



**HAL**  
open science

## **Courbes de tarage dynamiques : effet de la végétation aquatique saisonnière (Action A2.1 du programme MEEM (DGPR/SNRH) - Irstea 2017).**

E. Perret, Jérôme Le Coz, Benjamin Renard

### **► To cite this version:**

E. Perret, Jérôme Le Coz, Benjamin Renard. Courbes de tarage dynamiques : effet de la végétation aquatique saisonnière (Action A2.1 du programme MEEM (DGPR/SNRH) - Irstea 2017).. [Rapport de recherche] irstea. 2018, pp.78. hal-02608480

**HAL Id: hal-02608480**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02608480v1>**

Submitted on 16 May 2020

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

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



## **A2 Gestion en temps réel des stations hydrométriques à courbes de tarage instables**

### ***A2.1 Courbes de tarage dynamiques : effet de la végétation aquatique saisonnière***

JUIN 2018

**Emeline PERRET**  
**Jérôme LE COZ**  
**Benjamin RENARD**

Irstea, centre de Lyon-Villeurbanne  
Unité de recherche Riverly  
5 rue de la Doua  
69616 VILLEURBANNE

[www.irstea.fr](http://www.irstea.fr)







Irstea  
Institut national de recherche  
en sciences et technologies  
pour l'environnement et l'agriculture

1<sup>er</sup> juin 2018

---

## MODÈLE DE COURBES DE TARAGE DYNAMIQUES : EFFET DE LA VÉGÉTATION AQUATIQUE SAISONNIÈRE

---

Emeline Perret ; Jérôme Le Coz ; Benjamin Renard



Végétation aquatique au niveau de la Moder à Drusenheim (source : DREAL Grand EST).

# Remerciements

Nous tenons à remercier Daniel Moritz (DREAL Grand Est) qui a réalisé le suivi de la station de Ladhof (jusqu'à sa retraite en 2017). Il nous a fourni une quantité non négligeable de données qui a directement servi à la création du modèle présenté dans cette étude. Nous remercions également son collègue, Vincent Mossard, qui a pris le relais pour le suivi de cette station.

# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>2</b>
<b>Introduction</b>	<b>5</b>
<b>1 Développement du modèle dynamique</b>	<b>8</b>
1.1 Rappel de l'expression d'une courbe de tarage non-dynamique . . . . .	8
1.2 Revue de la littérature . . . . .	9
1.2.1 Influence des plantes sur l'écoulement . . . . .	9
1.2.2 Lois de résistance relatives à la végétation aquatique . . . . .	12
1.3 Étude du comportement hydraulique d'une station végétalisée : Ladhof .	15
1.3.1 Présentation de la station Ladhof . . . . .	15
1.3.2 Observations de détarages transitoires . . . . .	18
1.3.3 Mise en évidence de l'influence des plantes sur l'écoulement . . . .	19
1.4 Modèle de résistance hydraulique due aux plantes . . . . .	26
1.5 Sous-modèle de croissance de la plante . . . . .	27
1.5.1 Évaluation de la croissance de la plante pour la station Ladhof . .	28
1.5.2 Revue de la littérature - Modèle de croissance des plantes . . . . .	33
1.5.3 Modèle de croissance retenu . . . . .	36
<b>2 Intégration du modèle dynamique proposé dans <i>BaM</i></b>	<b>41</b>
2.1 Formulation mathématique du modèle . . . . .	42
2.1.1 Le modèle . . . . .	42
2.1.2 Les sous-modèles . . . . .	43
2.2 Description du modèle avec le formalisme de <i>BaM</i> . . . . .	44
<b>3 Test et validation du modèle</b>	<b>48</b>
3.1 Élaboration de la courbe de tarage pour la station Ladhof . . . . .	48
3.1.1 Estimation des paramètres du modèle dynamique . . . . .	49
3.1.2 Construction de la courbe de tarage dynamique . . . . .	51
3.1.3 Reconstruction de la chronique de débit sur la période 2009-2013 .	53
3.2 Intérêt du modèle végétation par rapport au modèle BaRatin . . . . .	54
3.3 Tests de sensibilité . . . . .	57
3.3.1 Sensibilité aux types et nombres de jaugeages . . . . .	57
3.3.2 Sensibilité à la précision des a priori des paramètres du modèle . .	61
3.3.3 Sensibilité à l'option de sous-modèle de croissance choisie . . . . .	61
3.3.4 Sensibilité aux données de température utilisées en entrée . . . . .	63
3.4 Amélioration du modèle proposé . . . . .	67

Conclusions et perspectives	71
Bibliographie	76

# Introduction

Pour une bonne gestion des rivières, il est nécessaire de connaître et d'être capable de prédire le débit  $Q$  de ces dernières. En effet, cette variable est au cœur de toutes études visant à maîtriser les crues, protéger le territoire, préserver l'habitat aquatique, gérer l'irrigation pour l'agriculture, gérer l'alimentation en eau, dimensionner et gérer les ouvrages hydrauliques. Sa mesure directe et en continu est néanmoins loin d'être triviale. C'est pourquoi les gestionnaires de rivières ont recours à des approches indirectes pour établir des chroniques de débit. Ils se basent généralement sur la mesure de la hauteur d'eau  $h$  qu'ils transforment en débit à l'aide d'un modèle, appelé courbe de tarage (CT). Au niveau des stations hydrométriques, la hauteur d'eau est souvent mesurée en continu et automatiquement en un point où elle peut être reliée de manière univoque au débit. Chaque station possède sa propre courbe de tarage. Une CT est construite à l'aide de mesures de hauteur et de débit réalisées ponctuellement dans le temps, appelées jaugeages. Pour assurer une bonne calibration, les jaugeages doivent être suffisamment nombreux et être effectués sur une gamme de débit étendue. Le débit jaugé est souvent déduit d'une mesure du champ de vitesse de l'écoulement (à l'aide de moulinets, ADCP, radar ou traceurs) que l'on intègre ensuite sur le tronçon étudié. Il est courant de considérer une incertitude d'environ 5% pour la valeur du débit jaugé dans de bonnes conditions, voire plus pour les faibles et forts débits (débits extrêmes) où la mesure est plus incertaine. Une erreur liée à la mesure de la hauteur d'eau peut être également prise en compte.

La quantification de l'incertitude de la CT est nécessaire pour les gestionnaires de rivières. En effet, leurs décisions s'appuient souvent sur ces débits produits et leurs incertitudes. L'incertitude associée à la CT dépend principalement de l'équation choisie pour décrire la relation  $h-Q$ , des incertitudes des jaugeages et des incertitudes liées à l'estimation des paramètres du modèle. La méthode *BaRatin* peut être utilisée pour construire une CT et évaluer son incertitude (Le Coz *et al.*, 2014). Il suffit, pour pouvoir l'appliquer, de disposer d'informations a priori sur le fonctionnement de la station (série de contrôles hydrauliques en fonction des gammes de hauteurs) et de jaugeages accompagnés de leurs incertitudes. Dans ce cas, le modèle  $h-Q$  est décrit par une combinaison de fonctions puissances décrivant chacun des contrôles. Les paramètres du modèle estimés a priori sont évalués par une approche bayésienne. Cette dernière repose sur l'échantillonnage par la méthode Monte Carlo par Chaînes de Markov (MCMC) de la distribution a posteriori des paramètres de la CT, inférée à partir du théorème de Bayes. La méthode *BaRatin* est opérationnelle et utilisable via l'outil *BaRatinAGE* mais aussi via l'outil *BaM* que nous présenterons plus tard.

Les courbes de tarage ne sont pas toujours stables sur un site de mesure donné, c'est-à-dire que les relations  $h-Q$  peuvent évoluer dans le temps. Les instabilités peuvent résulter de changements brutaux qui modifient les contrôles hydrauliques de départ (ex : interven-



tion humaine (travaux), crues entraînant un fort transport sédimentaire et modifiant la géométrie du chenal) mais aussi de changements transitoires (ex : liés au développement de la végétation ou à la présence d'une couche de glace). Dans ces derniers cas, les relations  $h-Q$  ne sont plus univoques et deviennent complexes. Dans cette étude, nous allons nous intéresser à des sites de mesure impactés par la végétation aquatique. Dans ce cas, la CT évolue continuellement selon la croissance et le déclin de la végétation aquatique. Des déviations temporaires et progressives par rapport à la courbe de tarage d'origine (sans végétation) sont observées. Le débit doit donc être estimé par la hauteur d'eau et une autre variable dépendant du temps (ex : évolution temporelle de la rugosité hydraulique liée au développement saisonnier des plantes). Ces courbes de tarage sont qualifiées de courbes de tarage dynamiques et complexes. Elles doivent être mises à jour régulièrement pour une bonne estimation du débit. Généralement, la CT est mise à jour si le débit jaugé s'écarte de plus de  $x\%$  de la valeur fournie par le modèle de CT d'origine. En règle général,  $x = 5\%$ ;  $x = 7\%$ ,  $8\%$ , ... sont parfois utilisés. Il n'existe donc pas de méthode universelle pour la mise à jour des courbes. Certains même, ne s'intéressent pas seulement au jaugeage le plus récent mais aux 3 derniers pour prendre leur décision.

Pour gérer les courbes de tarage dynamiques, la méthode classique qui consiste à construire une nouvelle CT à chaque nouvelle période stable en utilisant uniquement des nouveaux jaugeages n'est pas envisageable. Des méthodes dites dynamiques sont plus convenables pour gérer les détarages fréquents. En revanche, elles ne sont pas toujours adaptées pour fournir les données de débit en temps réel. Pourtant, la demande de disposer de débits en temps réel accompagnés de leur incertitude est de plus en plus forte de la part des gestionnaires pour des fins opérationnelles (le suivi des étiages et la prévision des crues). La plupart de ces méthodes dynamiques sont décrites et détaillées dans Manzanarez *et al.* (2018). Les approches dynamiques sont basées sur l'hypothèse que chaque jaugeage représente la meilleure estimation de la relation  $h-Q$  au moment où il a été réalisé (Puechberty *et al.*, 2017).

Certaines méthodes dynamiques suggèrent de construire une série de courbes de tarages intermédiaires valables sur de courtes périodes en se basant sur un certain nombre de jaugeages. Par exemple, Westerberg *et al.* (2011) et Guerrero *et al.* (2012) proposent d'utiliser les 30 derniers jaugeages les plus récents pour construire des CT temporaires. Ils préconisent néanmoins de prendre en compte les jaugeages effectués à fort débit lors des précédentes périodes pour contraindre la nouvelle courbe. En effet, les forts débits sont moins sensibles à l'instabilité locale induite par la présence de végétation. Ces jaugeages restent donc appropriés et représentatifs de la partie supérieure de la courbe  $h-Q$ . La méthode *GesDyn*, détaillée dans la thèse de Morlot (2014), quant à elle, utilise chaque nouveau jaugeage pour recréer une nouvelle courbe et recalculer son incertitude. Pour la construction de la CT temporaire, seuls les jaugeages hydrauliquement similaires au nouveau jaugeage sont gardés. Une incertitude plus forte leur est affectée en fonction de leur âge c'est-à-dire en fonction de la durée qui les sépare du nouveau jaugeage. Ces méthodes dynamiques facilitent la gestion des sites végétalisés mais demandent néanmoins des jaugeages fréquents pour être utilisées en quasi temps réel. Les jaugeages sont nécessaires pour connaître précisément l'influence de la végétation et affiner la correction à appliquer à la CT.

D'autres méthodes consistent à décaler la nouvelle courbe de tarage par rapport à la CT d'origine (stable à travers la période considérée) en fonction de chaque nouveau

jaugeage sans en modifier sa forme de départ (World Meteorological Organization, 2010). Cela revient à appliquer une correction sur la hauteur d'eau ponctuellement dans le temps. Pour pallier ce problème du décalage constant sur toutes les gammes de débit, Rainville *et al.* (2016) ont répertorié différents scénarii de déviations où la correction de la hauteur d'eau s'effectue seulement sur une partie de la courbe permettant de prendre en compte les différents contrôles (ex : correction uniquement sur les bas débits ou sur la même gamme de hauteur que celle du jaugeage). En France, la méthode connue sous le nom de CORTH est souvent utilisée. Elle est utilisée dans le logiciel BAREME des services de l'Etat. Elle peut être appliquée à court terme lors de changements progressifs et mais non brutaux. Il est donc important de vérifier que la courbe de tarage retrouve son emplacement d'origine une fois que l'influence de la végétation disparaît. Par exemple, à la suite d'une crue morphogène qui entraîne l'arrachement de la végétation, la correction doit être stoppée et une nouvelle courbe de tarage doit être reconstruite. Le recalage de la courbe de tarage est souvent manuel (ou peu automatisé) et lié à l'appréciation de l'opérateur, donc inadapté à la gestion en temps-réel. Les incertitudes associées à ces corrections sont difficilement quantifiables, ce qui peut être gênant pour les gestionnaires. De plus, ce type de méthodes ne prend pas en compte les informations des périodes précédentes qui peuvent être parfois indispensables pour affiner l'estimation de la CT. La correction de la hauteur conduit à un décalage de l'ensemble de la courbe ce qui revient à ne pas prendre en considération les différents contrôles hydrauliques en jeu (plus ou moins impactés par la végétation) et les effets de fléchissement des plantes (pouvant réduire les écarts par rapport à la CT d'origine en cas de crue).

Un problème persiste concernant toutes ces méthodes. Il est lié au fait que les détarages ne peuvent être détectés qu'une fois que le nouveau jaugeage a été effectué, ce qui n'est pas adapté pour une estimation en temps réel du débit. Un modèle faisant intervenir une estimation du développement des plantes et prenant en compte le fléchissement potentiel des plantes serait sans doute plus adéquat pour ce genre d'application.

L'objectif de cette étude est de développer un modèle de courbe de tarage dynamique prenant en compte l'influence de la végétation aquatique saisonnière. Le modèle pourra permettre d'estimer le débit à partir de la hauteur d'eau et d'autres variables liées aux caractéristiques de la plante et de son développement. Il sera développé dans l'optique de pallier les limites des méthodes dynamiques actuelles listées ci-dessus. L'application en temps réel sera discutée mais ne constituera pas l'objectif premier de cette étude. Le modèle dynamique proposé sera testé en analysant des cas-tests de stations bien documentés et affectés par la végétation aquatique saisonnière. Il sera implémenté dans le code *BaM* en vue d'applications opérationnelles. *BaM* est un code de calcul basé sur la méthode bayésienne permettant d'estimer les paramètres d'un modèle (accompagnés de leurs incertitudes) et d'effectuer des prédictions à partir du modèle (accompagnées de leurs incertitudes). Il n'est autre qu'une généralisation de la méthode *BaRatin* pour des modèles quelconques (Renard, 2017).

# Chapitre 1

## Développement du modèle dynamique

Ce chapitre présente la démarche suivie pour établir le modèle dynamique prenant en compte l'effet de la végétation aquatique saisonnière des cours d'eau. Le développement du modèle s'appuie essentiellement sur un jeu de données bien documenté d'une station hydrométrique affectée par la végétation aquatique saisonnière : la station de Ladhof (l'Ill à Colmar). Après un bref rappel sur les modèles de courbes de tarage stables (non-dynamiques), le comportement hydraulique de la station de Ladhof sera étudié. L'influence de la végétation sera mise en évidence. Une revue bibliographique concernant l'impact des plantes sur la résistance à l'écoulement aidera à mieux comprendre la dynamique de ce genre de rivière. Ces informations seront ensuite utilisées pour construire le modèle attendu.

### 1.1 Rappel de l'expression d'une courbe de tarage non-dynamique

De manière générale, les stations hydrométriques sont installées sur des tronçons où il est possible d'obtenir, pour une période donnée, une relation univoque entre la hauteur d'eau et le débit. Les courbes de tarages de ces stations sont dites stables. Dans ce cas, la relation  $h-Q$  est déterminée selon les caractéristiques du chenal considéré, autrement dit selon le type de contrôles hydrauliques. Il existe des contrôles par section, où la relation  $h-Q$  est déduite de la géométrie de la section où l'écoulement va passer en régime critique, et des contrôles par chenal, où la relation  $h-Q$  est déduite de la géométrie du chenal et sa résistance à l'écoulement sur l'ensemble du tronçon. Dans ces cas, les courbes de tarage peuvent s'exprimer à l'aide de fonctions puissances. En faisant l'hypothèse d'une section rectangulaire large (c'est-à-dire que  $R_h \approx h - b$ , avec  $R_h$  le rayon hydraulique et  $b$  le niveau du fond), on obtient la relation suivante :

$$\begin{cases} Q(h) = 0 & \text{si } h \leq b \text{ ou } h \leq \kappa \\ Q(h) = a(h - b)^c & \text{si } h > b \text{ ou } h > \kappa \end{cases} \quad (1.1)$$

avec  $a$  un paramètre lié aux propriétés physiques du contrôle,  $b$  l'offset du contrôle,  $c$  l'exposant du contrôle et  $\kappa$  la hauteur d'activation c'est-à-dire la hauteur pour laquelle

le contrôle devient actif, voir Mansanarez (2016) pour plus de détails.

Ci-après sont présentés deux relations  $h$ - $Q$  décrivant deux contrôles bien particuliers et fréquemment utilisés :

- Cas d’un contrôle par section de type seuil rectangulaire :

$$\begin{cases} Q(h) = 0 \text{ si } h \leq b \text{ ou } h \leq \kappa \\ Q(h) = C_Q B \sqrt{2g_r} (h - b)^{3/2} \text{ si } h > b \text{ ou } h > \kappa \end{cases} \quad (1.2)$$

avec  $C_Q$  le coefficient de débit modélisant les pertes de charge entre la section de mesure et la section critique du seuil,  $B$  la largeur déversante du seuil et  $g_r$  la gravité.

- Cas d’un contrôle par chenal rectangulaire large :

$$\begin{cases} Q(h) = 0 \text{ si } h \leq b \text{ ou } h \leq \kappa \\ Q(h) = \frac{1}{n} B \sqrt{S_0} (h - b)^{5/3} \text{ si } h > b \text{ ou } h > \kappa \end{cases} \quad (1.3)$$

avec  $n$  le coefficient de Manning (donnant une information sur la rugosité),  $B$  la largeur du chenal et  $S_0$  la pente du chenal (approchant la pente de la ligne d’énergie).

Dans la suite de notre étude, nous nous intéresserons seulement aux stations hydro-métriques contrôlées par chenal large rectangulaire (équation 1.3).

## 1.2 Revue de la littérature

### 1.2.1 Influence des plantes sur l’écoulement

A notre connaissance, il n’existe pas de modèles de courbe de tarage prenant en compte la présence de végétation aquatique saisonnière dans la littérature. En revanche, de nombreuses études ont examiné l’interaction fluide-végétation et ont analysé l’impact de la végétation sur l’écoulement à différentes échelles (Järvelä, 2004; Nikora, 2010; Folkard, 2011; Neary *et al.*, 2012; Nepf, 2012; Luhar et Nepf, 2013; Albayrak *et al.*, 2014). La conclusion principale de l’ensemble de ces études est que la présence de végétation aquatique induit essentiellement un changement de rugosité impactant directement la résistance du chenal à l’écoulement. La surface mouillée du tronçon étudié peut être également réduite selon la densité des plantes présentes dans le lit de la rivière.

D’après cette analyse bibliographique, il est possible de supposer que la forme puissance présentée en équation 1.3 pour le modèle stable peut être utilisée pour exprimer la courbe de tarage dynamique prenant en compte la présence de végétation aquatique saisonnière. En revanche, il faut veiller à rendre compte de la variation de rugosité observées dans les études précédentes. Le coefficient  $n$ , initialement fixe dans l’équation 1.3, devra donc être variable dans le temps et fonction du changement de rugosité induit par la végétation pour le modèle dynamique.

Le modèle prenant en compte la végétation aquatique peut donc s’écrire de la façon suivante si l’on considère un contrôle par chenal rectangulaire large :

$$\begin{cases} Q(h, t) = 0 \text{ si } h \leq b \text{ ou } h \leq \kappa \\ Q(h, t) = \frac{1}{n_{tot}(t)} B \sqrt{S_0} [h(t) - b]^c \text{ si } h > b \text{ ou } h > \kappa \end{cases} \quad (1.4)$$

avec  $n_{tot}$  le coefficient de résistance totale variable dans le temps,  $c=5/3$  un exposant lié au contrôle chenal rectangulaire large.

La résistance à l'écoulement est généralement exprimée à l'aide de coefficients de résistance, comme par exemple le coefficient de Manning  $n$  (dimensionnel [ $m^{-1/3}s$ ]) ou encore le coefficient de friction de Darcy-Weisbach  $f$  (adimensionnel [-]). Bien que  $f$  soit adimensionnel,  $n$  reste le coefficient de résistance le plus utilisé dans les formules hydrauliques. Des relations existent pour passer d'un coefficient de résistance à l'autre. Par exemple, la relation suivante permet le passage du coefficient de Darcy-Weisbach au coefficient de Manning :

$$f = \frac{8g_r n^2}{R_h^{1/3}} \quad (1.5)$$

La résistance totale du chenal à l'écoulement est influencée par de nombreux facteurs : le matériau constituant le lit, la forme du chenal, la présence de végétation, etc. Un coefficient de résistance totale (ex : le Manning total) peut donc être décomposé en plusieurs contributions de résistance. Généralement, on retient la résistance due aux sédiments constituant le lit ( $n_s$ ), la résistance due aux irrégularités du fond ( $n_f$ ), la résistance due aux variations géométriques du chenal ( $n_g$ ), la résistance due aux éventuels obstacles présents dans le chenal ( $n_o$ ), et celle due à la végétation ( $n_v$ ) (Cowan, 1956). La composante de la résistance liée à la végétation est sans doute celle qui est la plus susceptible de varier dans le temps et celle qui a le plus d'effet sur la résistance totale du cours d'eau (Coon, 1998). En effet, la végétation agit comme un obstacle à l'écoulement ce qui augmente la résistance du lit, réduit les vitesses de ce dernier et par conséquent augmente la hauteur d'eau du tronçon étudié.

Dans la littérature, plusieurs types de décomposition de la résistance totale ont été proposés :

- des décompositions de type Cowan (1956) :

$$n_{tot} = m(n_s + n_f + n_g + n_o + n_v) \quad (1.6)$$

avec  $m$  un facteur prenant en compte l'éventuel méandrement du cours d'eau.

- des décompositions simplifiées de type Morin *et al.* (2000) :

$$n_{tot}^2 = n_b^2 + n_v^2 \quad (1.7)$$

avec  $n_b$  la rugosité du lit sans végétation.

La décomposition de Morin *et al.* (2000) a un sens physique et est basée sur une décomposition linéaire de la contrainte de cisaillement totale appliquée au chenal,  $\tau_{tot}$ . Dans la suite, nous allons redémontrer comment obtenir cette décomposition. Pour plus de détails sur la méthode, veuillez-vous référer à l'étude d'Aberle et Järvelä (2013).

Considérons la décomposition linéaire de la contrainte de cisaillement totale suivante :

$$\tau_{tot} = \tau_b + \tau_v \quad (1.8)$$

où  $\tau_b$  est la contrainte de cisaillement au fond (lit) et  $\tau_v$  est la contrainte de cisaillement agissant sur les plantes. En faisant l'hypothèse d'un écoulement uniforme, il est possible d'écrire la contrainte de cisaillement totale de la manière suivante :

$$\tau_{tot} = \rho g S_0 (h - m_p \langle V_v \rangle) \quad (1.9)$$

avec  $V_v$  le volume des plantes submergées et  $m_p$  le nombre de plantes par unité de surface au fond. Le symbole  $\langle \rangle$  dénote une moyenne spatiale. La contrainte de cisaillement au fond peut, quant à elle, s'exprimer comme suit :

$$\tau_b = \tau_0(1 - m_p \langle A_v \rangle) \quad (1.10)$$

avec  $\tau_0$  la contrainte de cisaillement de peau (agissant sur le fond du lit dans le cas sans végétation et liée à la taille du sédiment présent au fond) par unité de surface et  $A_v$  la surface moyenne du lit occupée par les plantes. La contrainte agissant sur les plantes, quant à elle, peut être exprimée comme une moyenne spatiale de la force de traînée par unité de surface ( $F_D$ ) :

$$\tau_v = m_p \langle F_D \rangle = m_p \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \rho C_{D,i} A_{c,i} u_{c,i}^2 = \frac{1}{2} m_p \rho \langle C_D \rangle \langle A_c \rangle \langle u_c^2 \rangle \quad (1.11)$$

avec  $N_p$  le nombre de plantes dans le volume de contrôle,  $C_{D,i}$  le coefficient de traînée de la  $i^{\text{ème}}$  plante,  $A_{c,i}$  la surface de référence de la  $i^{\text{ème}}$  plante, et  $u_{c,i}^2$  la vitesse caractéristique approchant la  $i^{\text{ème}}$  plante.

