Transboundary Water Management in a Changing Climate*. Londres: CRC Press.

- Drogue, G., Fournier, M., Bauwens, A., Commeaux, F., De Keizer, O., François, D., et al. (2010). Analysis of climate change high-flows and low-flows scenarios on the Meuse basin.
- Ernst, J., Dewals, B. J., Detrembleur, S., Archambeau, P., Epicum, S., & Piroton, M. (2010). Micro-scale flood risk analysis based on detailed 2D hydraulic modelling and high resolution geographic data.
- Epicum, S., Meile, T., Dewals, B., Piroton, M., & Schleiss, A. J. (2009). 2D numerical flow modelling in a macro-rough channel.
- Fortin, L.-G., Turcotte, R., Pugin, S., Cyr, J.-F., & Picard, F. (2007). Impact des changements climatiques sur les plans de gestion des lacs Saint-François et Aylmer au sud du Québec. Dans *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 34 (pp. 934-945).
- Gandolfi, C., Guariso, G., & Togni, D. (1997). Optimal Flow Allocation in the Zambezi River System. Dans *Water Resources Management : Volume 11* (pp. pp 377-393).
- GIEC. (2007). Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport. Genève, Suisse: GIEC.
- Guariso, G., Rinaldi, S., & Soncini-Sessa, R. (1986). The Management of Lake Como: A Multiobjective Analysis. Dans *Water Resources Research*, Vol. 22, No.2 (pp. 109-120).
- Heller, P. (2007). Méthodologie pour la conception et la gestion des aménagements hydrauliques à buts multiples.
- Hendrick, P., Watteeuw, O., & Bergeron, K. (2011). Le stockage d'énergie par pompage/turbinage en région wallonne. Etude Commandée par le Cabinet du Ministre Jean-Marc Nollet.
- Hill, M. C., & Tiedeman, C. R. (2007). Effective groundwater model calibration with analysis of sensitivities, predictions, and uncertainty. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons.
- IPCC. (2007). Climate change 2007: Synthesis Report - Summary for policymakers. Dans *Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Jordan, F. (2005). Gestion des crues par opérations préventives sur les aménagements hydroélectriques à accumulation. Dans L. d. Lausanne, *Conférence sur la recherche appliquée en relation avec la troisième correction du Rhône : Nouveaux développements dans la gestion des crues*. Martigny.
- Jordan, F. (2007). Modèle de prévision et de gestion des crues - Optimisation des opérations des aménagements hydroélectriques à accumulation pour la réduction des débits de crue. Lausanne.
- Jordan, F., Boillat, J.-L., & Schleiss, A. (2012). Optimization of the flood protection effect of a hydropower multi-reservoir system. Dans *International Journal of River Basin Management*, 10:1 (pp. 65-72).
- Labadie, J. W., & Asce, M. (2004). Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-of-the-Art Review.
- Magermans, P., Everbecq, E., & Bourouag, T. (2011). Simulation du bassin de la Vesdre avec le modèle intégré MOHICAN : Note Technique. Dans Aquapôle. Liège.

Ministère de la Région wallonne. (2005). État des lieux des sous-bassins hydrographiques. Tome I : État des lieux. Sous-bassin de la Vesdre.

Ministère des Travaux publics. (1986). Les Barrages belges.

Miquel, J., & Roche, P. A. (1983). La gestion d'un réservoir de soutien d'étiage peut-elle être optimale en cas de prévisions imparfaites? Dans *Scientific Procedures Applied to the Planning, Design and Management of Water Resources Systems*, no. 147.

Morel-Seytoux, H. J. (1998). Gestion optimale d'un réservoir en avenir déterminé. Dans *Journal of Water Science*, Vol. 11, no. 4 (pp. 569-598). Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE).

Parent, E. (1991). Elaboration des consignes de gestion des barrages - réservoirs.

Payne, J. T., Wood, A. W., Hamlet, A. F., Palmer, R. N., & Lettenmaier, D. P. (2004). Mitigating the Effects of Climate Change on the Water Resources of the Columbia River Basin. Dans *Climate Change*, Vol. 62 (pp. 233-256).

Pohl, R., & Bornschein, A. (2006). A management system to optimize reservoir control in the case of floods. Dresden.

Pugin, S., Cyr, J. F., Turcotte, R., & Fortin, L. G. (2005). Impact des changements climatiques - Développements méthodologiques pour un bassin versant témoin. Dans *Rapport du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, Québec*.

Römgens, H. (2013). Climate change and the impact on drinking water supply in the Meuse river basin. Dans *Transboundary Water Management in a Changing Climate*. Londres: CRC Press.

Sinaba, B., Döring, R., Kufeld, M., Schüttrumpf, H., & Bauwens, A. (2013). Impacts of future floods and low flows on the economy in the Meuse basin.

Sinaba, B., Huber, N., Fournier, M., Bauwens, A., Buiteveld, H., Brede, R., et al. (2011). Quantification of the impacts of future floods on the economy in the transnational Meuse basin. Dans *Transboundary Water Management in a Changing Climate*. Londres: CRC Press.

SPW. (2004). Note de manutention des eaux des barrages de la Vesdre et de la Gileppe.

SPW. (2008). Note de manutention des eaux des barrages de la Vesdre et de la Gileppe.

SWDE. (2013). Brochures de présentations de la station d'Eupen et de la station de Stembert. Dans <http://www.swde.be>.

te Linde, A. H., Aerts, J. C., Bakker, A. M., & Kwadijk, J. C. (2010). Simulating low - probability peak discharges for the Rhine basin using resampled climate modeling data.

te Linde, A. H., Budeck, P., Dekkers, J. E., de Moel, H., & Aerts, J. C. (2011). Future flood risk estimates along the river Rhine.

Ward, P. J., de Moel, H., & Aerts, J. C. (2011). How are flood risk estimates affected by the choice of return-periods?

Watkins, D. W., & Moser, D. A. (2006). Economic-based optimization of Panama Canal system operations. Dans *Journal of water resources planning and management*.

Wildemeersch, S. (2012). Assessing the impacts of technical and structure choices on groundwater model performance using a complex synthetic case.