Nous obtenons l'égalité des contraintes suivante :

$$\rho g S_0 (h - m_p \langle V_v \rangle) = \tau_0 (1 - m_p \langle A_v \rangle) + \frac{1}{2} m_p \rho \langle C_D \rangle \langle A_c \rangle \langle u_c^2 \rangle \quad (1.12)$$

Supposons ensuite que  $m_p \langle V_v \rangle \ll h$  et  $m_p \langle A_v \rangle \ll 1$ , c'est-à-dire que la partie occupée par les plantes reste négligeable devant celle occupée par l'eau. L'équation devient :

$$\rho S_0 h = \frac{\tau_0}{\rho} + \frac{1}{2} m_p \rho \langle C_D \rangle \langle A_c \rangle \langle u_c^2 \rangle \quad (1.13)$$

Pour rappel, la relation de Darcy-Weisbach dans le cas d'un écoulement dans un canal à surface libre s'exprime de la façon suivante :

$$\tau = \frac{f \rho U_m^2}{8} \quad (1.14)$$

En divisant l'équation 1.13 par  $U_m^2$  la vitesse moyenne au carré du tronçon étudié et en multipliant par 8, on fait apparaître des expressions du coefficient de Darcy-Weisbach (voir équation 1.14) :

$$\frac{8 \rho S_0 h}{U_m^2} = \frac{8 \tau_0}{\rho U_m^2} + \frac{8}{2 U_m^2} m_p \rho \langle C_D \rangle \langle A_c \rangle \langle u_c^2 \rangle \quad (1.15)$$

Soit :

$$f_{tot} = f_b + f_v \quad (1.16)$$

avec :

- $f_{tot} = (8 \rho S h) / U_m^2$  le coefficient de Darcy-Weisbach total,
- $f_b = (8 \tau_0) / (\rho U_m^2)$  le coefficient de Darcy-Weisbach lié à la surface du lit sans végétation,
- $f_v = (4 m_p \rho \langle C_D \rangle \langle A_c \rangle \langle u_c^2 \rangle) / U_m^2$  le coefficient de Darcy-Weisbach lié à la présence de végétation.

En utilisant l'équation 1.5, il est donc possible d'exprimer l'équation 1.16 en termes de coefficients de Manning :

$$n_{tot}^2 = n_b^2 + n_v^2 \quad (1.17)$$

avec  $n_{tot}$  le coefficient de Manning total,  $n_b$  le coefficient de Manning du lit sans végétation, et  $n_v$  le coefficient de Manning lié à la présence de végétation. Nous retrouvons donc la décomposition de Morin *et al.* (2000) Dans la suite de cette étude, nous nous basons sur cette décomposition. Le modèle dynamique présenté en équation 1.4 peut donc s'écrire comme suit :

$$\begin{cases} Q(h) = 0 \text{ si } h \leq b \text{ ou } h \leq \kappa \\ Q(h, t) = \frac{1}{\sqrt{n_b^2 + n_v^2(t)}} B \sqrt{S_0} (h(t) - b)^c \text{ si } h > b \text{ ou } h > \kappa \end{cases} \quad (1.18)$$

## 1.2.2 Lois de résistance relatives à la végétation aquatique

Pour comprendre l'impact de la végétation sur l'écoulement, il est essentiel d'évaluer le coefficient  $n_v$  (ou  $f_v$ ). Il existe peu de formules proposées pour estimer ce coefficient de résistance relatif à la végétation aquatique (Petryk et Bosmajian, 1975; Fathi-Maghadam et Kouwen, 1997; Järvelä, 2004; Whittaker *et al.*, 2013; Västilä et Järvelä, 2014; Shields *et al.*, 2017). Au contraire, de nombreux abaques ou formules permettent d'évaluer le coefficient de Manning  $n_b$  d'un lit sans végétation (Meyer-Peter et Müller, 1948; Limerinos, 1970; Arcement et Schneider, 1989; Coon, 1998). Ces formules sont généralement basées sur une analyse de la distribution granulométrique des matériaux constituant le lit ou la surface du lit. Elles sont utilisées et relativement bien acceptées par la communauté hydraulique. La détermination du coefficient  $n_v$  reste encore un sujet ouvert à discussions.

Des abaques de coefficients de Manning pour les rivières végétalisées sont disponibles dans la littérature (Chow, 1959; Barnes, 1967; Coon, 1998; Hicks et Mason, 1999). Ils ont été construits à l'aide de mesures de terrain ou en laboratoire. Les valeurs issues de ces abaques sont valables pour un type de lit de rivière étudié et pour une densité ou type de végétation bien précise. Elles sont généralement non applicables ou peu adaptées pour nos rivières. De plus, nous cherchons à déterminer un coefficient  $n_v$  variable dans le temps selon la croissance de la plante. Les ordres de grandeurs fournis dans ces abaques seront néanmoins utiles pour la validation de notre modèle dynamique.

Nous recherchons des lois de résistance simples et à base physique permettant d'évaluer le coefficient de Manning  $n_v(t)$  ou de Darcy-Weisbach  $f_v(t)$  relatif aux plantes aquatiques. Ces coefficients devront dépendre de paramètres caractéristiques de l'écoulement et des plantes présentes dans le cours d'eau, facilement mesurables sur le terrain ou déterminables a priori. Malheureusement, la plupart des études analysant l'interaction écoulement-plantes n'ont pas été réalisées avec un regard pratique et opérationnel (Aberle et Järvelä, 2013); c'est pourquoi, il nous est difficile de trouver un modèle de résistance applicable aux cas de terrain. La plupart des modèles demandent une connaissance poussée des caractéristiques des plantes (élasticité, taille, taux de croissance).

Historiquement, des lois de résistance pour de la végétation rigide ont été proposées (Petryk et Bosmajian, 1975; Pasche et Rouvé, 1985). Ces lois étaient basées sur l'analogie du cylindre vertical rigide qui montre que la force de traînée  $F_D$  appliquée sur un cylindre vertical augmente avec la vitesse moyenne au carré de l'écoulement ( $F_D \propto U_m^2$ ). Ces

dernières ont vite été critiquées puisque non applicables sur le terrain où la végétation est souvent flexible. Les études scientifiques ont clairement montré une différence de comportement selon la flexibilité de la plante (Aberle et Järvelä, 2013). Par exemple, pour une plante flexible, le coefficient de résistance de Darcy-Weisbach décroît non linéairement avec la vitesse de l'écoulement tandis que pour une plante rigide, celui-ci est quasi constant quelle que soit la vitesse.

Pour approcher plus étroitement le comportement des plantes dans les cours d'eau, des études récentes ont proposé des lois de résistance pour de la végétation flexible ou pour une combinaison de végétation rigide et flexible (Järvelä, 2004; Whittaker *et al.*, 2013; Västilä et Järvelä, 2014). Un distinguo entre le comportement d'un tronçon où la végétation est immergée partiellement (type arbres et arbustes) ou totalement recouverte par l'eau (submergée) a également été fait. En effet, la structure de l'écoulement change considérablement selon les deux cas. Les plantes dites submergées peuvent soit atteindre la surface libre et s'y concentrer (faible taux de submergence) soit rester en profondeur (taux de submergence plus fort et dépendant du rapport  $h_v/h$ , avec  $h_v$  et  $h$  les hauteurs de la plante et de l'eau, respectivement). Dans ce dernier cas, le volume d'eau présent au dessus des plantes doit être pris en compte. Ces lois ont été développées pour des échelles bien spécifiques : feuille, branche, plante entière, patch (regroupement de plantes) ou tronçon végétalisé. Il faut donc veiller à prendre la formule adéquate pour l'étude souhaitée. Dans notre étude, nous nous intéresserons au cas d'une végétation flexible et submergée (taux de submergence faible) et nous nous plaçons à l'échelle de l'ensemble du tronçon.

Dans le cas d'une végétation flexible, la force de traînée  $F_D$  décroît avec une augmentation de vitesse de l'écoulement (Jalonen, 2015). Cette variation avec la vitesse de l'écoulement est due à la capacité de fléchissement de la plante (Kouwen et Fathi-Moghadam, 2000). En effet, pour une meilleure résistance lors d'événements extrêmes, la plante peut se reconfigurer en s'alignant avec le courant mais aussi en se fléchissant pour réduire sa surface frontale directement impactée par l'écoulement (de Langre, 2008). Cette capacité de reconfiguration est prise en compte en introduisant le coefficient de reconfiguration, aussi appelé l'exposant de Vogel  $\chi$ , dans la relation liant la force de traînée et la vitesse :  $F_D \propto U_m^{2+\chi}$ . Ce coefficient décrit le niveau de flexibilité et d'alignement de la plante. Si l'on se place dans le cas de végétation rigide,  $\chi=0$ .  $\chi=-1$  décrit une végétation flexible (de type feuilles d'arbustes). Ce coefficient de reconfiguration  $\chi$  est défini sur l'intervalle  $[0;-2]$ .

L'étude bibliographique montre que les propriétés les plus importantes à prendre en compte lors de la construction d'une loi de résistance due aux plantes sont : la densité de végétation dans l'écoulement variant temporellement et directement liée au cycle de croissance de la plante, l'organisation spatiale des plantes et leur capacité à se reconfigurer sous l'action de l'eau (en d'autres mots leur flexibilité). La densité est souvent représentée dans les modèles par le rapport entre la surface caractéristique de la végétation ( $A_c$ ) et la surface du fond qu'elle occupe  $A_b$ . Généralement, la surface caractéristique est choisie comme la surface frontale soumise à l'écoulement ( $A_p$ ) ou pour les plantes feuillues la surface occupée par les feuilles ( $A_L$ ) ce qui, dans ce cas, donne accès au *Leaf Area Index* ( $LAI = A_L/A_b$ ). Dans notre étude, on suppose que la répartition spatiale des plantes est homogène sur le tronçon étudié, de ce fait nous ne nous intéressons qu'à un seul coefficient de Manning lié aux plantes. Sa dépendance est donc réduite à une dépendance temporelle ( $n_v(t)$ ) et non spatiale. Le modèle proposé par Järvelä (2004) prend en considération



toutes ces propriétés et pourrait être utilisable pour nos études dans une version simplifiée.

Pour établir son équation, Järvelä (2004) repart de la théorie générale qui consiste à dire qu'il est possible, théoriquement, d'estimer la résistance à l'écoulement causée par la végétation aquatique en se basant sur le bilan des forces en régime uniforme (ou graduellement varié) et en faisant l'hypothèse que la force de traînée exercée sur les plantes est la force de traînée dominante. De ce fait, il est possible d'obtenir l'égalité suivante :

$$F_g = F_D \quad (1.19)$$

avec  $F_g = \rho g A_b h S_0$  la force gravitationnelle,  $F_D = 0.5 \rho C_D A_c U_m^2$  la force de traînée exercée sur les plantes,  $A_b$  la surface au fond,  $S_0$  la pente du chenal approchant la pente d'énergie,  $C_D$  le coefficient de traînée,  $U_m$  la vitesse moyenne de l'écoulement.

L'équation 1.19 peut être ré-écrite sous la forme suivante pour faire apparaître la vitesse de cisaillement au fond  $u^*$  ( $u^* = \sqrt{ghS_0}$ ) :

$$u^{*2} = \frac{1}{2} C_D \frac{A_c}{A_b} U_m^2 \quad (1.20)$$

En rappelant que  $U_m/u^* = \sqrt{8/f}$ , on obtient le coefficient de friction de Darcy-Weisbach suivant :

$$f_v = 4C_D \frac{A_c}{A_b} \quad (1.21)$$

La difficulté dans l'estimation de  $f_v$  réside dans l'estimation de  $C_D$  et  $A_c$ .

Järvelä (2004) se base sur l'équation 1.21 pour construire son modèle; son but étant d'améliorer la prise en compte de la densité et de la capacité de déformation de la plante soumise à l'écoulement. Le modèle de Järvelä (2004) s'exprime comme suit :

$$f_v = 4C_{D\chi} \frac{A_L}{A_b} \alpha_b = 4C_{D\chi} LAI \left( \frac{U_m}{U_\chi} \right)^\chi \quad (1.22)$$

avec  $\chi$  le coefficient de reconfiguration de la plante,  $C_{D\chi}$  le coefficient de traînée spécifique de la plante,  $LAI$  le *Leaf Area Index*,  $\alpha_b$  un paramètre prenant en compte les effets de déformations des plantes et  $U_\chi$  une vitesse utilisée pour l'adimensionnalisation du coefficient  $\alpha_b$  généralement prise égale à la vitesse la plus faible du jeu de données.

Pour la densité de la plante, Järvelä (2004) choisit de se focaliser sur la traînée générée par les feuilles et retient donc la surface des feuilles comme surface caractéristique (les plantes de son étude sont de type arbustes/arbres). En effet, il a été montré que la plus grande part de résistance est due aux feuilles lorsque l'on étudie de la végétation de type arbustes. Le  $LAI$  apparaît donc dans l'équation 1.22. Le coefficient de traînée  $C_D$  de l'équation 1.21 devient, quant à lui, spécifique de la plante étudiée dans son modèle (voir équation 1.22) et est noté  $C_{D\chi}$ . Pour prendre en compte les effets de déformation des plantes soumises à un écoulement, il rajoute à l'équation 1.21 un paramètre  $\alpha_b$ . Ce dernier s'exprime comme une fonction puissance de la vitesse moyenne de l'écoulement; la puissance étant égale au coefficient de reconfiguration  $\chi$ .

Récemment, Västilä et Järvelä (2014) ont proposé des modèles plus complexes distinguant l'influence des feuilles de celle de la tige ou du tronc de la plante sur l'écoulement. Dans notre étude, il n'est pas nécessaire d'aller à ce niveau de détails. En effet, nous nous intéressons à des plantes molles, filaires et flexibles que l'on trouve dans les lits mineurs

des cours d'eau et non pas à des plantes de type arbres ou arbustes plutôt présentes dans les lits majeurs. Distinguer deux types d'influence n'est donc pas utile dans notre cas ; la plante est vue dans son ensemble.

Le modèle de Järvelä (2004) est intéressant car il fait intervenir des fonctions simples (puissances), peu de paramètres et est à base physique. Selon Järvelä (2004), il est également facilement utilisable sur des cas de terrain, notamment parce que les paramètres du modèle sont facilement estimables a priori. Ce dernier propose d'ailleurs la procédure suivante pour l'estimation du coefficient de Darcy-Weisbach  $f_v$  sur des cas de terrain (voir aussi la procédure proposée par Västilä et Järvelä (2017)) :

1. Estimer les paramètres  $\chi$ ,  $C_{D\chi}$ , et  $U_\chi$  à l'aide de valeurs présentes dans la littérature ou dans les abaques ; cela revient à estimer des a priori,
2. Déterminer le  $LAI$  (mesure de terrain, littérature, ou laser-scanner terrestre),
3. Se placer dans le cas de hauteur et débit voulu,
4. Résoudre l'équation 1.22.

En réalité, de nos jours, il reste difficile d'obtenir des informations sur la présence de végétation ou non au niveau des stations hydrométriques. Seuls quelques commentaires de la part des jaugeurs par rapport à la végétation sont parfois disponibles sur certaines stations, mais aucune mesure concrète de densité de végétation n'est réalisée (par exemple aucune estimation du  $LAI$ ). Pourtant, des techniques ont été mises au point pour récupérer ce genre d'informations (prélèvements, mesure par imagerie, etc.). Elles restent néanmoins coûteuses et difficiles à mettre en place. De plus, bien souvent nous ne disposons pas de connaissances sur les spécificités des plantes présentes sur la station (donc aucune information par rapport à  $\chi$  et  $C_{D\chi}$ ). Il existe quelques abaques dans la littérature pour certaines espèces de plantes. Malheureusement, bien souvent les plantes présentes sur nos stations d'études sont différentes de celles que l'on peut trouver dans la littérature. Les études précédentes se sont majoritairement intéressées aux plantes présentes sur les plaines d'inondation des rivières et non à celles présentes dans leurs lits mineurs. Il faudrait donc déterminer pour chaque nouvelle plante étudiée les coefficients  $\chi$  et  $C_{D\chi}$  en effectuant des expériences de laboratoire par exemple, à l'image de celles effectuées par Järvelä (2004), ou bien disposer de nombreuses mesures de terrain (jaugeages) pour pouvoir estimer ces paramètres. Le modèle de Järvelä (2004) reste donc encore trop complexe pour nos applications. Dans la suite, nous cherchons à simplifier ce dernier pour qu'il soit utilisable sur nos cas d'étude. Pour ce faire, nous nous appuyons sur l'analyse des données de la station hydrométrique de Ladhof.

## 1.3 Étude du comportement hydraulique d'une station végétalisée : Ladhof

### 1.3.1 Présentation de la station Ladhof

#### 1.3.1.1 Situation

La station étudiée se situe sur l'Ill à l'aval de Colmar au cœur du lieu-dit de Ladhof dans le Haut-Rhin (68) (code station : A1350310, coordonnées en Lambert II étendu :

$X=975792$  et  $Y=2356886$ , coordonnées WGS84 : Lon= $7.384773$  Lat= $48.102498$ , Zéro échelle : 181.3 NGF IGN69 et bassin versant :  $1784\text{ km}^2$ ). La station se trouve en amont du pont de la route D4 (voir Figure 1.1). A l'amont (environ 800 m) et à l'aval (environ 3.6 km) de cette station sont construits un petit barrage et un seuil droit avec une passe à poissons, respectivement. Le seuil ne semble pas contrôler l'écoulement au droit de la station à bas débit. Des digues en rives droite et gauche bien entretenues le long de la station sont également présentes. Au niveau de la station hydrométrique la géométrie de la rivière est assez stable : le fond du lit mineur est relativement plat et le lit majeur bien délimité par les digues. Le fond de la rivière est sableux au niveau de la station.

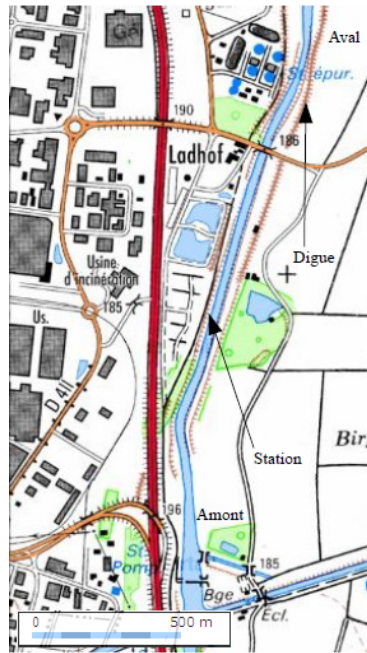


FIGURE 1.1 – Localisation de la station hydrométrique de Ladhof.

### 1.3.1.2 Données à disposition

Des données de hauteur d'eau et de débit sont disponibles sur la banque hydro depuis 1958, l'année de la mise en service de la station. En revanche, seule la période entre 1996 et 2017 sera considérée pour cette étude. En effet, ce n'est que durant cette période que les jaugeages ont été effectués avec un regard sur la végétation (voir les commentaires de la base de données BAREME).

De 1996 au 5/12/2005, de nombreux détarages nets (évolutions soudaines du lit de la rivière) ont été observés sur cette station. La période du 5/12/2005 au 11/11/2013, que l'on appellera période 1 (P1), est, quant à elle, plutôt stable et est caractérisée par une unique courbe de tarage (CT numéro 25 dans la base BAREME). Seules des corrections ponctuelles sur la hauteur ont été apportées sur quelques données durant cette période. Ces déviations par rapport à la CT sont probablement dues à l'évolution saisonnière de la végétation. La période de stabilité P1 dure environ 8 ans ce qui est intéressant pour notre étude car nous permet de multiplier les données d'entrée et de calage. La deuxième période stable (sans détarages nets), que l'on appellera période 2 (P2), se déroule entre le

11/11/2013 et le 13/01/2016. Les périodes P1 et P2 devront être étudiées séparément dans la suite. En effet, seuls les détarages transitoires dus au développement de la végétation seront étudiés ici.

En plus des jaugeages réguliers (hauteur, temps, vitesse moyenne, débit, et commentaires par rapport à la végétation) disponibles dans BAREME, nous disposons du limnigramme de la station sur l'ensemble des périodes considérées (Figure 1.2a). Sur la période 2009-2017, nous avons accès à des données de température de l'eau mesurée au niveau de la station (Figure 1.2b). Des données manquantes sont observées sur certaines périodes et font suite à une défaillance des capteurs de mesure. Grâce à la base de données qui regroupe les ré-analyses SAFRAN, nous avons également accès aux données de température de l'air et de rayonnement incident aux coordonnées de la station hydrométrique pour l'ensemble de nos périodes d'étude (Figures 1.2c et 1.2d). Ces données physiques pourront peut-être être utiles pour expliquer la croissance des plantes.

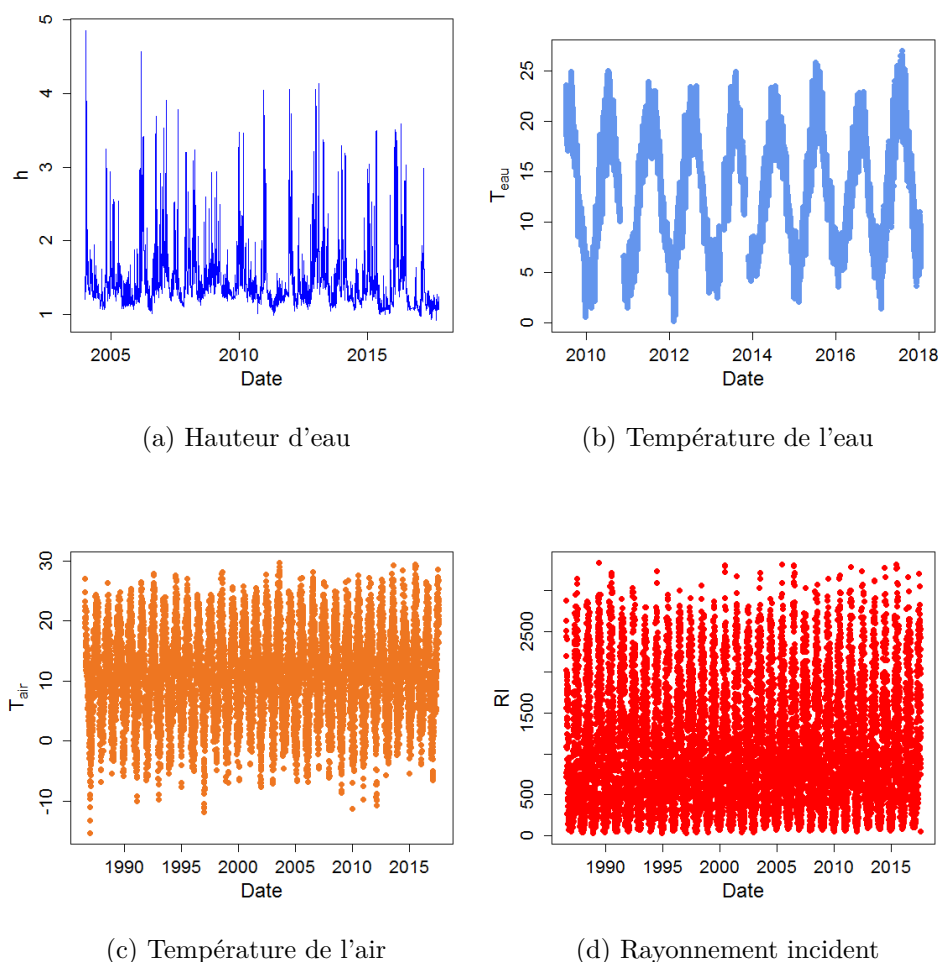


FIGURE 1.2 – Ensemble des données annexes disponibles sur la station de Ladhof : hauteur d'eau [m] (banque hydro), température de l'eau [°C] (station), température de l'air [°C] (SAFRAN) et rayonnement incident [J/cm<sup>2</sup>] (SAFRAN).

### 1.3.1.3 Identification des différents contrôles

Pour définir les contrôles de la station Ladhof, nous nous basons sur un rapport d'expertise de terrain réalisé en 2012 par Irstea à la suite d'une sollicitation de la DREAL Alsace (Bonnifait *et al.*, 2012). Ce dernier avait pour but d'analyser les courbes de tarage de plusieurs stations hydrométriques alsaciennes présentant une importance particulière pour les débits de crue. Pour la station Ladhof, les experts suggèrent 3 contrôles hydrauliques différents pour modéliser le comportement du tronçon. A bas débit ( $h < 2$  m), les avis divergent. Pour certains, la présence du seuil à l'aval semble contrôler l'écoulement dans le lit mineur, pour d'autres le seuil est trop éloigné de la station pour l'impacter. En recoupant les diverses informations à notre disposition, il semblerait que le contrôle soit effectivement de type chenal mais non uniforme (influencé par la section critique en aval). Entre  $2\text{ m} < h < 3\text{ m}$  et à proximité du débordement du lit mineur vers le lit majeur, l'influence du seuil, s'il y en avait une, n'est clairement plus présente et le contrôle devient un contrôle par chenal (lit mineur) que l'on considérera comme rectangulaire. Lorsque le débordement intervient ( $3\text{ m} < h < 5.9\text{ m}$ ), la section d'écoulement change radicalement et le contrôle se transforme en une somme de deux contrôles par chenaux rectangulaires (lit mineur+majeur).

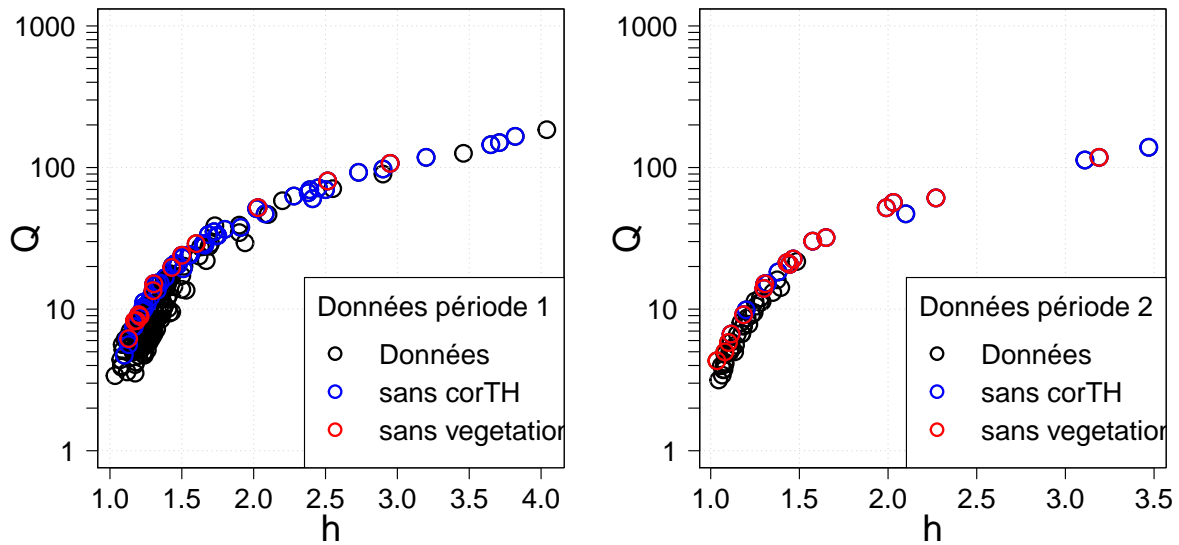
### 1.3.2 Observations de détarages transitoires

L'ensemble des jaugeages effectués sur les périodes 1 et 2 (données issues de la base BAREME) sont présentées sur la Figure 1.3.

A bas débit, une grande dispersion est observée notamment sur la période 1. La dispersion est visible seulement pour des hauteurs inférieures à 2m. Plusieurs hauteurs d'eau ont été mesurées pour un même débit. Cette observation nous permet de trancher par rapport au contrôle hydraulique retenu pour cette gamme de hauteur. Il est peu probable que ces variations sur la courbe des jaugeages à bas débits soient dues à la présence de végétation sur le seuil (mousse). L'hypothèse comme quoi la végétation du chenal influence la courbe de tarage est plus plausible. Le contrôle par section peut donc être exclu au profit d'un contrôle par chenal pour des hauteurs d'eau inférieures à 2m.

En observant la Figure 1.3a, il est facile de conclure que la relation  $h-Q$  n'est pas univoque. Une approche dynamique doit être envisagée pour gérer ce genre de détarages transitoires. Des informations concernant la présence ou non de végétation aquatique dans le lit mineur sont disponibles sur cette station. Elles sont tirées des commentaires renseignés par les jaugeurs lors de certains jaugeages. Les jaugeurs décrivent qualitativement la densité de végétation aquatique présente au fond du lit. Grâce à leur commentaires, les jaugeages effectués sur fond non végétalisé ont été détectés (voir points *sans végétation* sur la Figure 1.3). Les points *sans corTH* également matérialisés sur la Figure 1.3 correspondent à des données jaugées qui n'ont subi aucune correction CORTH a posteriori, donc aucune correction sur la hauteur d'eau. Ils suivent la même relation  $h-Q$  que les points où l'absence de végétation avait été soulignée. Sur les Figures 1.3a et 1.3b, seules les valeurs brutes issues des jaugeages sont reportées ; aucune valeur corrigée n'est présentée.

L'analyse des commentaires des jaugeurs laisse penser que les écarts aux courbes d'origine, que l'on imagine passer à travers les points rouges (*sans végétation*) sur les



(a) Période 1

(b) Période 2

FIGURE 1.3 – Ensemble des données de jaugeages à disposition sur la période P1 et P2 pour la station de Ladhof. Les données où il n’y a pas eu de corrections sur la hauteur (*sans corTH*) et où l’on est sûr qu’il n’y avait pas de végétation au moment du jaugeage (*sans végétation*) sont différenciées des autres.

Figures 1.3a et 1.3b, sont dus à la présence d’herbiers. Nous allons vérifier cette hypothèse dans la suite et quantifier l’impact de leur présence.

### 1.3.3 Mise en évidence de l’influence des plantes sur l’écoulement

#### 1.3.3.1 Comportement de la station sans végétation

Dans un premier temps, nous allons étudier le comportement de la station de Ladhof lorsqu’il n’y a pas de végétation aquatique. Nous allons donc nous intéresser plus précisément aux données issues des jaugeages effectués lorsqu’il n’y avait aucune végétation (information tirée des commentaires des jaugeurs). Les courbes de tarage de base ainsi que leurs incertitudes pour les deux périodes P1 et P2 peuvent être évaluées à l’aide de l’outil *BaRatin* (Le Coz *et al.*, 2014). Grâce aux rapports d’expertise (Bonnifait *et al.*, 2012), les différents contrôles hydrauliques ont été identifiés. Ce sont les mêmes pour les deux périodes.

Les courbes de tarage de base peuvent être décrites comme suit par 3 contrôles différents :

- $h < 2\text{ m}$  : contrôle par chenal rectangulaire large (correspondant au lit d’étiage)

$$Q = a_1(h - b_1)^{c_1} \text{ pour } \kappa > h \geq b_1 \quad (1.23)$$

avec  $a_1 = B\sqrt{S_0}/n_1$ ,  $B$  la largeur du chenal,  $S_0$  la pente du chenal assimilée à la pente d'énergie,  $n_1$  le coefficient de Manning du chenal (lit mineur, lit d'étiage),  $b_1$  l'offset de la courbe (fond du chenal),  $c_1$  l'exposant du contrôle (supposé égal à 1.67),  $\kappa$  la hauteur d'activation du deuxième contrôle.

- $2\text{ m} < h < 3\text{ m}$  : contrôle par chenal avant débordement (lit mineur large et rectangulaire)

$$Q = a_2(h - b_2)^{c_2} \text{ pour } b_3 > h \geq \kappa \quad (1.24)$$

avec  $a_2 = B\sqrt{S_0}/n_2$ ,  $B$  la largeur du chenal,  $S_0$  la pente du chenal assimilée à la pente d'énergie,  $n_2$  le coefficient de Manning du chenal considéré,  $b_2$  l'offset de la courbe,  $b_3$  l'offset du dernier contrôle,  $c_2$  l'exposant du contrôle (supposé égal à 1.67),  $\kappa$  la hauteur d'activation du deuxième contrôle.

- $3\text{ m} < h < 5.9\text{ m}$  : contrôle par chenal large rectangulaire (lit mineur + lit majeur)

$$Q = a_2(h - b_2)^{c_2} + a_3(h - b_3)^{c_3} \text{ pour } h \geq b_3 \quad (1.25)$$

avec  $a_3 = B\sqrt{S_0}/n_3$ ,  $B$  la largeur du chenal considéré (lit majeur),  $S_0$  la pente du chenal considéré,  $n_3$  le coefficient de Manning du chenal considéré,  $c_3$  l'exposant du contrôle du lit majeur ( $c_3$  égal à 1.67).

Lors du calcul des CT de base dans *BaRatin*, il est nécessaire de définir des valeurs a priori (sans prendre en compte les jaugeages) pour les paramètres physiques du modèle  $h-Q$ . Les estimations « a priori » de ces paramètres ainsi que leur valeur a posteriori (en prenant en compte les jaugeages) sont répertoriées dans les tableaux 1.1 et 1.2. Les CT de base accompagnées de leurs incertitudes à 95 % sont présentées sur les Figures 1.4 et 1.5 pour les périodes 1 et 2, respectivement. Les jaugeages utilisés sont ceux qui ont été effectués en l'absence de végétation (voir Figure 1.3). Par chance, ils couvrent une large gamme de hauteurs d'eau (des faibles hauteurs jusqu'au débordement).

<b>Contrôle 1</b>	a priori	a posteriori
$a_1$	14.0±14	38.6±4.5
$b_1$	0.5±0.5	0.77±0.05
$c_1$	1.67±0.05	1.68±0.02
<b>Contrôle 2</b>	a priori	a posteriori
$a_2$	19.8±20.1	19.7±4.1
$b_2$	2.0±0.5	1.95±0.2
$c_2$	1.67±0.05	1.67±0.03
<b>Contrôle 3</b>	a priori	a posteriori
$a_3$	15.8±19.4	11.5±8.7
$b_3$	3.0±0.5	3.1±0.2
$c_3$	1.67±0.05	1.67±0.02

TABLE 1.1 – Paramètres a priori et a posteriori de la CT d'origine de la période 1

<b>Contrôle 1</b>	a priori	a posteriori
$a_1$	$14.0 \pm 14$	$43.2 \pm 3.0$
$b_1$	$0.5 \pm 0.5$	$0.79 \pm 0.03$
$c_1$	$1.67 \pm 0.05$	$1.67 \pm 0.02$
<b>Contrôle 2</b>	a priori	a posteriori
$a_2$	$19.8 \pm 20.1$	$16.6 \pm 2.9$
$b_2$	$2.0 \pm 0.5$	$1.8 \pm 0.1$
$c_2$	$1.67 \pm 0.05$	$1.68 \pm 0.02$
<b>Contrôle 3</b>	a priori	a posteriori
$a_3$	$15.8 \pm 19.4$	$22.1 \pm 8.7$
$b_3$	$3.0 \pm 0.5$	$2.9 \pm 0.3$
$c_3$	$1.67 \pm 0.05$	$1.65 \pm 0.02$

TABLE 1.2 – Paramètres a priori et a posteriori de la CT d'origine de la période 2

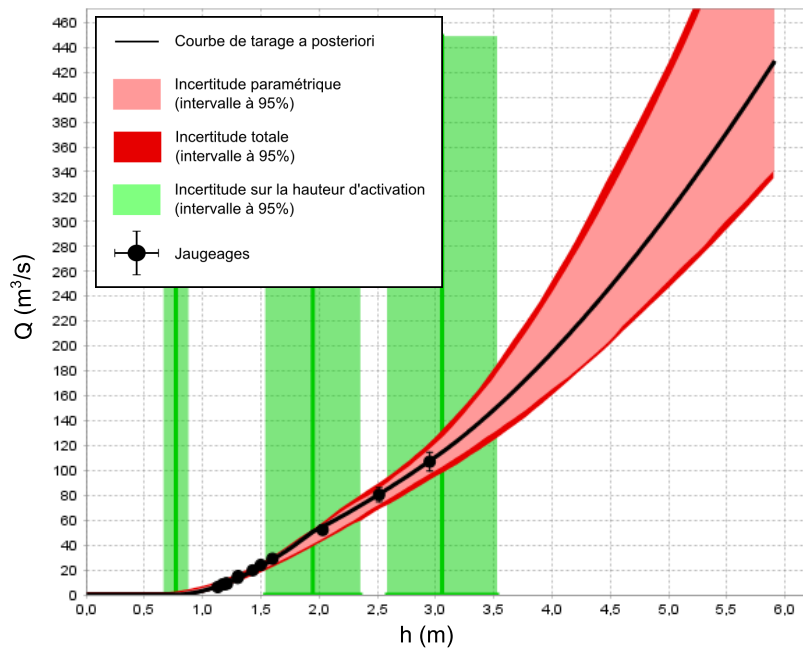


FIGURE 1.4 – Courbe de tarage d'origine (sans végétation) pour la période 1 calculée avec la méthode *BaRatin* dans l'outil *BaRatinAGE*.



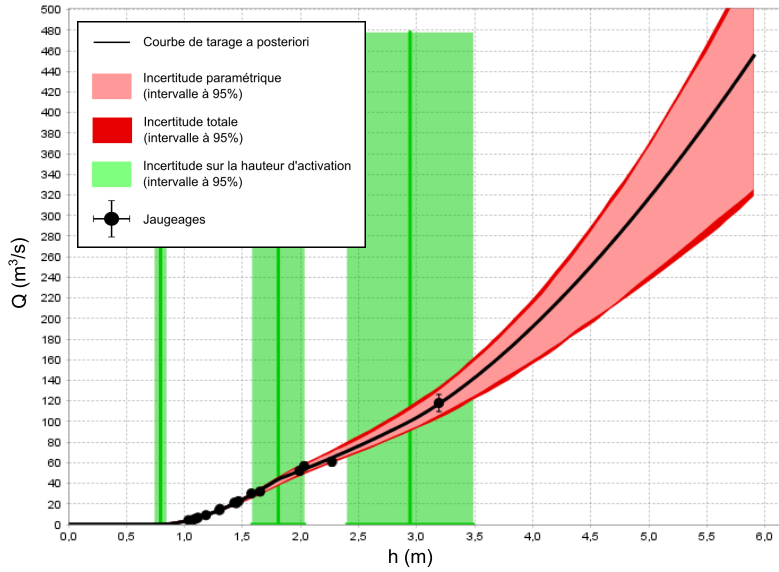


FIGURE 1.5 – Courbe de tarage d’origine (sans végétation) pour la période 1 calculée avec la méthode *BaRatin* dans l’outil *BaRatinAGE*.

Dans la suite de l’étude, nous nous intéresserons seulement à la végétation aquatique dans le lit mineur ; seuls les jaugeages caractérisant le premier contrôle ( $0 < h < 2$  m) seront donc utilisés. L’analyse des paramètres des CT de base nous permet de déduire les coefficients de Manning dans le cas où il n’y a pas de végétation dans le lit mineur pour les deux périodes :  $n_{bP1}$  et  $n_{bP2}$ . Ces derniers représentent uniquement la résistance relative au lit considéré et à ses formes de fond. Le coefficient  $n_1$ , déduit du paramètre  $a_1 = B\sqrt{S_0}/n_1$ , peut être assimilé au coefficient  $n_b$  présenté dans la partie 1.2.1. En supposant  $S_0 = 0.001$  et  $B = 25$  m (valeurs estimées à partir de mesures réalisées dans le rapport d’expertise), on trouve  $n_{bP1} = 0.0205 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$  et  $n_{bP2} = 0.0183 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ , respectivement pour les périodes 1 et 2, soit des coefficients de Strickler équivalents de  $K_{P1} = 48.8 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  et  $K_{P2} = 54.6 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ . Ces valeurs sont cohérentes avec celles rencontrées dans d’autres rivières sableuses. Ces coefficients de Manning pourront ensuite être comparés à ceux calculés à partir des autres jaugeages effectués en présence de végétation aquatique. Leur comparaison permettra de souligner l’importance de prendre en compte la végétation lorsque l’on analyse le comportement hydraulique d’une telle station.

### 1.3.3.2 Évolution cyclique de la résistance à l’écoulement totale du lit mineur

A l’aide de l’ensemble des jaugeages effectués sur les périodes d’étude dans la gamme de hauteur  $0 < h < b_2$  ( $b_2 = 1.95$  m pour P1 et 1.8 m pour P2) et des courbes de tarage d’origine calculées précédemment, il est possible d’évaluer la dynamique temporelle du coefficient de Manning total pour le lit mineur  $n_{tot}$ . Ce coefficient de résistance englobe toutes les résistances à l’écoulement du chenal (voir équation 1.26).

$$n_{tot} = \frac{B\sqrt{S_0}(h_j - b_1)^{c_1}}{Q_j} \quad (1.26)$$

avec  $Q_j$  et  $h_j$  le débit et la hauteur mesurés lors de la campagne de jaugeage, respectivement. Les valeurs pour  $b_1$  et  $c_1$  sont tirées des Tableaux 1.1 et 1.2 selon la période considérée.

La Figure 1.6 montre la variation du coefficient  $n_{tot}$  sur l'ensemble des deux périodes. On remarque qu'au sein d'une année,  $n_{tot}$  peut varier considérablement avec le temps et est souvent plus élevé que la valeur  $n_b$  qui représente un état sans végétation. Une évolution cyclique est nettement observée. La variation de la rugosité hydraulique totale est sans doute due à la présence de végétation et à son développement suivant les saisons. Il est néanmoins important de vérifier que cet excès de résistance est due à la présence de la végétation aquatique. D'une année à l'autre, la valeur maximale pour  $n_{tot}$  diffère mais semble toujours être située en été. Ceci est cohérent avec le fait que la plante est à son maximum de croissance en été et donc génère un maximum de résistance durant cette période.

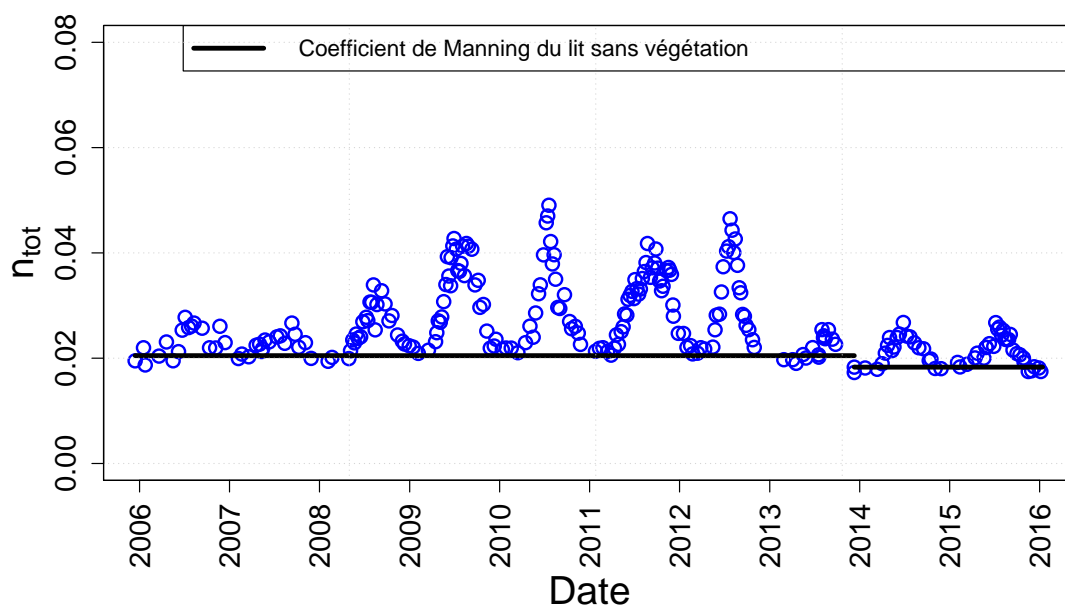


FIGURE 1.6 – Évolution cyclique de la résistance à l'écoulement totale du lit mineur durant les deux périodes.

### 1.3.3.3 Evolution cyclique de la résistance à l'écoulement liée à la végétation

L'excès de résistance par rapport à un cas sans végétation (par rapport à  $n_b$ ) peut être calculé à l'aide de la décomposition suivante (voir section 1.2.1) :

$$n_{excès}^2 = n_{tot}^2 - n_b^2 \quad (1.27)$$

Nous cherchons à identifier d'où provient cet excès de résistance à l'écoulement qui fait varier la résistance totale. Au vu des commentaires des jaugeurs au niveau de cette station, nous pensons que ce dernier est lié à la présence des plantes dont la croissance est rythmée par les saisons.

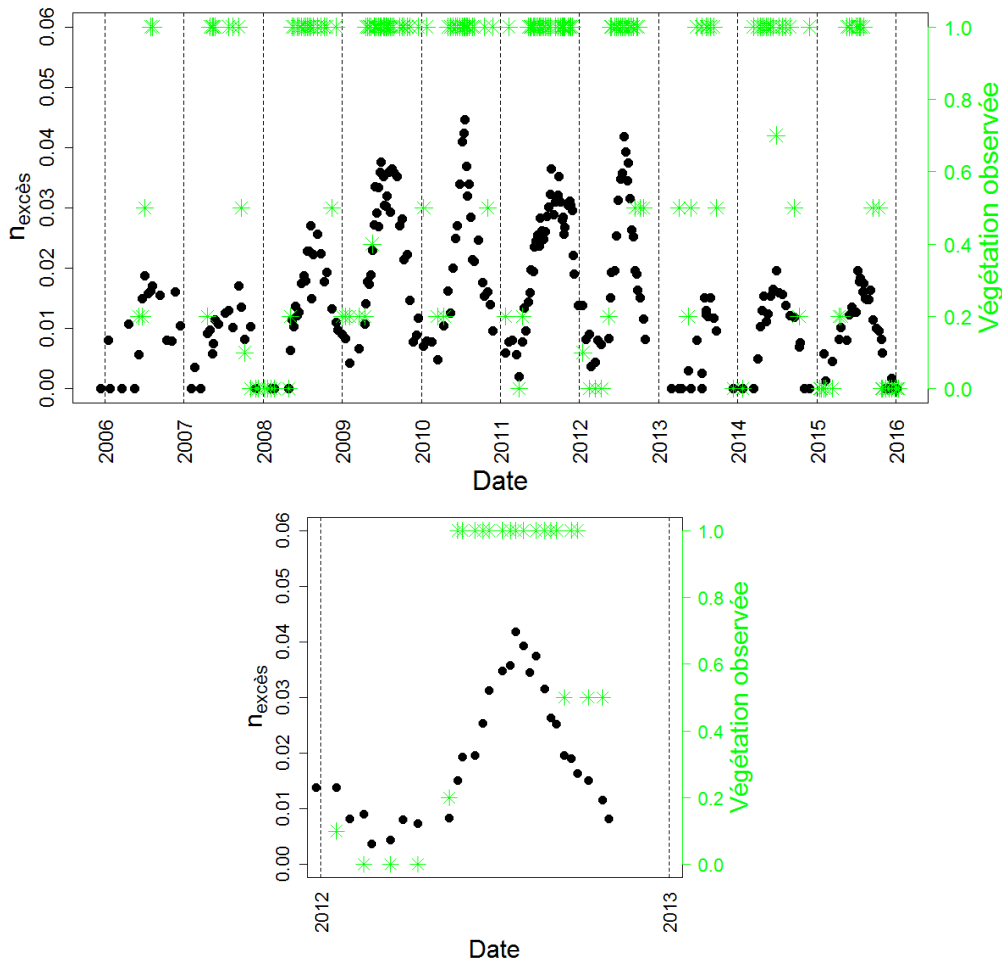


FIGURE 1.7 – Évolution temporelle de l'excès de résistance par rapport à la résistance du lit sans végétation. Les valeurs indicatrices déduites de l'analyse des commentaires des jaugeurs sur la présence ou non de végétation sont ajoutées sur ce graphique pour comparaison. Un zoom sur l'année 2012 est présenté.

La Figure 1.7, comparant la composante  $n_{excès}$  avec les observations visuelles des jaugeurs faites sur la végétation, nous montre que celle-ci peut être assimilée à une résistance due à la présence de végétation. Les observations visuelles tirées des commentaires des jaugeurs ont été reportées sur la Figure 1.7 à l'aide de valeurs indicatrices représentant la densité de végétation présente sur le chenal (1 = herbiers clairement identifiés, 0.7, 0.5 ou 0.4 = quelques herbiers observés et pas totalement développés, 0.2 ou 0.1 = herbiers au début de leur croissance et 0 = lit sans végétation). L'apparition de l'excès de résistance coïncide avec l'apparition d'herbiers dans le chenal. Les valeurs de  $n_{excès}$  augmentent ensuite avec la pousse des plantes représentée par des valeurs indicatrices plus fortes (voir Figure 1.8). Ces constatations nous permettent d'affirmer que l'augmentation du coefficient de Manning total du lit mineur est due à la présence de végétation qui se développe au cours du temps. Il est donc important de prendre en compte la croissance et le développement des plantes lorsque l'on veut rendre compte de la dynamique hydraulique de

cette station. On en déduit donc que  $n_{excès} = n_v$ .

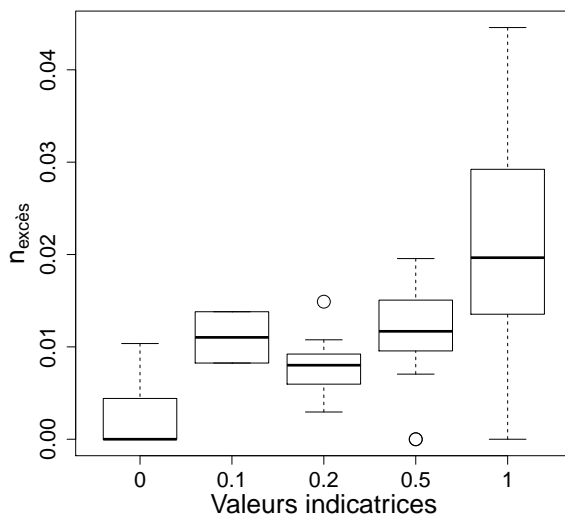


FIGURE 1.8 – Distributions des valeurs  $n_{excès}$  selon les valeurs indicatrices représentant un état de pousse de plantes au niveau de la station étudiée.

L'évolution de  $n_v$  semble cyclique et de période 1 an (voir Figure 1.9 montrant l'évolution de  $n_v$  en fonction des jours de l'année pour la période 1). Une tendance saisonnière est observée, avec des valeurs plutôt faibles voir nulles en hiver puis une augmentation rapide au printemps suivie par des valeurs maximales en été puis une diminution de ces dernières à l'approche de l'hiver. Les valeurs maximales changent selon les années mais l'évolution générale reste la même. Ce type d'évolution cyclique est en adéquation avec le développement biologique des plantes, qui lui, suit le cycle solaire. Le fait que l'évolution de  $n_{excès}$  suive la pousse et le déclin des plantes nous conforte dans l'idée que  $n_{excès}$  puisse être assimilée à  $n_v$ .

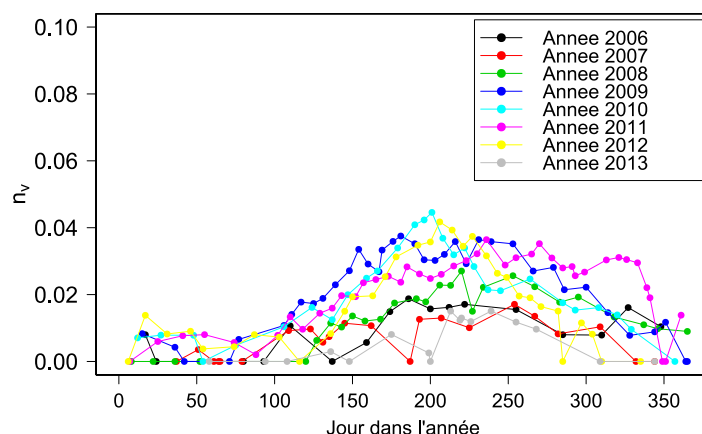


FIGURE 1.9 – Evolution annuelle du coefficient de Manning lié aux plantes pour la période 1 sur la station de Ladhof (du 05/12/2005 au 11/11/2013).

### 1.3.3.4 Mise en évidence du phénomène de fléchissement des plantes

Lorsque l'on observe  $n_{excès}$  à une échelle de temps plus réduite, il est possible de distinguer des diminutions ponctuelles de l'excès de résistance (voir exemple pour l'année 2010 sur la Figure 1.10). Ces diminutions coïncident avec des augmentations ponctuelles de la vitesse de l'écoulement. Ceci constitue une autre preuve que l'excès de résistance est dû à la présence de végétation dans le lit. Sur Ladhof, les plantes sont filamenteuses et très flexibles. Elles sont donc soumises au phénomène de fléchissement/alignement. Pour se protéger lors d'événements à fortes vitesses, ces dernières vont se fléchir et s'aligner dans la direction de l'écoulement pour réduire leur surface impactée par le fluide. De ce fait, la rugosité hydraulique, et donc  $n_v$ , va diminuer ponctuellement et ne plus suivre la tendance générale imposée par la croissance de la plante. Une fois l'épisode de fortes vitesses terminé, la plante va se redresser et continuer sa croissance ( $n_v$  ré-augmente). Dans le cas étudié, les jaugeurs indiquent que les plantes ne sont ni détruites ni arrachées par les crues; ceci est cohérent avec l'évolution de  $n_v$  observée.

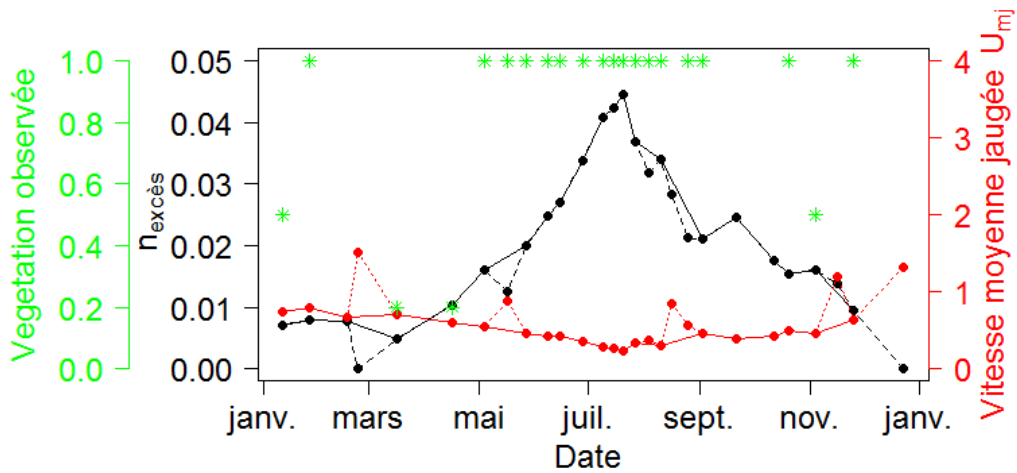


FIGURE 1.10 – Comparaison de l'évolution de l'excès de résistance avec la chronique temporelle des vitesses jaugées et des observations fournies par les jaugeurs pour l'année 2010. Les parties en pointillés des courbes soulignent les passages où les plantes sont soumises aux phénomènes de fléchissement.

## 1.4 Modèle de résistance hydraulique due aux plantes

L'étude du comportement hydraulique de la station de Ladhof (section 1.3) et la revue de la littérature (section 1.2), nous ont permis de conclure que la variable clé à expliciter pour estimer le débit sur un site végétalisé était le coefficient  $n_v(t)$  (équation 1.18).

L'analyse des données de la station de Ladhof a montré que la croissance de la plante et sa capacité de fléchissement pilotait l'évolution du coefficient  $n_v$ . Ces conclusions sont les mêmes que celles avancées par Järvelä (2004). Utiliser son modèle pour estimer la résistance due aux plantes semble donc judicieux. En revanche, comme expliqué précédemment (voir section 1.2.2), ce dernier reste encore trop complexe pour être appliqué

directement sur des cas réels. Dans cette section, nous présentons et proposons un modèle simplifié du modèle de Järvelä (2004) pour le calcul du coefficient de Manning lié aux plantes  $n_v$ .

La formule de Järvelä (2004) peut être vue comme une combinaison de deux fonctions, l'une décrivant l'impact de la croissance de la plante sur  $f_v$ , nommée  $g(t)$  ( $g$  pour *growth*), et l'autre décrivant l'impact du fléchissement des plantes sur  $f_v$  (*bending*) :

$$f_v(t) = g(t) \times U_m^\chi(t) \quad (1.28)$$

avec  $g(t)$  un proxy/indicateur de la croissance des plantes étudiées exprimé comme suit :

$$g(t) = \frac{4C_{D\chi}LAI}{U_\chi^\chi} \quad (1.29)$$

Nous ne chercherons pas à exprimer chaque paramètre de  $g(t)$  mais considérerons cette variable dans son ensemble. Sa dimension est homogène à des  $[m/s]^{-\chi}$ .

Le modèle simplifié pour le coefficient de Manning lié aux plantes aquatiques devient donc :

$$n_v^2(t) = \frac{g(t)U_m^\chi(t)(h(t) - b)^{1/3}}{8g_r} \quad (1.30)$$

avec  $g_r$  la gravité et  $b$  la hauteur échelle du fond du chenal.

Pour utiliser ce modèle simplifié, nous devons donc être en mesure :

- d'avoir de l'information quant à la croissance de la plante  $g(t)$ ,
- d'avoir accès à la variation temporelle de la hauteur d'eau (souvent mesurée au niveau de la station),
- d'être capable d'évaluer la flexibilité de la plante (modélisée par  $\chi$ ),
- de disposer de la variation temporelle de la vitesse moyenne de l'écoulement.

Ce dernier point est souvent manquant car difficile à mesurer en temps réel. On verra par la suite comment contourner ce problème dans notre modèle (voir section 2.1.1). Le suivi temporel de la croissance des plantes n'est généralement pas effectué sur les stations hydrométriques. L'utilisation d'un proxy de la croissance de la plante est donc nécessaire pour utiliser le modèle simplifié de l'équation 1.30. La partie suivante décrit une méthode pour avoir accès à ce genre d'indicateur de croissance.

## 1.5 Sous-modèle de croissance de la plante

Une estimation de la croissance de la plante  $g(t)$  est nécessaire pour estimer la résistance due aux plantes (voir équation 1.30). Le cas où nous avons accès à l'évolution temporelle de la densité de la végétation ou de la biomasse est très rare. Le calcul direct de  $g(t)$  est donc généralement impossible (équation 1.29). Pour pallier cela, il est nécessaire d'avoir recours à des proxys de croissance calculés à partir de modèle de croissance de plante. Dans cette section, nous montrons la méthode retenue pour obtenir ces proxys dans le cas de Ladhof. L'évolution des plantes sur cette station est analysée avant d'être comparée à des paramètres physiques jugés importants pour le développement de la végétation. Une revue de la littérature sur les modèles de croissance des plantes existants est ensuite présentée. Enfin un modèle simplifié pour estimer la croissance de la plante est proposé puis testé sur le cas de Ladhof.

## 1.5.1 Évaluation de la croissance de la plante pour la station Ladhof

### 1.5.1.1 Calcul du proxy de croissance

Nous sommes capables de déterminer un proxy de croissance  $g(t)$ , grâce à l'analyse des jaugeages, à des informations a priori sur la flexibilité des plantes et à la version simplifiée de la formule de Järvelä (2004) (voir équation 1.28). Le proxy de croissance au moment du jaugeage,  $g_j$ , est ainsi calculé comme suit :

$$g_j = \frac{f_{v,j}}{U_{m,j}^{\chi_j}} \quad (1.31)$$

avec  $f_{v,j}$  la valeur du coefficient de Darcy-Weisbach relatif à la végétation calculé au moment des jaugeages (déduit de  $n_v = n_{excès}$  estimé dans la partie 1.3.3.3),  $\chi_j$  le coefficient de reconfiguration hypothétique au moment des jaugeages et  $U_{m,j}$  la vitesse moyenne jaugée :

$$U_{m,j} = \frac{Q_j}{B(h_j - b_1)}. \quad (1.32)$$

avec  $Q_j$  le débit jaugé,  $h_j$  la hauteur d'eau jaugée,  $B$  la largeur du chenal et  $b_1$  l'offset de la CT d'origine calculé dans la partie 1.3.3.1.

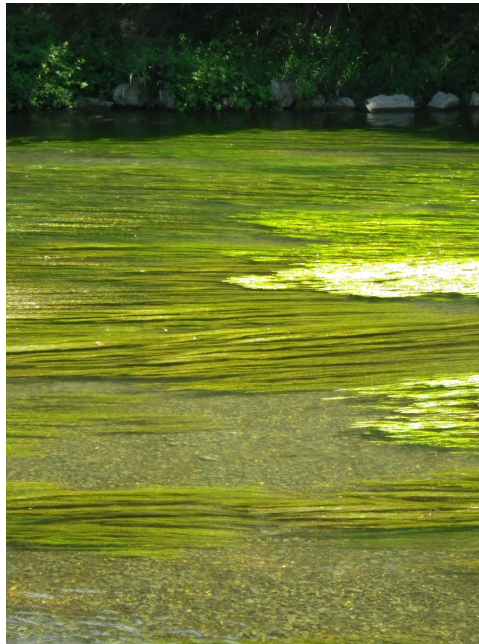


FIGURE 1.11 – Type de végétation présente au niveau de la station de Ladhof.

Selon les gestionnaires de rivières, les espèces de plantes présentes au niveau de la station de Ladhof n'ont pas changé au cours des années. Elles sont très filamenteuses et flexibles (voir Figure 1.11). Nous supposons que leur coefficient de reconfiguration  $\chi$  approche celui de feuillages (très flexibles). Des valeurs pour différents types de feuillages sont fournies dans l'étude de Västilä et Järvelä (2017). En moyenne,  $\chi = -1.11$  pour ces

feuilles ( $\chi$  varie entre -0.97 et -1.21). On choisit donc de fixer  $\chi_j$  à -1.11 pour le calcul des proxys de croissance.

La Figure 1.12 montre l'évolution du proxy croissance déduit des jaugeages sur l'ensemble des deux périodes étudiées. L'évolution annuelle et cyclique due à la croissance des plantes est bien retrouvée (voir Figure 1.13).

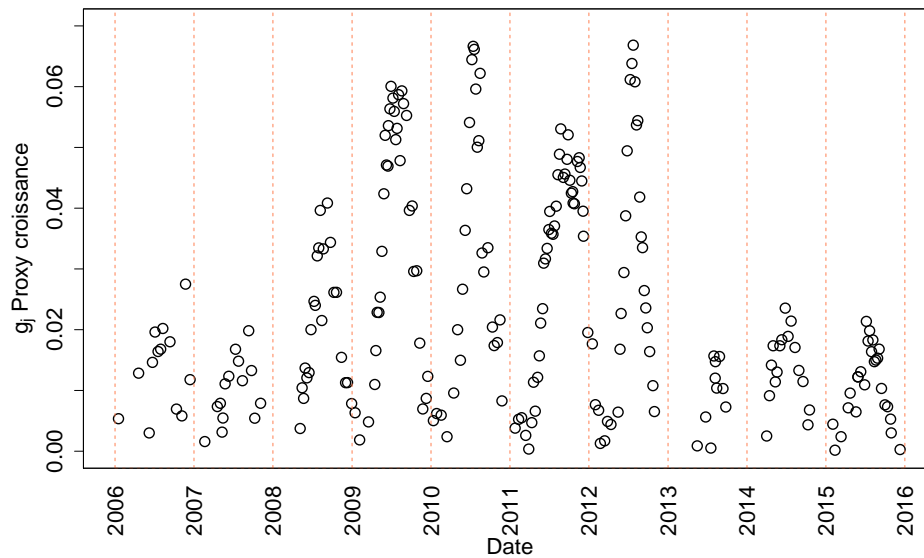


FIGURE 1.12 – Évolution du proxy de croissance sur l'ensemble des deux périodes étudiées.

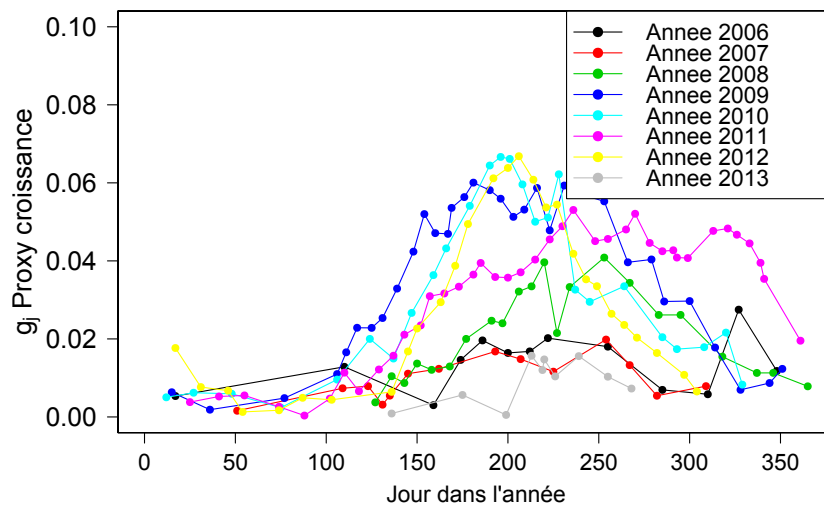


FIGURE 1.13 – Évolution du proxy croissance à l'échelle annuelle pour l'ensemble des années de la période 1 (du 05/12/2005 au 11/11/2013).



### 1.5.1.2 Comparaison entre le proxy de croissance et les paramètres physiques mesurables

L'évolution du proxy de croissance est comparée à celle d'autres paramètres physiques tels que la température de l'eau, de l'air et le rayonnement incident arrivant en surface de la zone étudiée. Le but est de détecter d'éventuelles tendances ou corrélations entre ces évolutions. Nous serons alors en mesure de juger de la pertinence de prendre en compte ces paramètres dans un modèle de croissance.

La Figure 1.14 compare l'évolution du proxy croissance avec la température de l'eau  $T$  exprimée en [°C], la température de l'air  $T_a$  exprimée en [°C], et le rayonnement incident  $RI$  exprimé en [J/cm<sup>2</sup>] pour les années 2009 à 2012. Ces années sont représentatives des évolutions observées durant la période 1. Pour plus de lisibilité, les fluctuations relatives aux chroniques temporelles de  $T$ ,  $T_a$  et  $RI$  sont lissées grâce à un modèle sinusoïdal :

$$X(t) = X_{moy} + X_{amp} \cos\left(\frac{2\pi}{P}(t + t_0)\right) \quad (1.33)$$

avec  $X$  la variable que l'on cherche à modéliser,  $X_{moy}$  et  $X_{amp}$  sa moyenne et son amplitude sur la période considérée, respectivement,  $P$  la période considérée (ici, 365 jours ce qui correspond à la période du cycle solaire),  $t$  le temps en jours et  $t_0$  le décalage par rapport à l'origine des temps ; ce dernier correspond au moment où la variable atteint son maximum durant l'année ( $t_0 = t[X = X_{max}]$ ).

Les cumuls de température de l'eau  $T_c$ , d'air  $T_{ac}$  ou de rayonnement incident  $RI_c$  sont ajoutés sur la Figure 1.14. Si l'on se fie aux études effectuées sur les plantes terrestres, ces paramètres sont souvent plus parlants que les données brutes pour décrire le développement de la plante. En effet, les plantes terrestres poussent de manière cumulative et par étapes. Au-dessus d'un certain seuil de température cumulée reçue par la plante, celle-ci croît puis au bout d'un autre seuil, elle décroît. Par exemple, pour la température de l'eau, le cumul est calculé comme suit :

$$\begin{cases} DJ[i] = T[i] - T_{base} \\ T_c[i] = T_c[i - 1] + DJ[i] \end{cases} \quad (1.34)$$

avec  $T_c$  la température de l'eau cumulée,  $i$  l'indice du jour considéré,  $DJ$  le degré jour,  $T_{base}$  la température de l'eau de base en dessous de laquelle la plante ne peut pas se développer (généralement ces valeurs sont issues de tests biologiques, ici, pour la température de l'eau, on supposera  $T_{base}=6^\circ\text{C}$ ).

L'évolution de ces paramètres physiques semble en adéquation avec celle de la croissance de la plante (Figure 1.14). La courbe de croissance n'est cependant pas toujours en phase avec les courbes de température ou de rayonnement ; un déphasage est identifiable. Ce déphasage n'est pas régulier au fur et à mesure des années (avances et retards observés). Pour information, les pics de chroniques de température de l'eau se produisent toujours autour du 200<sup>ème</sup> jour si l'on analyse les données sur les deux périodes P1 et P2 (du 198<sup>ème</sup> jour pour la température de l'air et du 173<sup>ème</sup> jour pour le rayonnement incident) tandis que ceux de croissance varient entre le 178<sup>ème</sup> et le 236<sup>ème</sup> jours (voir Figure 1.15). L'observation des chroniques brutes de température ou de rayonnement ne permet donc pas de déduire l'ensemble des informations quant à l'évolution de la croissance de la plante. Ceci est cohérent avec la théorie biologique qui stipule que les valeurs cumulées sont plus significatives pour rendre compte du développement des plantes que les valeurs brutes.

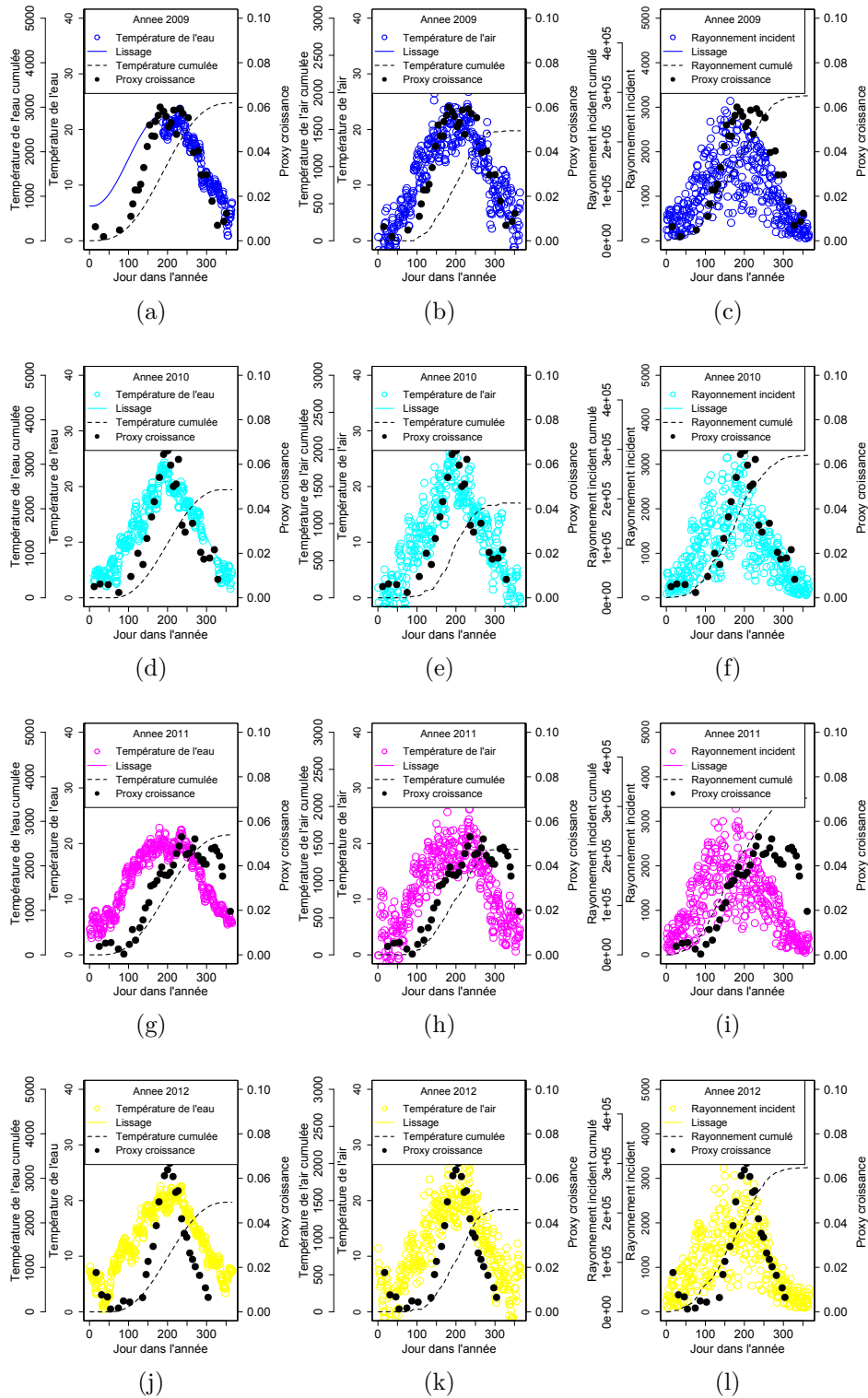


FIGURE 1.14 – Comparaisons entre l'évolution du proxy de croissance et celle de la température de l'eau, de la température de l'air et du rayonnement incident pour quelques années de la période 1. Les cumuls de températures et de rayonnement sont ajoutés sur ces figures.

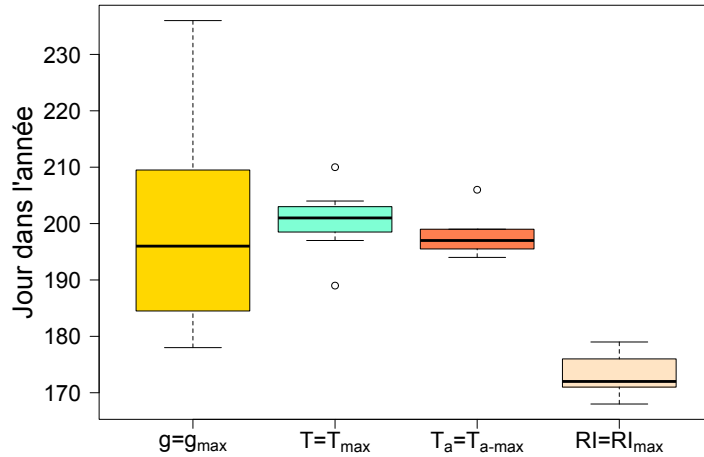


FIGURE 1.15 – Analyses statistiques (boxplot) sur les jours où le proxy croissance atteint le proxy de croissance maximal de l’année, où la température lissée de l’eau égale la température de l’eau maximale de l’année, où la température lissée de l’air égale la température de l’air maximale de l’année et où le rayonnement incident atteint le rayonnement incident maximal de l’année. Analyses faites sur les périodes P1 et P2.

La Figure 1.16 montre que le pic de croissance se produit souvent autour d’une même valeur de variable cumulée annuellement, à savoir proche de  $1327^{\circ}\text{C}$  cumulés pour la température de l’eau (avec une température de base de  $6^{\circ}\text{C}$  lors du cumul), proche de  $724^{\circ}\text{C}$  cumulés pour la température de l’air (avec une température de base de  $10^{\circ}\text{C}$  lors du cumul) et proche de  $199\,698\text{J}/\text{cm}^2$  cumulés pour le rayonnement incident (avec un rayonnement incident de base de  $300\text{J}/\text{cm}^2$  lors du cumul). Les valeurs cumulées pour le rayonnement incident correspondant au moment où l’on atteint le pic de croissance sont plus dispersées que celles liées à la température de l’air ou de l’eau. On retiendra donc la température de l’eau (ou de l’air) cumulée comme paramètre physique à mesurer pour aider à estimer la croissance de la plante. Le rayonnement incident cumulé semble néanmoins être le seul à pouvoir expliquer le comportement des plantes durant l’année 2011. La croissance de la plante a été particulièrement longue cette année-là et le rayonnement cumulé a atteint des valeurs singulières et hautes. Les plantes ont été soumises à beaucoup de lumière ce qui a sans doute facilité leur croissance.  $RI_c$  est dans le cas de Ladhof probablement très corrélé au rayonnement incident cumulé arrivant sur la plante (dans l’eau) du fait d’une eau relativement peu turbide. Nous n’avons cependant aucune donnée pour vérifier cette hypothèse. Il a été prouvé que le rayonnement arrivant sur la plante est l’un des facteurs les plus importants, contrôlant son développement (Carr *et al.*, 1997). La plupart du temps, le lien entre les deux types de rayonnements dont on réfère ci-dessus est complexe (ex : en eau chargée, lorsque les plantes masquent d’autres plantes, en zones ombragées). Comme la mesure du rayonnement cumulé au niveau des plantes est rare et difficile, nous choisissons de nous focaliser sur la température de l’eau cumulée qui est plus simple à obtenir en pratique.

L’observation des cumuls de température de l’eau nous montre également que la croissance de la plante semble souvent débuter lorsque cette dernière a été soumise à un cumul

d'environ 200°C (cumul effectué pour des températures supérieures à 6°C). L'analyse de la Figure 1.13 nous montre que ces conditions sont souvent retrouvées autour du 100<sup>ème</sup> jour de l'année.

Nous n'avons trouvé aucun lien entre les paramètres physiques et la valeur de la croissance maximale de l'année. Nous ne sommes pas en mesure d'expliquer la variation de ce paramètre.

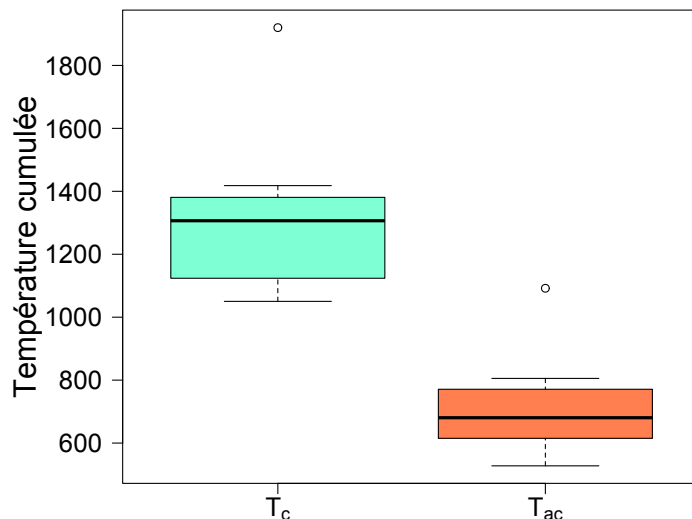


FIGURE 1.16 – Analyses statistiques (boxplot) sur les valeurs cumulées pour les températures de l'eau et de l'air correspondant au moment où l'on atteint le pic de croissance (proxy) de l'année. Analyses faites sur l'ensemble des deux périodes considérées dans l'étude.

## 1.5.2 Revue de la littérature - Modèle de croissance des plantes

De nombreux modèles de croissance pour les plantes terrestres sont proposés dans la littérature; ceux concernant les plantes aquatiques sont plus rares (Carr *et al.*, 1997). La plupart demandent un nombre minimum de mesures de l'évolution de la plante non négligeable pour pouvoir être calé. D'autres s'appuient sur la mesure de paramètres physiques pour calculer l'évolution de la biomasse de la plante (ex : mesure du rayonnement incident, de la température de l'eau, des nutriments de types nitrates et/ou phosphates et de l'oxygène dissous). Ces derniers sont souvent complexes et font appel à de nombreuses mesures annexes, donc difficiles à mettre en place sur le terrain. Les mesures annexes les plus courantes effectuées au niveau des stations hydrométriques sont la température de l'eau ou de l'air. Nous cherchons donc à développer un modèle de croissance basé sur la température de l'eau. Cette dernière impacte plus directement le développement de la plante que celle de l'air.

La température, jugée par divers auteurs comme l'un des paramètres les plus importants contrôlant le développement de la plante, a été au centre de nombreuses études (Yan et Hunt, 1999; Brière *et al.*, 1999; van der Heide *et al.*, 2006). L'un des premiers modèles

température/croissance est celui des degrés-jours. Il suppose qu'en dessous d'une température de base, la croissance de la plante ne peut pas démarrer. Lorsque la température atteint des valeurs supérieures à cette température de base, la croissance a lieu et le taux de croissance est supposé varier linéairement avec la température (Tollenaar *et al.*, 1979). Ce modèle a été au fur et à mesure des années critiqué et amélioré. En effet, le modèle de degré jour ne permet pas de distinguer la croissance de la plante de son déclin qui peut être observé lorsque la température atteint une température maximale égale à sa température d'extinction. De ce fait des modèles bilinéaires ont été développés (Olsen *et al.*, 1993), à savoir un modèle linéaire décrivant la croissance et un modèle linéaire décrivant la décroissance de la plante. Cependant, ces modèles ne considèrent pas d'éventuelles variations de taux de croissance en fonction des températures imposées à la plante. Ils ne prennent pas en compte le fait qu'une plante atteint son taux de croissance maximal pour une température optimale donnée. Certains auteurs ont donc proposé des modèles multi-linéaires pour approcher plus précisément ces variations de taux de croissance (Coelho et Dale, 1980). Ces derniers font apparaître de nombreux paramètres de calage et sont donc difficiles à utiliser de manière pratique. Pour pallier les changements abrupts liés aux modèles linéaires et prendre en compte ces variations de taux de croissance, des modèles de types exponentiel et polynomial ont ensuite été proposés. Ils ont permis d'approcher le comportement des plantes à faible température (croissance lente) mais restent peu adaptés pour modéliser leur comportement à forte température. Le nombre de paramètres à estimer reste raisonnable pour ce genre de modèle. Pour finir, des modèles utilisant une distribution beta (sigmoïde) ont été proposés et semblent fournir un bon compromis pour représenter l'évolution de la croissance de la plante en fonction de la température (Yin *et al.*, 1995; Yan et Hunt, 1999; Yin *et al.*, 2003). Dans ce cas, le taux de croissance de la plante suit une courbe unimodale en forme de cloche, avec une montée et descente asymétriques. A faible température, la croissance est faible, puis lorsqu'on approche une température optimale elle devient maximale. A l'approche de la température d'extinction la croissance est réduite avant de commencer la phase de déclin de la plante.

Adams *et al.* (2017) comparent et analysent 12 modèles différents (O'Neill *et al.*, 1972; Johnson *et al.*, 1974; Spain, 1982; Ratkowsky *et al.*, 1983; Thébault, 1985; Room, 1986; Lactin *et al.*, 1995; Brière *et al.*, 1999; Yan et Hunt, 1999; van der Heide *et al.*, 2006; Deutsch, 2008) décrivant la relation température-croissance pour des plantes tropicales avec pour but d'évaluer les meilleurs modèles (Figure 1.17). Un modèle est défini comme bon et utilisable s'il permet à la fois une bonne approximation des données (best fit) et s'il est construit à l'aide de paramètres physiques facilement déterminables (modèle à base physique). Le modèle de Yan et Hunt (1999), qui est en réalité une version simplifiée du modèle de Yin *et al.* (1995), est celui qui respecte le mieux ces critères de choix selon Adams *et al.* (2017).

Le modèle de Yin *et al.* (1995) (leur équation 8b) relie le taux de croissance des plantes  $GR$  (pour *Growth rate*) en fonction de la température  $T$  et s'exprime comme suit :

$$GR = \left[ GR_{max} \left( \frac{T_e - T}{T_e - T_m} \right) \left( \frac{T - T_b}{T_m - T_b} \right)^{\frac{T_m - T_b}{T_e - T_m}} \right]^{\delta} \quad (1.35)$$

avec  $T_b$  la température de base à partir de laquelle la croissance est possible,  $T_m$  la température induisant le taux de croissance maximal appelée température optimale,  $GR_{max}$  le

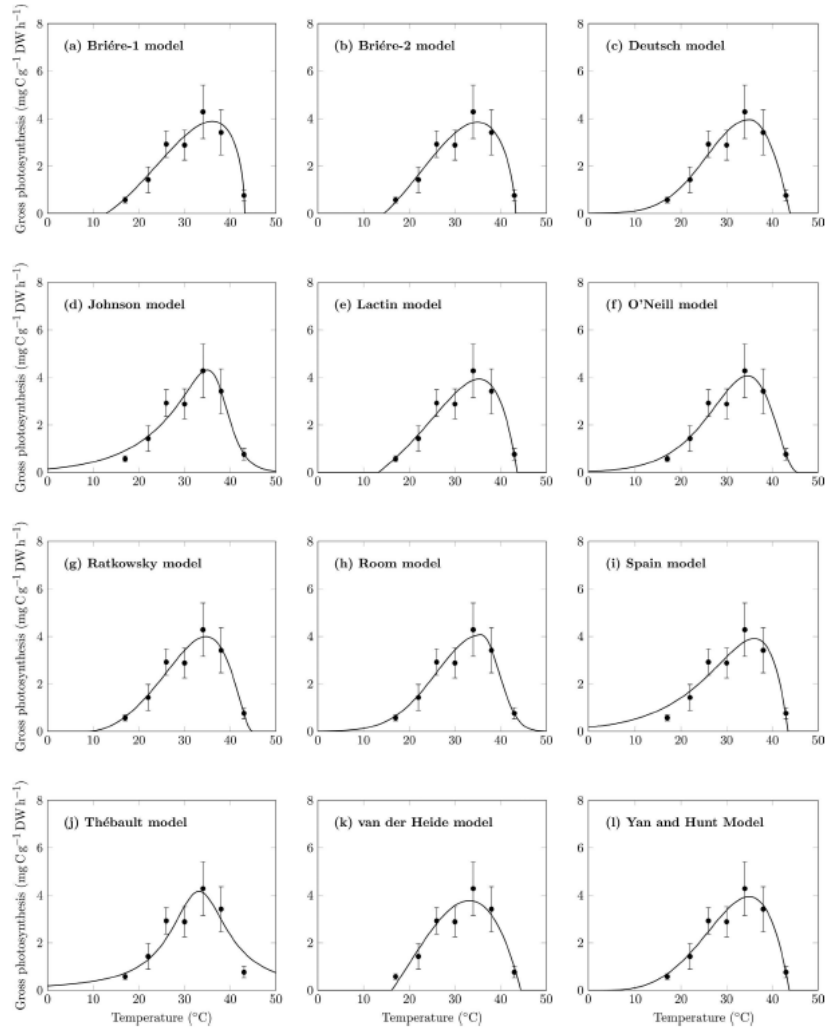


FIGURE 1.17 – Comparaison des 12 modèles choisis par Adams *et al.* (2017) pour approcher la courbe de croissance/température de la plante *C.serrulata* à Green Island (côte Est de l’Australie) en été (figure tirée de l’étude d’Adams *et al.* (2017)).

taux de croissance maximal qui est atteint quand  $T = T_m$ ,  $T_e$  la température enclenchant le déclin de la plante appelée température d’extinction et  $\delta$  un exposant définissant la courbure de la courbe de croissance (il est généralement supposé égal à 1, voir Yan et Hunt (1999); nous ferons cette hypothèse pour la suite de notre étude).

Par analogie avec le modèle taux de croissance/température de Yin *et al.* (1995), Yin *et al.* (2003) ont proposé un modèle taux de croissance - temps :

$$GR = GR_{max1} \left( \frac{t_e - t}{t_e - t_m} \right) \left( \frac{t - t_b}{t_m - t_b} \right)^{\frac{t_m - t_b}{t_e - t_m}} \quad (1.36)$$

avec  $t$  le temps,  $t_b$  le temps à partir duquel la plante commence à croître (démarrage de la croissance),  $t_m$  le temps où le taux de croissance maximum est obtenu appelé temps optimal,  $GR_{max1}$  le taux de croissance maximum qui a lieu au temps  $t_m$  et  $t_e$  le temps correspondant à la fin de la croissance de la plante (extinction, début du déclin).

Dans ce cas (équation 1.36), le taux de croissance n’est plus exprimé à l’aide de tem-

pératures caractéristiques mais à l'aide de temps caractéristiques. En intégrant l'équation 1.36 dans le temps, il est possible d'obtenir l'évolution temporelle de la biomasse de la plante  $w(t)$ .

### 1.5.3 Modèle de croissance retenu

#### 1.5.3.1 Le modèle

Grâce à l'analyse du cas test de Ladhof et la revue de la littérature, nous sommes en mesure de proposer un modèle permettant d'estimer la croissance des plantes aquatiques.

Au niveau des stations hydrométriques, nous ne disposons d'aucune information sur le taux de croissance de la plante. En revanche, des informations sur la croissance même de la plante sont disponibles de manière directe (vraies mesures biomasses) ou indirecte (proxys calculés à partir des jaugeages). Nous faisons l'hypothèse que les proxys de croissance  $g(t)$  vont se comporter de la même manière que les vraies mesures de biomasse au cours du temps  $w(t)$ . Les valeurs de  $g(t)$  ne sont pas nécessairement comparables à celles de  $w(t)$ , mais leurs évolutions temporelles sont similaires. Pour obtenir un modèle de croissance  $w(t)$  il est nécessaire d'intégrer dans le temps le taux de croissance ( $GR = dw/dt$ ) dans la formulation proposée par Yin *et al.* (2003) (équation 1.36).

Yin *et al.* (2003) ont proposé de faire l'hypothèse que  $t_b=0$  pour simplifier leur équation lors de l'intégration, c'est-à-dire de supposer que la croissance de la plante débute au jour 0. Au vu de l'analyse des données de la station hydrométrique de Ladhof, cette hypothèse n'est pas valable pour nos applications. En effet, il a été montré dans la partie 1.5.1.2 que la croissance de la plante démarrait toujours au moment où la température cumulée atteignait 200°C environ et autour du 100<sup>ème</sup> jour (cumul effectué sur les températures supérieures à 6°C). Nous choisissons donc d'intégrer l'équation suivante :

$$w(t) = \int \frac{dw(t)}{dt} = \int GR_{max1} \left( \frac{t_e - t}{t_e - t_m} \right) \left( \frac{t - t_b}{t_m - t_b} \right)^{\frac{t_m - t_b}{t_e - t_m}} \quad (1.37)$$

Après intégration, le modèle ci-dessous est obtenu :

$$w(t) = \frac{GR_{max1}}{t_e - t_m} \left( \frac{t - t_b}{t_m - t_b} \right)^p (t - t_b) \left[ \frac{(p+2)t_e - (p+1)t - t_b}{(p+2)(p+1)} \right] \quad (1.38)$$

avec

$$p = \frac{t_m - t_b}{t_e - t_m} \quad (1.39)$$

Supposons à présent, que la biomasse maximale,  $w_{max}$ , est atteinte lorsque  $t = t_e$ . Nous pouvons ainsi déduire l'expression de  $w_{max}$  :

$$w_{max} = \frac{GR_{max1}}{t_e - t_m} \left( \frac{t_e - t_b}{t_m - t_b} \right)^p (t_e - t_b) \left[ \frac{t_e - t_b}{(p+2)(p+1)} \right] \quad (1.40)$$

En comparant les équations 1.38 et 1.40, nous obtenons le modèle de croissance suivant :

$$w(t) = w_{max} \left( \frac{t - t_b}{t_e - t_b} \right)^{\frac{t_e - t_b}{t_e - t_m}} \left[ \frac{(p+2)t_e - (p+1)t - t_b}{t_e - t_b} \right] \quad (1.41)$$

En réécrivant ce modèle et en faisant l'analogie avec le proxy de croissance  $g(t)$ , on obtient :

$$g(t) = g_{max} \left( \frac{t - t_b}{t_e - t_b} \right)^{\frac{t_e - t_b}{t_e - t_m}} \left[ \frac{(p + 2)t_e - (p + 1)t - t_b}{t_e - t_b} \right] \quad (1.42)$$

Soit :

$$g(t) = g_{max} \left( \frac{t - t_b}{t_e - t_b} \right)^{\frac{t_e - t_b}{t_e - t_m}} \left[ \frac{2t_e - t_m - t}{t_e - t_m} \right] \quad (1.43)$$

Le modèle présenté ci-dessus est le modèle retenu (équation 1.43). Il peut être décomposé en deux parties : **A** et **B** ; la partie **A** modélise la croissance et la partie **B** modélise le déclin. La Figure 1.18 permet de visualiser l'allure du modèle retenu et représente l'évolution temporelle schématique du proxy de croissance ainsi que l'évolution temporelle du taux de croissance. Selon le modèle, la croissance de la plante prend fin lorsque  $t = 2t_e - t_m$ . Ensuite, l'indicateur de biomasse est fixé arbitrairement à zéro.

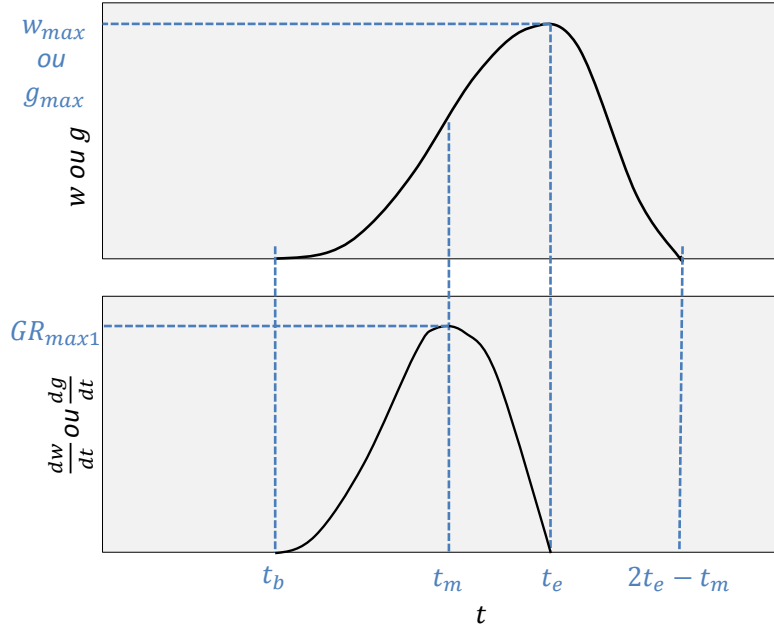


FIGURE 1.18 – Représentation schématique du sous-modèle de croissance retenu. La figure du haut représente l'évolution temporelle de la biomasse tandis que la figure du bas montre l'évolution temporelle du taux de croissance. Les temps caractéristiques et importants du modèle sont également indiqués.

Grâce à l'analyse du cas de Ladhof, nous avons remarqué que les temps caractéristiques  $t_b$ ,  $t_m$  et  $t_e$  semblaient être plus facilement estimables en utilisant les données de température (eau ou air) et leurs cumuls. Ces temps semblent corrélés à des valeurs seuils de cumuls de température de l'eau et peuvent être définis comme suit :

- le temps  $t_b$  correspond au moment où la plante a été soumise à suffisamment de degrés cumulés pour débuter sa croissance, en d'autres mots au temps où la température cumulée atteint une valeur déclenchant le début de la croissance de la plante ( $T_{cb}$ ).

$$t_b = t[T_c = T_{cb}] \quad (1.44)$$



- le temps  $t_m$  est atteint au moment où la température de l'eau atteint la température optimale pour la croissance de la plante,

$$t_m = t[T = T_m] \quad (1.45)$$

- le temps  $t_e$  correspond au moment où la température atteint une température cumulée maximale ( $T_{ce}$ ) que la plante peut supporter avant de commencer son déclin,

$$t_e = t[T_c = T_{ce}] \quad (1.46)$$

Les valeurs seuils de cumuls de température sont sans doute propres à l'espèce de plante étudiée. Voici celles obtenues pour un cumul sur les températures de l'eau dans le cas de Ladhof :

$$\begin{cases} t_b = t[T_c \approx 200^\circ\text{C}] \\ t_e = t[T_c \approx 1327^\circ\text{C}] \end{cases} \quad (1.47)$$

### 1.5.3.2 Application du modèle sur le cas de Ladhof

Les valeurs de proxy de croissance au moment des jaugeages  $g_j$  sont approchées par le modèle de croissance proposé, décliné en 2 façons et reporté sur la Figure 1.19 : le modèle de Yin *et al.* (2003) dans sa version étendue comme présenté dans ce document (équation 1.43, courbe verte) et le modèle de Yin *et al.* (2003) comme présenté dans son étude c'est-à-dire en supposant que  $t_b = 0$  lors de l'intégration (courbe verte pointillée).

La Figure 1.19 présente l'application du modèle de croissance sur nos données pour la période de 2009 à 2013. L'observation des résultats nous permet de juger de la performance des modèles de croissance. Le modèle de Yin *et al.* (2003) étendu semble le plus adapté pour approcher nos données. L'allure de la courbe de croissance (forme, asymétrie) est bien décrite par le modèle bien que le pic soit souvent sous-estimé. La comparaison entre le modèle de Yin *et al.* (2003) et le modèle étendu souligne l'importance de prendre en compte  $t_b$ , c'est-à-dire l'importance de ne pas considérer que la plante démarre sa croissance au jour 0. Il semblerait que le modèle pourrait même être amélioré en considérant une masse de plante au départ du cycle non nulle (i.e à  $t=0$  ou  $t = t_b$ ,  $w \neq 0$ ). Cette hypothèse pourrait peut-être permettre une meilleure approche du comportement de l'année 2012 par exemple.

La Figure 1.20 montre l'utilisation du modèle de Yin (2003) étendu sur la période de 2009 à 2016 pour le cas de Ladhof. La modélisation commence en 2009 avec les premières mesures de températures de l'eau et non pas au début de la période P1, où les mesures de température de l'eau sont inexistantes. Les proxys de jaugeages sont dans l'ensemble bien reproduits par le modèle.

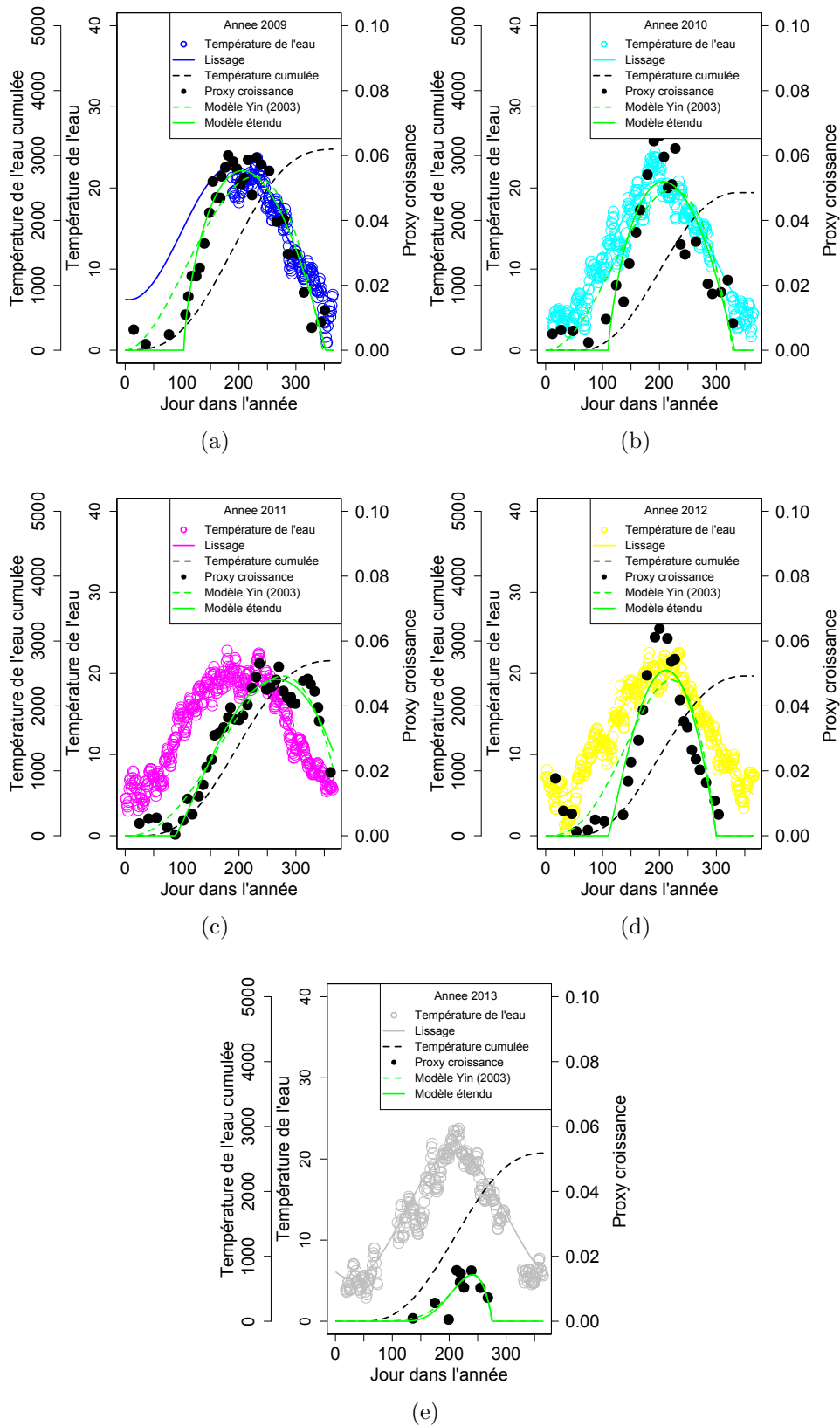


FIGURE 1.19 – Application du modèle de croissance retenu sur nos proxys de croissance estimés pour la période de 2009 à 2013 (période 1).

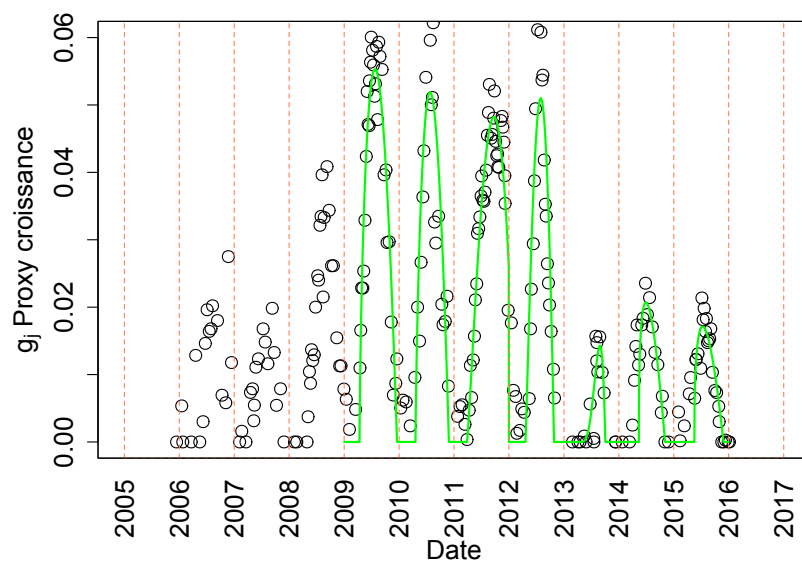


FIGURE 1.20 – Approche du proxy croissance avec le modèle étendu sur la période de 2009 à 2016.

# Chapitre 2

## Intégration du modèle dynamique proposé dans *BaM*

Le modèle dynamique proposé et développé dans la section 1.2.1 (équation 1.18) est intégré dans le code *BaM* (pour *Bayesian Modeling*). Le code *BaM* permet à partir d'un modèle défini (en l'occurrence ici le modèle dynamique) de calculer une ou plusieurs variables de sortie à partir d'une ou plusieurs variables d'entrée (Renard, 2017). Le modèle défini dépend d'un certain nombre de paramètres qui sont généralement inconnus et qui seront estimés par la méthode bayésienne. Nous allons donc écrire le modèle de courbe de tarage dynamique avec le formalisme requis pour *BaM* (Figure 2.1).

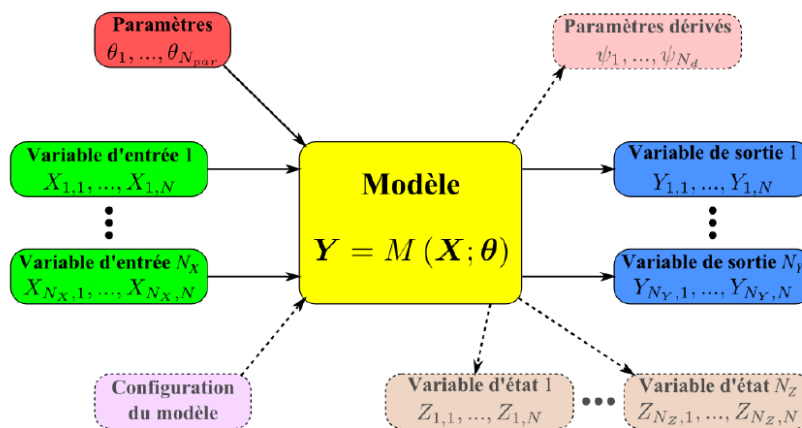


FIGURE 2.1 – Schématisation de l'objet *modèle* selon le formalisme du code *BaM* (figure tirée du rapport de Renard (2017)).

## 2.1 Formulation mathématique du modèle

### 2.1.1 Le modèle

Le modèle de courbe de tarage dynamique proposé s'écrit de la façon suivante :

$$Q(h, t) = \frac{1}{\sqrt{n_b^2 + n_v^2(t)}} B \sqrt{S_0} [h(t) - b]^c \quad (2.1)$$

avec  $Q$  le débit,  $n_b$  le coefficient de Manning du lit en l'absence de végétation,  $n_v$  le coefficient de Manning relatif à la présence de végétation,  $t$  le temps,  $B$  la largeur du chenal,  $S_0$  la pente d'énergie assimilée à la pente du chenal,  $h$  la hauteur d'eau,  $b$  l'offset du contrôle et  $c$  l'exposant du contrôle.

Pour rappel, ce modèle peut être utilisé si et seulement si les conditions suivantes sont respectées :

- le contrôle hydraulique peut être assimilé à un contrôle par chenal rectangulaire large ;
- aucune obstruction dans le chenal n'est observée ;
- la végétation présente dans le chenal est flexible et immergée.

En remplaçant,  $n_v(t)$  par le modèle simplifié présenté en partie 1.4, le modèle devient :

$$Q(h, t) = \frac{1}{\sqrt{n_b^2 + \frac{g(t)U_m^\chi(t)[h(t) - b]^{1/3}}{8g_r}}} B \sqrt{S_0} [h(t) - b]^c \quad (2.2)$$

avec  $g$  le proxy croissance,  $U_m$  la vitesse moyenne,  $g_r$  la gravité et  $\chi$  le coefficient de reconfiguration.

On remarque que ce modèle peut être réécrit comme le produit d'un débit non-influencé par la végétation  $Q_0$  et de l'influence de la végétation qui modifie la rugosité du chenal :

$$Q(t) = Q_0(t) \left( 1 + \frac{n_v^2(t)}{n_b^2} \right)^{-1/2} \quad (2.3)$$

Soit :

$$Q(t) = Q_0(t) \left( 1 + \frac{g(t)U_m^\chi(t)[h(t) - b]^{1/3}}{8g_r n_b^2} \right)^{-1/2} \quad (2.4)$$

avec :

$$Q_0(t) = \frac{B \sqrt{S_0}}{n_b} (h(t) - b)^c \quad (2.5)$$

Pour calculer le débit il nous faut donc la chronique temporelle de hauteur  $h(t)$  (données mesurées en continu), la chronique de croissance de la plante  $g(t)$  (modélisée) ainsi que celle de vitesse moyenne  $U_m(t)$ . Les données de vitesse ne sont généralement pas mesurées en continu ; seuls des jaugeages effectués régulièrement sur les stations sont disponibles. Pour pallier ce manque d'information, nous allons remplacer cette vitesse par le débit divisé par la section mouillée du tronçon étudié dans l'équation 2.4. Dans notre cas, la section mouillée n'est pas impactée par la présence de végétation. Dans d'autres cas, la section d'écoulement peut être réduite à cause de plantes se développant sur les berges qui

viennent obstruer l'écoulement. En faisant l'hypothèse d'un chenal rectangulaire large, on obtient le modèle suivant :

$$Q(t) = Q_0(t) \left( 1 + \frac{g(t)[h(t) - b]^{\frac{1}{3}-x}}{8g_r n_b^2 B^x} Q^x(t) \right)^{-1/2} \quad (2.6)$$

ou encore :

$$Q(t) = Q_0(t) [1 + \gamma(t) Q^x(t)]^{-1/2} \quad (2.7)$$

avec

$$\gamma(t) = \frac{g(t)[h(t) - b]^{\frac{1}{3}-x}}{8g_r n_b^2 B^x} \quad (2.8)$$

Le débit apparaît des deux côtés de l'équation 2.7. Malheureusement, il n'existe pas de solution explicite. On peut cependant démontrer qu'il existe une unique solution sur l'intervalle  $[0; Q_0]$ . Il est donc possible de résoudre l'équation suivante avec l'algorithme de Newton-Raphson par exemple (implémenté dans *BaM*) :

$$Q^2 + \gamma Q^{2+x} - Q_0 = 0 \quad (2.9)$$

## 2.1.2 Les sous-modèles

Pour les sous-modèles de croissance de la plante, trois formulations vont être proposées, toutes basées sur l'expression présentée dans la section 1.5.3 (équation 1.43). Elles font intervenir différents paramètres plus ou moins faciles à estimer a priori. Le choix de la formulation sera laissé à l'utilisateur selon l'étude qu'il réalise et selon la quantité d'informations dont il dispose sur les propriétés de croissance des plantes.

### 2.1.2.1 Le sous-modèle *Growth Yin1*

$$g(t) = g_{max} \left( \frac{t - t_b}{t_e - t_b} \right)^{\frac{t_e - t_b}{t_e - t_m}} \left[ \frac{t_f - t}{t_f - t_e} \right] \quad (2.10)$$

avec  $t_f = 2t_e - t_m$  le temps final correspondant au moment où le cycle de croissance se termine (plantes mortes).

Ce sous-modèle est complet et non simplifié par rapport à celui présenté en équation 1.43. Dans ce cas, l'estimation du temps  $t_m$  peut poser problème car celui-ci peut survenir avant  $t_b$  ou après  $t_e$  dans la phase de déclin. Son estimation sera donc impossible et le code ne fonctionnera pas. Lorsque l'on manque de données, il peut être également difficile de détecter ce temps qui correspond au point d'inflexion de la courbe de croissance (annulation de la dérivée seconde de la courbe de croissance). C'est pourquoi, parfois, il peut être nécessaire d'avoir recours à des modèles de croissance simplifiés comme ceux présentés ci-après.

### 2.1.2.2 Le sous-modèle *Growth Yin2*

$$g(t) = g_{max} \left( \frac{t - t_b}{t_e - t_b} \right)^\alpha \left[ \frac{t_f - t}{t_f - t_e} \right] \quad (2.11)$$

avec  $\alpha = (t_e - t_b)/(t_e - t_m)$

Ce modèle est simplifié par rapport au précédent. Il n'est plus nécessaire d'estimer le temps optimal  $t_m$  ; seul le paramètre  $\alpha$  représentant la courbure de la courbe de croissance est à estimer. En guise de vérification de l'estimation des paramètres du modèle, il est possible d'estimer en tant que paramètre dérivé la température optimale estimée par le modèle et de la comparer si possible à des valeurs de la littérature. Pour des plantes aquatiques, il est généralement montré que la température optimale se trouve autour de 16.5°C. Pour avoir accès à ce paramètre dérivé, il faut déterminer le temps  $t_m$  qui permet d'annuler la dérivée seconde du sous-modèle et regarder la température associée à ce temps.

La dérivée s'exprime comme suit :

$$g'(t) = -g_{max} \left[ \frac{\left(\frac{t-t_b}{t_e-t_b}\right)^\alpha [(\alpha + 1)t - \alpha t_f - t_b]}{(t_f - t_e)(t - t_b)} \right] \quad (2.12)$$

La dérivée seconde s'exprime de la manière suivante :

$$g''(t) = g_{max} \left[ \frac{\alpha \left(\frac{t-t_b}{t_e-t_b}\right)^\alpha [(\alpha + 1)t + (1 - \alpha)t_f - 2t_b]}{(t_f - t_e)(t - t_b)^2} \right] \quad (2.13)$$

Le temps optimal vérifiant  $g''(t) = 0$  se déduit de l'équation suivante :

$$t_m = \frac{2t_b + (\alpha - 1)t_f}{\alpha + 1} \quad (2.14)$$

### 2.1.2.3 Le sous-modèle *Growth Yin3*

$$g(t) = g_{max} \left(\frac{t - t_b}{t_e - t_b}\right)^{\frac{t_e - t_b}{t_f - t_e}} \left[ \frac{t_f - t}{t_f - t_e} \right] \quad (2.15)$$

Pour obtenir ce nouveau sous-modèle, nous avons utilisé la relation  $t_f = 2t_e - t_m$ , où  $t_f$  est le temps final du cycle de croissance. Cette dernière nous permet d'évincer du sous-modèle le temps de croissance optimale  $t_m$  pouvant être difficile à estimer a priori et pouvant parfois poser des problèmes dans le calcul numérique. Le modèle *Growth Yin3* se base cette fois-ci sur l'estimation de la durée de décroissance de la plante définie par  $t_f - t_e$ . Cette information peut parfois être déduite de l'analyse des commentaires des jaugeurs.

## 2.2 Description du modèle avec le formalisme de *BaM*

L'exécution du code *BaM* est contrôlée par plusieurs fichiers de configuration. Ces derniers sont au format texte et doivent être modifiés par l'utilisateur selon le modèle choisi. Dans cette partie, nous allons nous intéresser seulement au formalisme associé au modèle dynamique de végétation proposé. Différents paramètres ou données doivent être renseignés dans ces fichiers pour que le modèle soit utilisable.

La Figure 2.1 rappelle la structure et le fonctionnement d'un modèle dans *BaM*. Dans la suite, nous allons définir l'ensemble des éléments constituant l'objet modèle étudié :

– **Identifiant du modèle** : *Vegetation*

– **Variables d'entrée** :

- le temps  $t$ ,
- la hauteur  $h(t)$ ,
- la température de l'eau brute  $T(t)$ ,
- la température de l'eau lissée  $T_s(t)$ .

Dans ce modèle le nombre de variables d'entrée est de 4 ( $N_X=4$ ). Ces données d'entrée seront à renseigner sous forme d'un tableau de données dans un fichier texte qui sera lu lors de l'exécution.

Le temps est défini par convention en années (i.e. 0 correspond au premier jour de la première année, 1 au premier jour de la seconde année, etc.). Attention : les années doivent être complètes et contiguës. C'est à l'utilisateur de définir au préalable le début de l'année adéquat pour le cycle de végétation.

La température de l'eau brute sert à calculer les cumuls de température utilisés dans les sous-modèles de végétation pour estimer les temps de début de croissance et d'extinction (début du déclin de la plante).

La température lissée, quant à elle, est demandée pour évaluer la température optimale qui nous permet de déduire le temps où le taux de croissance de la plante est à son maximum. Un signal non bruité permet de déterminer avec plus de précision le moment où l'on atteint réellement cette température optimale. Nous verrons, par la suite, que cette dernière n'est pas toujours utile.

– **Variables de sortie** :

- le débit  $Q(t)$ ,
- le cycle adimensionnel de la croissance de la végétation  $g_0(t)$ , avec  $g_0(t) = g(t)/g_{max}$
- le cosinus du cycle exprimé comme un angle :  $\cos [\eta_0(t)]$ , avec  $\eta_0(t) = \pi g_0(t)$ ,
- le sinus du cycle exprimé comme un angle :  $\sin [\eta_0(t)]$ .

Le nombre de variables de sortie est de 4 ( $N_Y=4$ ). Les valeurs jaugées de ces variables de sortie pourront être renseignées au préalable dans le même fichier de données que celui des variables d'entrée.

Le cycle de végétation adimensionnel ainsi que sa correspondance en termes d'angles  $\eta_0$  sont illustrés sur la Figure 2.2. Il est parfois plus facile d'exprimer l'angle du cycle que la valeur  $g_0$ . En effet, il est rare d'avoir à disposition des données quantitatives sur la croissance de la plante. Il est plus fréquent de disposer d'indications permettant de statuer si la plante est dans sa phase de croissance ou de déclin. L'angle correspondant à l'état de croissance estimé sera alors affecté d'une incertitude. La représentation angulaire nous semble plus pratique à manipuler que celle du cycle  $g_0(t)$ . De plus, l'analyse d'une valeur de  $g_0$  ne nous permet de statuer si nous sommes en phase de croissance ou décroissance. L'utilisation de  $\cos [\eta_0(t)]$  et  $\sin [\eta_0(t)]$  permet de lever cette ambiguïté.

– **Liste des paramètres à estimer dans le modèle** :

- $B$  la largeur du chenal étudié,
- $S_0$  la pente du chenal (supposée équivalente à la pente de la ligne de charge),
- $n_b$  le coefficient de Manning du lit étudié sans végétation,
- $b$  la hauteur échelle du fond du chenal,
- $c$  un exposant lié au contrôle hydraulique choisi (proche de 5/3 pour un contrôle chenal rectangulaire large),



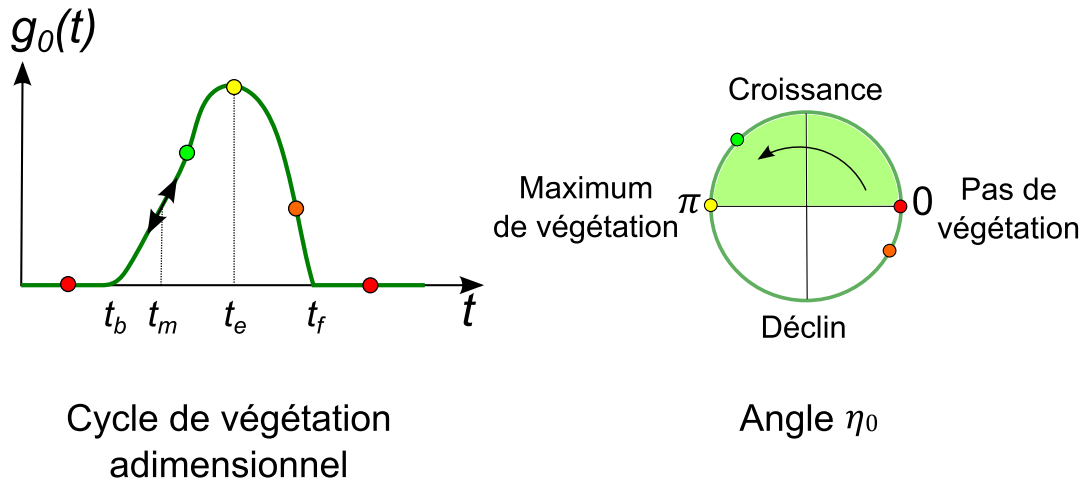


FIGURE 2.2 – Correspondance entre le cycle de végétation adimensionnel et sa représentation angulaire  $\eta_0$ . Les phases de croissance et de décroissance sont indiquées.

- $\chi$  le coefficient de reconfiguration des plantes du chenal,
- $T_{base}$  la température de base au-dessus de laquelle la plante peut commencer à se développer,
- $T_{cb}$  la température cumulée de base ; lorsque cette valeur est atteinte le début de la croissance de la plante est observé ;
- $T_{ce}$  la température cumulée d’extinction ; lorsque cette valeur est atteinte le déclin de la plante commence ;
- un paramètre dépendant du modèle de croissance choisi ( $T_m$  la température optimale pour le modèle *Growth Yin1* correspondant à la température où le taux de croissance de la plante sera le plus élevé, le paramètre  $\alpha$  décrivant la courbure de la courbe de croissance de la plante durant sa période de pousse pour le modèle *Growth Yin2*, et le temps  $t_f - t_e$  représentant la période de déclin de la plante pour le modèle *Growth Yin3*, avec  $t_f$  le temps marquant la fin du cycle de croissance (mort de la plante)),
- $g_{max1}, \dots, g_{maxN_{year}}$ , les valeurs maximales des proxys de la biomasse pour chaque année étudiée.

Le nombre de paramètres est égal à  $N_{par} = 10 + N_{year}$ , avec  $N_{year}$  le nombre d’années étudiées dans le jeu de données.

– **Paramètres dérivés :**

- $a = B\sqrt{S_0}/n_b$ , le coefficient du contrôle chenal sans végétation,
- les températures de croissance optimale de chaque année étudiée, déduites du temps optimal calculé avec l’équation 2.14.

Le nombre de paramètres dérivés est égal à  $N_d = 1 + N_{year}$ .

– **Variables d’état :** aucune variable d’état n’est calculée. Son nombre  $N_Z$  est donc nul.

– **Informations complémentaires pour la configuration du modèle :** un fichier contenant le modèle de croissance adopté (*Growth Yin1*, *Growth Yin2* ou *Growth Yin3*), le nombre d’années étudiées ( $N_{year}$ ) et les paramètres de l’algorithme de

Newton-Raphson utilisés pour calculer numériquement le débit (voir équation 2.9) doit être fourni.

La Figure 2.3 schématise ce nouveau modèle *Vegetation* avec le formalisme de BaM.

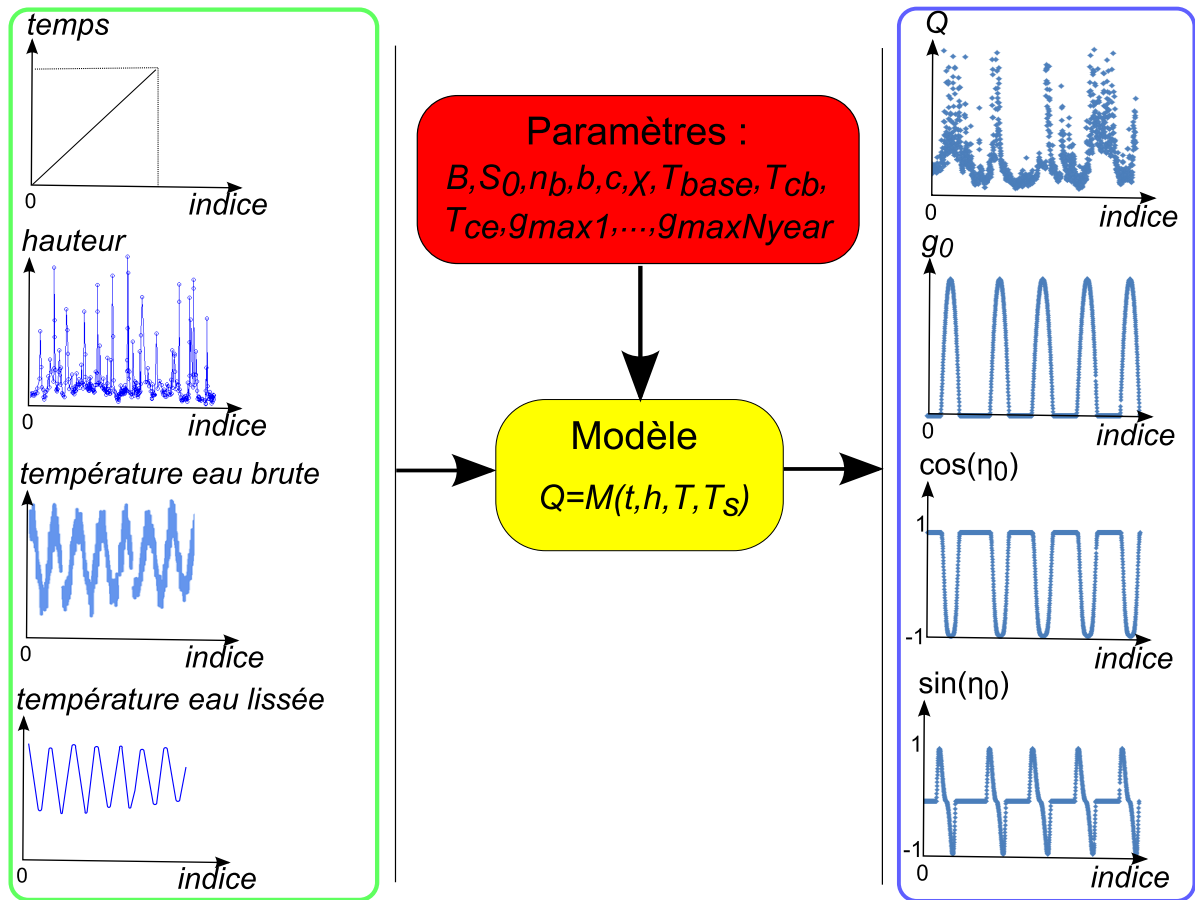


FIGURE 2.3 – Description du modèle végétation selon le formalisme de BaM.

# Chapitre 3

## Test et validation du modèle

Plusieurs tests ont été réalisés afin d'évaluer la performance du modèle dynamique implémenté dans le code *BaM* (identifié par *Vegetation*). Ce modèle est-il capable d'estimer les débits de stations végétalisées ? La station de Ladhof sera notre station de référence. Nous exprimerons dans un premier temps les paramètres de sa courbe de tarage pour la période 2009-2013 (aussi identifié comme période 1) en utilisant l'ensemble des informations à notre disposition. Puis, une reconstruction de sa chronique des débits sera effectuée. Les résultats obtenus seront comparés à ceux obtenus avec un modèle classique et non-dynamique (le modèle identifié par *BaRatin* dans *BaM*). Cette comparaison montrera l'intérêt de prendre en compte la présence de végétation lors de l'estimation des débits de ce genre de station. Pour finir, différents tests de sensibilité du modèle dynamique seront réalisés. Leur analyse permettra de déceler les défaillances du modèle et de proposer des pistes d'améliorations.

### 3.1 Élaboration de la courbe de tarage pour la station Ladhof

Dans la plupart des cas, pour estimer une courbe de tarage influencée par de la végétation nous aurons à disposition toutes les données d'entrée nécessaires (temps, hauteur d'eau, température de l'eau mesurée et lissée) mais seulement quelques jaugeages (débits jaugés, une évaluation de  $\cos[\eta_0]$  et  $\sin[\eta_0]$  avec une grande incertitude) qui vont nous permettre de simuler nos données de sortie (débit, cycle de végétation,  $\cos[\eta_0]$  et  $\sin[\eta_0]$ ). Nous possédons toutes ces informations pour le cas de Ladhof, à savoir : un jeu de 141 débits jaugés pour des hauteurs se situant entre 0 et 2 m (hauteurs définies dans la limite du contrôle chenal pour le lit mineur) ainsi qu'un jeu de 115 commentaires par rapport à la présence ou non de végétation renseignés par les jaugeurs. Nous allons donc pouvoir estimer les paramètres du modèle dynamique de la station de Ladhof pour la période 2009-2013.

Dans ce cas, les débits jaugés sont affectés arbitrairement d'une incertitude relative de 15%. Le modèle d'erreurs structurelles, supposant que l'écart-type des erreurs structurelles  $\sigma$  est une fonction affine du débit, est utilisé ( $\sigma = \gamma_1 + \gamma_2 \hat{Q}(t)$ , avec  $\gamma_1$  et  $\gamma_2$  les coefficients de la fonction affine ; pour plus de détails, veuillez vous référer au rapport de Renard (2017) sur le code *BaM*). On suppose également que les hauteurs d'eau jaugées

sont sans incertitudes.

Les commentaires liés à la végétation sont de type : aucune végétation, peu/quelques herbiers et présence d’herbiers. Ils ne nous permettent pas directement de savoir si la plante à l’instant  $t$  se situe dans sa phase de croissance ou de décroissance. En regardant le moment dans l’année où le jaugeage a été effectué, il est néanmoins possible d’évaluer si la plante est plutôt dans sa phase de croissance ou de décroissance. Ainsi un angle  $\eta_0$  accompagné d’une incertitude peut être déterminé. Lorsque peu d’herbiers sont aperçus, nous supposons que la croissance n’a pas commencé et qu’il n’y a pas de végétation donc  $\cos[\eta_0]=1$  et  $\sin[\eta_0]=0$  avec une incertitude de 0.1 (valeur arbitraire). Lorsque la présence de quelques herbiers est détectée, le cosinus prend la valeur 0.5 et le sinus une valeur de 0.5 ou -0.5 selon si l’on a dépassé l’été ou pas (limite arbitraire du démarrage du déclin de la plante). Dans ce cas, l’incertitude sur ces données de sortie est fixée arbitrairement à 0.25. Les valeurs positives du sinus décrivent la phase de croissance et les valeurs négatives décrivent la phase de décroissance. Lorsque la présence d’herbiers est nettement indiquée dans les commentaires, le cosinus prend la valeur -0.5 avec une incertitude de 0.25.

Le sous-modèle *Growth Yin2* est choisi pour cette analyse.

### 3.1.1 Estimation des paramètres du modèle dynamique

Les distributions a priori pour chaque paramètre du modèle dynamique à estimer sont présentées dans le Tableau 3.1. Ces a priori peuvent être qualifiés de vagues puisqu’ils sont relativement peu précis. Nous partons du principe que notre connaissance par rapport au comportement des plantes localisées au niveau de la station de Ladhof est limitée.

Dans le Tableau 3.1, on remarque que le paramètre  $T_{base}$  est annoncé comme fixé. Cette option est possible dans le code *BaM*. En fixant  $T_{base}$ , nous limitons le nombre de paramètres à estimer dans notre modèle. Cette variable semble moins critique que d’autres. En effet, elle est utilisée seulement pour le calcul des températures cumulées. Selon  $T_{base}$  choisie, les valeurs de  $T_{cb}$  et  $T_{ce}$  vont varier mais l’allure générale du modèle de croissance ne changera pas.

TABLE 3.1 – Récapitulatif des distributions a priori, qualifiées de vagues, des paramètres à estimer dans le modèle de végétation.  $\mathcal{N}(m_g; \sigma_g)$  correspond à une loi gaussienne de moyenne  $m_g$  et d’écart-type  $\sigma_g$  et  $\mathcal{U}(l_i; l_s)$  correspond à une loi uniforme définie par ses bornes inférieure ( $l_i$ ) et supérieure ( $l_s$ ).

$B$ [m]	$S_0$ [-]	$n_b$ [ $\text{m}^{-1/3}\text{s}$ ]	$b$ [m]	$c$ [-]
$\mathcal{N}(20; 2)$	$\mathcal{N}(0.001; 0.0005)$	$\mathcal{N}(0.03; 0.01)$	$\mathcal{N}(0.8; 0.15)$	$\mathcal{N}(1.67; 0.025)$
$\chi$ [-]	$T_{base}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_{cb}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_{ce}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$\alpha$ [-] ou $T_m$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] ou $t_f - t_e$ [an]
$\mathcal{N}(-1; 0.5)$	FIXE à $6^{\circ}\text{C}$	$\mathcal{U}(0; 1000)$ estimation initiale : 300	$\mathcal{U}(0; 2000)$ estimation initiale : 1500	$\mathcal{N}(1.34; 0.25)$ $\mathcal{N}(18; 2)$ $\mathcal{N}(0.19; 0.05)$
$g_{max1}$ [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] $^{-\chi}$	$g_{max2}$ [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] $^{-\chi}$	$g_{max3}$ [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] $^{-\chi}$	$g_{max4}$ [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] $^{-\chi}$	$g_{max5}$ [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] $^{-\chi}$
$\mathcal{N}(0.03; 0.03)$	$\mathcal{N}(0.03; 0.03)$	$\mathcal{N}(0.03; 0.03)$	$\mathcal{N}(0.03; 0.03)$	$\mathcal{N}(0.03; 0.03)$

La Figure 3.1 présente une partie des simulations MCMC effectuées par *BaM* pour ce premier test (500 simulations). Ces itérations sont issues d’un post-traitement de 100 000

itérations réellement réalisées. Le calcul est effectué sur l'ensemble des 5 années de la période 1 (2009-2013). Le temps de calcul est d'environ 30 min pour réaliser ces 100 000 itérations. L'observation de la Figure 3.1 nous permet de vérifier la convergence des simulations MCMC et de juger de la fiabilité de nos estimations.

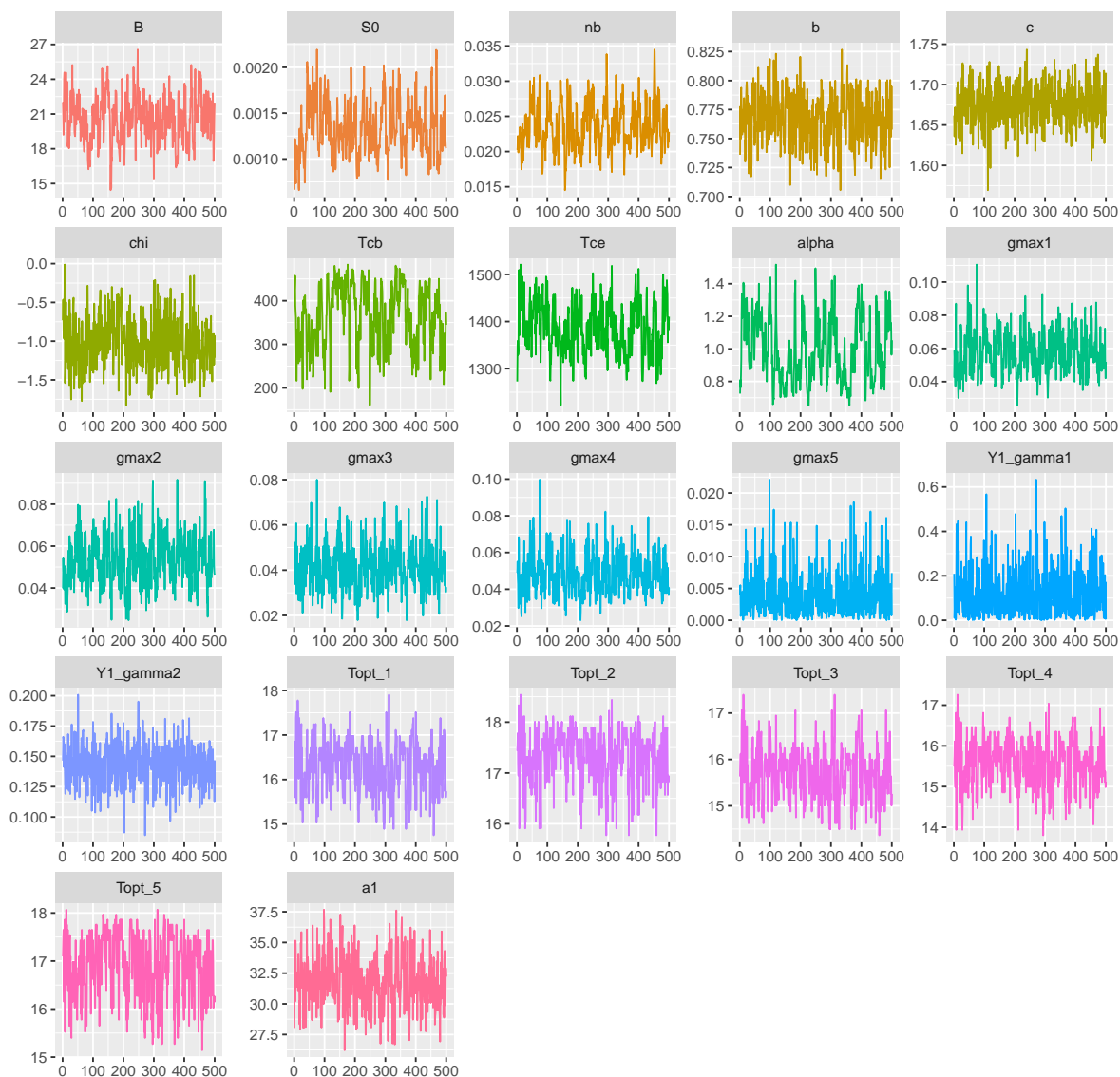


FIGURE 3.1 – Résultats des simulations MCMC pour l'ensemble des paramètres constituant le modèle dynamique, ainsi que pour les paramètres du modèle d'erreurs structurales du débit ( $\gamma_1, \gamma_2$ ) et pour les paramètres dérivés du modèle ( $T_m$  calculée pour chaque année et  $a$ ).

L'étude des distributions a posteriori des paramètres et de leur dispersion nous permet de statuer sur la qualité du modèle. La Figure 3.2 montre les distributions a posteriori de chaque paramètre issues des simulations MCMC en les comparant à leurs distributions a priori. Si la distribution a posteriori est nettement plus précise que celle a priori alors les paramètres sont bien identifiés. La distribution a posteriori pour le paramètre  $c$  est presque identique à celle a priori mais ce dernier reste bien estimé. En effet,  $c$  a été de

base affecté d'un a priori serré car il correspond à l'exposant du contrôle chenal évalué égal à  $5/3$ . Les distributions a posteriori de certains paramètres, notamment ceux liés à la végétation, couvrent encore une large gamme de valeur ( $\chi$ ,  $\alpha$ ,  $g_{max1}$ ,  $g_{max2}$ ,  $g_{max3}$ ,  $g_{max4}$ ,  $g_{max5}$ ). Ces derniers sont probablement difficiles à estimer du fait d'un manque d'information concrète par rapport à l'évolution temporelle de la végétation.

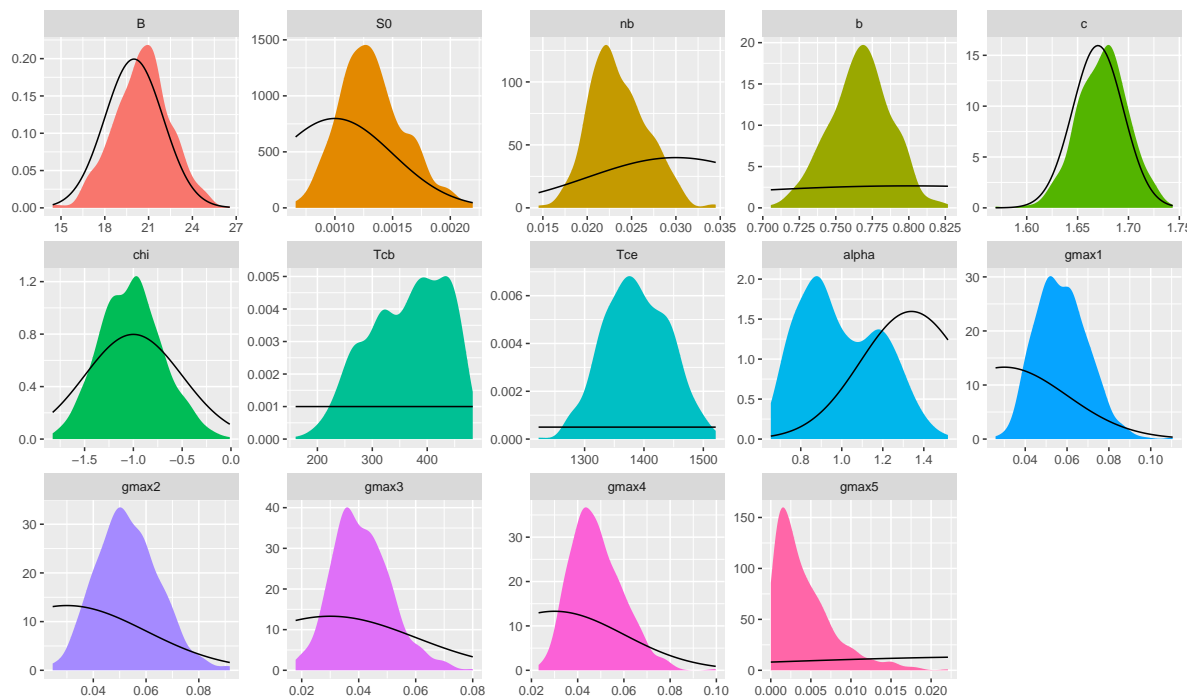


FIGURE 3.2 – Comparaison des distributions a priori et a posteriori obtenues pour chaque paramètre du modèle dynamique. Les distributions a priori sont matérialisées par des lignes noires et les distributions a posteriori par de la couleur.

Le Tableau 3.2 récapitule les paramètres maxpost évalués par le code de calcul *BaM*. Ils correspondent aux paramètres qui maximisent la densité a posteriori. Ce sont ces valeurs qui seront retenues dans le modèle dynamique.

### 3.1.2 Construction de la courbe de tarage dynamique

Les paramètres du modèle dynamique ayant été estimés (Tableau 3.2), il est maintenant possible de construire la courbe de tarage dynamique pour le cas de Ladhof sur la période 1 (voir Figure 3.3). Plusieurs relations hauteur/débit sont représentées pour différents degrés de croissance des plantes (ou de proxys croissance  $g$ ). La courbe de tarage est tracée seulement pour des hauteurs inférieures à 2 m ; au-delà le contrôle change selon le rapport d'expertise de la station (Bonnifait *et al.*, 2012). Les jaugeages  $g$  font référence aux indicateurs croissance calculés comme dans la partie 1.5.1.1 (voir équation 1.31) mais avec les paramètres de calage issus du modèle. Ils semblent suivre de manière cohérente les différentes courbes qui leur sont associées.

TABLE 3.2 – Paramètres estimés à l’aide de l’outil *BaM* pour décrire le modèle dynamique avec prise en compte de la végétation pour le cas de Ladhof pour la période 2009-2013 (maxpost). Les quantiles 2.5 % et 97.5 % sont renseignés pour chaque paramètre.

$B$ [m]	$S_0$ [-]	$n_b$ [ $\text{m}^{-1/3}\text{s}$ ]	$b$ [m]	$c$ [-]
19.4 (16.9;24.4)	0.00135 (0.00084;0.0020)	0.0233 (0.018;0.030)	0.755 (0.724;0.802)	1.68 (1.63;1.72)
$\chi$ [-]	$T_{base}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_{cb}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_{ce}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$\alpha$ [-]
-1.12 (-1.6;-0.40)	6 -	381 (228;470)	1359 (1281;1491)	0.885 (0.70;1.4)
$g_{max1}$ [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] $^{-\chi}$	$g_{max2}$ [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] $^{-\chi}$	$g_{max3}$ [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] $^{-\chi}$	$g_{max4}$ [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] $^{-\chi}$	$g_{max5}$ [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] $^{-\chi}$
0.0590 (0.037;0.083)	0.0508 (0.033;0.078)	0.0442 (0.023;0.063)	0.0480 (0.031;0.073)	0.00132 (0.00016;0.014)

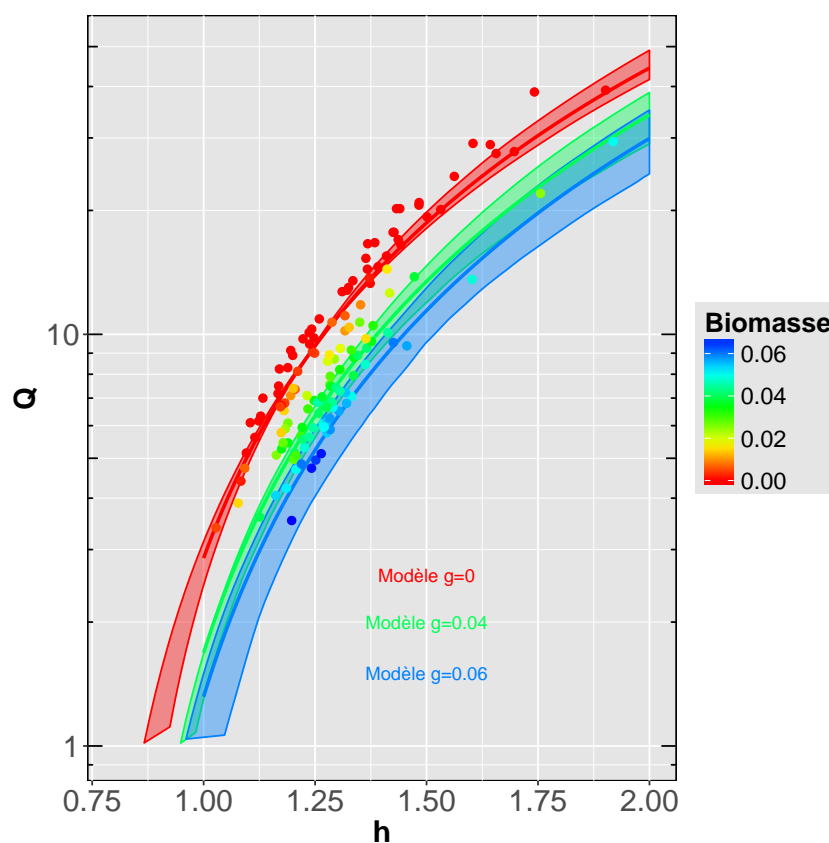


FIGURE 3.3 – Courbes de tarage avec prise en compte de la végétation pour le cas de Ladhof sur la période 2009-2013. Des relations  $h$ - $Q$  colorées en fonction de la croissance des plantes considérées sont ajoutées sur la CT. Les bandes représentent les intervalles d’incertitudes totales à 95%.

### 3.1.3 Reconstruction de la chronique de débit sur la période 2009-2013

En utilisant le code *BaM*, il est également possible de reconstruire une chronique de débit à partir d'un limnigramme  $h(t)$  connu ou de réaliser des prédictions. La Figure 3.4 montre la reconstruction de la chronique de débit de la période 1 accompagnée de son incertitude a posteriori totale et paramétrique. Le limnigramme choisi en entrée pour cette reconstruction est le même que celui utilisé pour l'estimation des paramètres du modèle de la période 1 ; on s'attend donc à observer de bons résultats. Les débits jaugés sont ajoutés sur la figure afin de juger de la performance du modèle. Les débits simulés (courbe maxpost) et jaugés sont similaires dans l'ensemble. L'incertitude a posteriori totale reste assez faible durant la période, ce qui rend intéressant le modèle. L'incertitude totale est principalement structurelle. La part due à l'incertitude paramétrique est à peine visible sur la chronique reconstruite. On note néanmoins que, pour certaines années (notamment les années 0 et 2 correspondant aux années 2009 et 2011, respectivement), les faibles débits sont sur-estimés. L'impact de la présence de végétation n'est donc pas bien pris en compte par notre modèle pour ces cas. L'année 2011 avait été repérée comme singulière lors de l'étude du comportement de la station en partie 1.5.1.2. Sa prise en compte dans notre étude montre que notre modèle n'est pas suffisamment flexible et adaptable pour décrire n'importe quelles évolutions des plantes. Nous remarquons également que les plus forts débits sont parfois sur-estimés. Rappelons ici que les jaugeages retenus pour la comparaison ont été observés pour des hauteurs  $h > 2$  m (dans la limite du contrôle chenal du lit mineur).

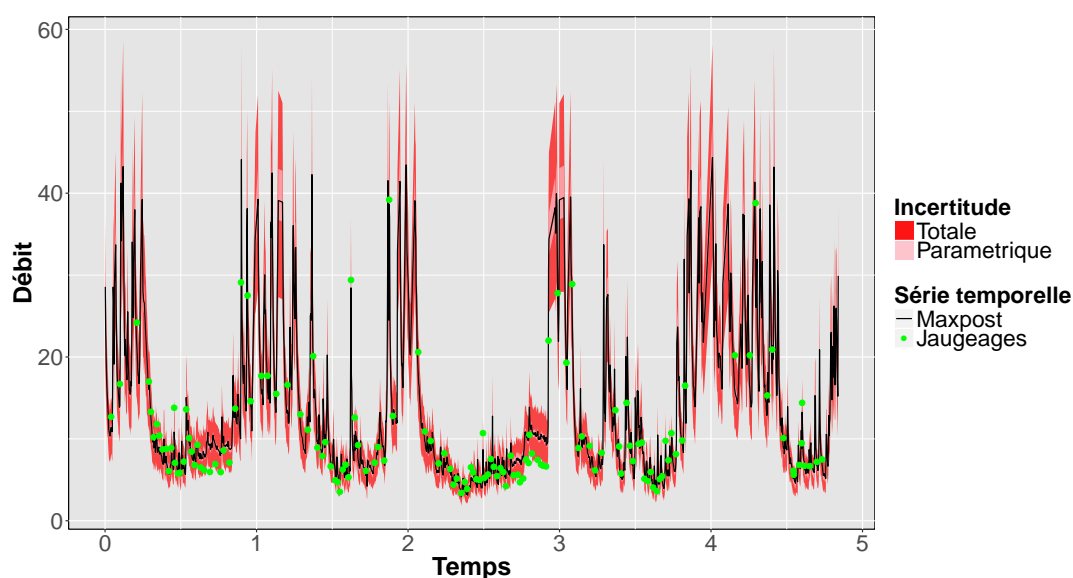


FIGURE 3.4 – Reconstruction de la chronique de débit sur la période 2009-2013 pour la station de Ladhof.

La Figure 3.5 montre les erreurs relatives de débits  $E_r$  déduites de la reconstruction en fonction de la valeur du débit observé :

$$E_r = \frac{Q_{maxpost} - Q_j}{Q_j} \quad (3.1)$$



avec  $Q_{maxpost}$  le débit simulé en prenant les paramètres maxpost du modèle dynamique et  $Q_j$  le débit réellement observé, c'est-à-dire le débit jaugé. Pour les très faibles débits, là où l'influence de la végétation se fait le plus ressentir, l'erreur relative peut atteindre des valeurs élevées (jusqu'à plus de 50%). Pour les débits plus forts ( $> 10\text{m}^3/\text{s}$ ),  $E_r$  n'excède pas plus de 20%. Le modèle reste donc en partie fiable. En revanche, ces résultats montrent qu'il est nécessaire d'améliorer ce dernier pour être capable de modéliser les très faibles débits.

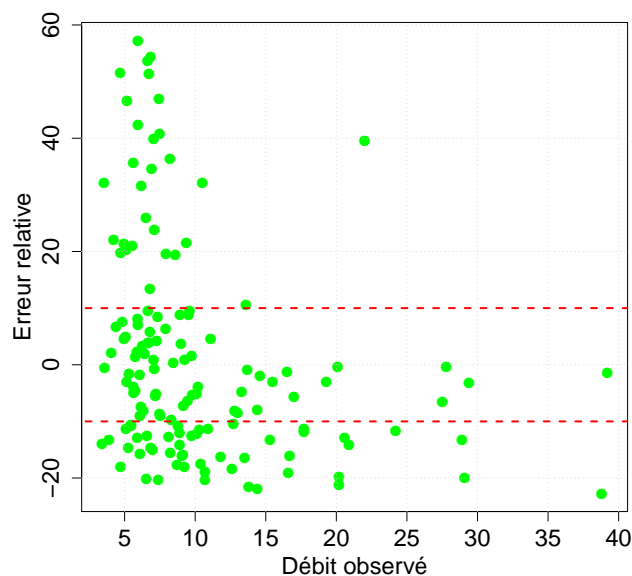


FIGURE 3.5 – Erreurs relatives en fonction du débit observé pour la période 1.

En regardant la Figure 3.6 montrant le cycle de végétation  $g(t)$  reconstruit à la suite de l'estimation des paramètres de notre modèle, nous remarquons que la dynamique des plantes n'est pas toujours bien reproduite selon les années. Les valeurs jaugées ne suivent pas toujours l'évolution proposée. Les paramètres choisis comme variables chaque année dans les sous-modèles de croissance, ne sont peut être pas les plus adéquats (cf.  $g_{max}$ ). En revanche, d'autres initialement fixes durant toute la période d'étude pourraient en fin de compte varier selon les années (ex :  $T_{ce}$ ,  $T_{cb}$ ,  $\alpha$  ou autre). On remarque clairement que la forme de l'évolution de la croissance de la plante n'est pas identique pour chaque année. En ce sens, le modèle doit être modifié et amélioré. Une application du modèle année par année (voir partie 3.4) va nous permettre d'explorer ces pistes d'amélioration.

## 3.2 Intérêt du modèle végétation par rapport au modèle BaRatin

Avant de proposer des améliorations pour notre modèle dynamique, nous allons dans un premier temps comparer les résultats obtenus avec ceux obtenus avec un modèle classique non dynamique de type *BaRatin*. Nous cherchons ici à vérifier l'intérêt d'utiliser un modèle dynamique pour ce genre de station.

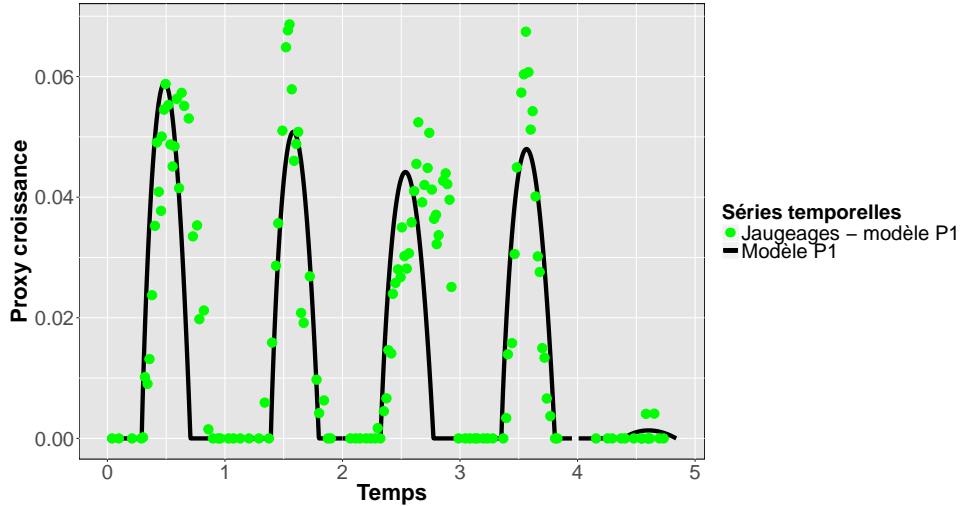


FIGURE 3.6 – Reconstruction des cycles de croissance sur la période 1.

Nous estimons les paramètres du modèle classique et non-dynamique, à savoir  $a$ ,  $b = \kappa$  et  $c$  à l'aide du modèle *BaRatin* implémenté dans le *BaM* :

$$Q = a(h - b)^c \quad (3.2)$$

avec  $a$  un paramètre lié aux propriétés physiques du contrôle chenal du lit mineur,  $b$  l'offset du contrôle,  $c$  l'exposant du contrôle supposé égal à  $5/3$  et  $\kappa$  la hauteur d'activation qui sera supposée égale à  $b$  dans ce cas.

Les a priori donnés pour ces 3 paramètres sont vagues. Les distributions choisies sont répertoriées dans le Tableau 3.3. Les 141 débits jaugés affectés d'une incertitude relative de 15% sont également utilisés. Le même modèle d'erreurs structurelles est appliqué pour ce cas. Aucune incertitude n'est considérée sur les hauteurs jaugées.

TABLE 3.3 – Récapitulatif des distributions a priori, qualifiées de vagues, des paramètres à estimer dans le modèle *BaRatin*.

$\kappa$ [m]	$a$ [SI]	$c$ [-]
$\mathcal{N}(0.8; 0.15)$	$\mathcal{N}(21; 2)$	$\mathcal{N}(1.67; 0.025)$

La Figure 3.7 montre la reconstruction du débit obtenue avec le modèle non-dynamique (*BaRatin*) pour la période 1. Cette dernière peut être comparée avec la Figure 3.4 présentant la chronique de débits reconstruites et obtenues avec le modèle dynamique. Avec cette représentation, il est difficile de détecter les différences entre les deux modèles. La Figure 3.8, présentant les erreurs relatives pour les deux modèles, est plus lisible et parlante. Elle nous permet de statuer sur l'intérêt d'utiliser un modèle dynamique pour décrire le comportement de ce genre de station. Utiliser le modèle *Vegetation* pour la prédiction permet de réduire effectivement les erreurs relatives pour une grande partie des débits observés. En revanche, l'erreur relative pour les très faibles débits reste non négligeable. Le modèle dynamique est donc prometteur et plus performant qu'un modèle classique ; mais il semble judicieux de poursuivre nos recherches pour l'améliorer et proposer une version plus fiable.

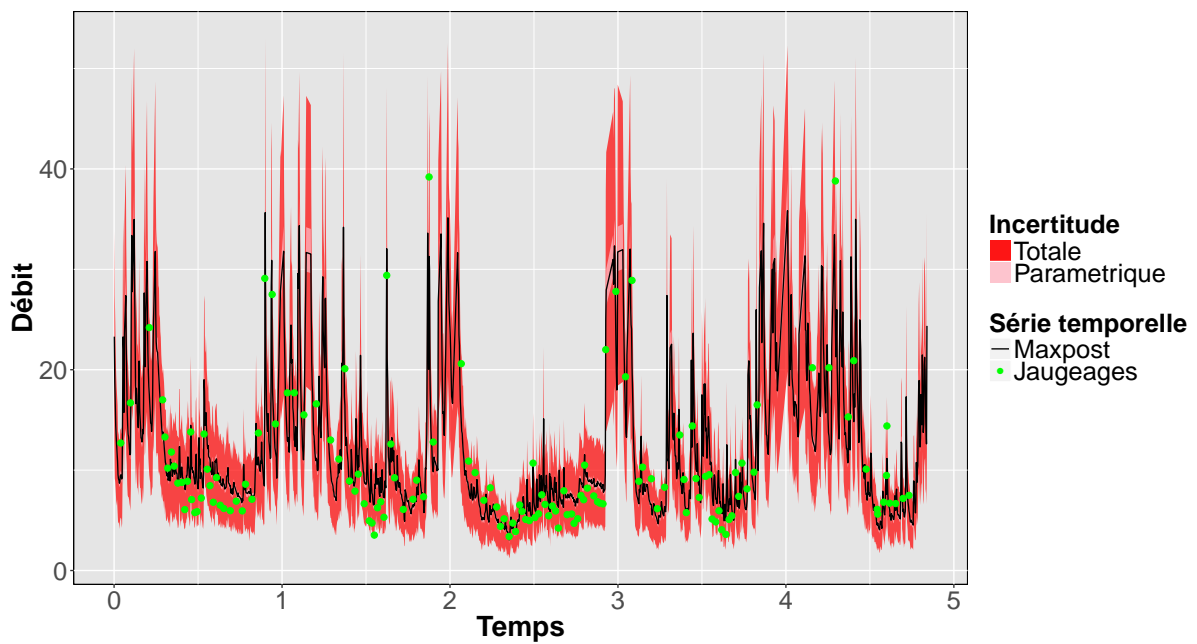


FIGURE 3.7 – Reconstruction de la chronique de débit sur la période 2009-2013 pour la station de Ladhof à l’aide du modèle *BaRatin* (non-dynamique).

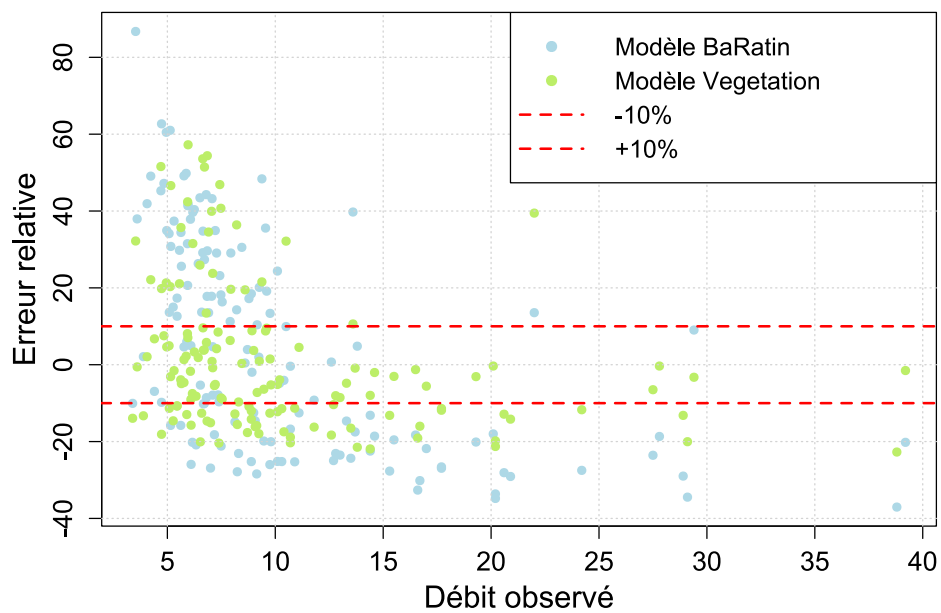


FIGURE 3.8 – Erreurs relatives en fonction du débit observé pour la période 1. Les points verts représentent les erreurs issues du calcul avec le modèle *Vegetation* tandis que les points bleus, eux, correspondent aux erreurs obtenues avec le modèle *BaRatin*.

## 3.3 Tests de sensibilité

### 3.3.1 Sensibilité aux types et nombres de jaugeages

Dans un premier temps, nous allons tester la sensibilité des résultats aux types de jaugeages disponibles lors de l'estimation. Différents scénarios (T1, T2, T3, T4, T5, T6 et Tveg) sont proposés et répertoriés dans le Tableau 3.4.

TABLE 3.4 – Tests de sensibilité par rapport aux types de jaugeages.

Sensibilité par rapport aux types de jaugeages disponibles							
Tests	A priori	Option modèle	Type de jaugeages	Niveau d'info.	Nombre de jaugeages	Période	Temp. eau
T1	vague	<i>Yin2</i>	$Q, g_0, \cos[\eta_0], \sin[\eta_0]$	0	0,0,0,0	2009-2013	$T, T_s$
T2	vague	<i>Yin2</i>	$Q, g_0, \cos[\eta_0], \sin[\eta_0]$	0	141,0,0,0	2009-2013	$T, T_s$
T3	vague	<i>Yin2</i>	$Q, g_0, \cos[\eta_0], \sin[\eta_0]$	1	141,0,4,4	2009-2013	$T, T_s$
T4	vague	<i>Yin2</i>	$Q, g_0, \cos[\eta_0], \sin[\eta_0]$	3	141,0,115,115	2009-2013	$T, T_s$
Tveg	vague	<i>Yin2</i>	$Q, g_0, \cos[\eta_0], \sin[\eta_0]$	3	0,0,115,115	2009-2013	$T, T_s$
T5	vague	<i>Yin2</i>	$Q, g_0, \cos[\eta_0], \sin[\eta_0]$	4	141,115,0,0	2009-2013	$T, T_s$
T6	vague	<i>Yin2</i>	$Q, g_0, \cos[\eta_0], \sin[\eta_0]$	5	141,115,115,115	2009-2013	$T, T_s$

Selon les cas, les débits jaugés et/ou l'information par rapport à la végétation sont utilisés. Les tests balayent des scénarii où le niveau d'information par rapport à la végétation diffère :

- Niveau 0 : aucune information par rapport à la végétation,
- Niveau 1 : simples indications sur la présence ou absence de végétation,
- Niveau 2 : commentaires un peu plus détaillés sur la présence de végétation,
- Niveau 3 : commentaires sur la présence de végétation et informations par rapport à si les plantes se situent dans leur phase de croissance ou de déclin ; pour Ladhof, nous ne possédons pas cette information mais émettons des hypothèses présentées dans la partie 3.1 pour la déduire,
- Niveau 4 : mesures de la croissance de la plante (biomasse ou proxy croissance) ; pour Ladhof, nous prenons la valeur des proxys calculés dans la partie 1.5.1.1,
- Niveau 5 : mesures de la croissance de la plante et commentaires sur la présence de végétation.

Le test T4 correspond au scénario présenté dans la partie 3.1. Les distributions des paramètres a priori sont vagues et le paramètre  $T_{base}$  du modèle dynamique est fixé pour tous les scénarios. En entrée, la température brute et lissée de l'eau sont renseignées. La période 1 limitée à 5 années (2009-2013) est notre période d'étude.

La Figure 3.9 représente les résultats des estimations des différents paramètres du modèle sous forme de boxplots selon les différents scénarii. Elle montre et compare pour chaque test les distributions a priori et a posteriori des paramètres. La distribution a priori est toujours de couleur blanche et est placée à gauche de celle a posteriori. Le point noir correspond à la valeur maxpost. Les couleurs des boîtes pour les distributions a posteriori rendent compte du niveau d'information par rapport à la végétation disponible lors de l'estimation. Plus le vert est foncé, plus le niveau est élevé. Lorsque nous disposons uniquement des débits jaugés, la couleur bleu est choisie. En revanche, lorsque aucun

débit jaugé n'est mesuré et que seule une information de niveau 3 sur la végétation est disponible, la couleur retenue est le vert fluo.

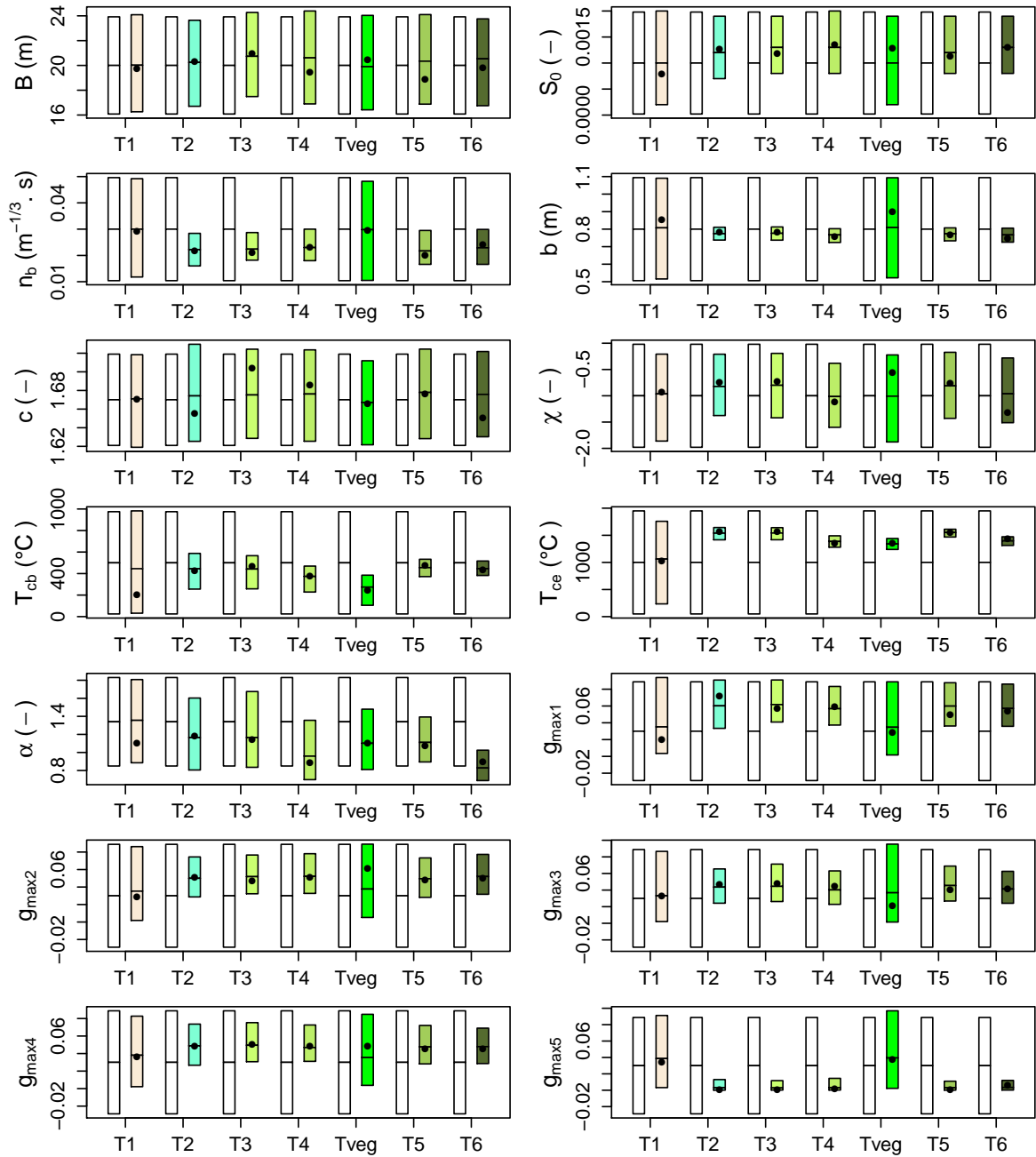


FIGURE 3.9 – Test de sensibilité par rapport au type de jaugeages - Comparaison des distributions a priori et a posteriori des paramètres estimés avec le modèle dynamique pour l'ensemble des tests du Tableau 3.4).

L'observation des résultats présentés sur la Figure 3.9 nous montre qu'utiliser l'information sur les débits jaugés permet d'améliorer l'estimation des paramètres du modèle, notamment pour ceux indépendants de la présence de végétation :  $B$ ,  $S_0$ ,  $n_b$ ,  $b$  et  $c$ . L'ajout d'information par rapport à la végétation permet de réduire légèrement l'étendue des distributions a posteriori des paramètres liés à la végétation :  $\chi$ ,  $T_{cb}$ ,  $T_{ce}$ ,  $\alpha$  et les  $g_{max}$ .

Cependant, l'amélioration reste négligeable par rapport à celle apportée par l'utilisation des débits jaugés et ce quel que soit le niveau d'information sur la végétation fourni. Les estimations du test Tveg où aucun débit jaugé n'est utilisé sont mauvaises pour la plupart des paramètres, excepté pour ceux uniquement liés à la végétation.

L'analyse de cette Figure 3.9 permet de conclure qu'une large quantité d'information est contenue dans les débits jaugés. Avec un nombre suffisant de jaugeages, ceux-ci semblent même pouvoir rendre compte de la dynamique végétale. Nous pouvons nous poser la question de savoir quel est le nombre minimal nécessaire de jaugeages pour une bonne estimation des paramètres du modèle dynamique. De plus, comment ces jaugeages doivent-ils être répartis dans l'année? Y-a-t-il des préconisations à donner aux hydro-mètres pour optimiser leurs mesures? Pour répondre à ces questions, d'autres scenarii ont été envisagés et répertoriés dans le Tableau 3.5. L'idée est de tester la performance de l'estimation des paramètres du modèle dynamique selon le nombre de débits jaugés fournis en entrée.

TABLE 3.5 – Tests de sensibilité par rapport aux nombres de jaugeages et à leur répartition temporelle.

<b>Sensibilité par rapport au nombre de jaugeages et leurs répartitions</b>							
Tests	A priori	Option modèle	Type de jaugeages	Niveau d'info.	Nombre de jaugeages	Période	Temp. eau
T2	vague	<i>Yin2</i>	$Q, g_0, eos[\eta_0], sin[\eta_0]$	0	141,0,0,0	2009-2013	$T, T_s$
T2-2	vague	<i>Yin2</i>	$Q, g_0, eos[\eta_0], sin[\eta_0]$	0	57,0,0,0 aléat.	2009-2013	$T, T_s$
T2-3	vague	<i>Yin2</i>	$Q, g_0, eos[\eta_0], sin[\eta_0]$	0	28,0,0,0 1 tous les 2 mois	2009-2013	$T, T_s$
T2-4	vague	<i>Yin2</i>	$Q, g_0, eos[\eta_0], sin[\eta_0]$	0	57,0,0,0 croissance	2009-2013	$T, T_s$
T2-5	vague	<i>Yin2</i>	$Q, g_0, eos[\eta_0], sin[\eta_0]$	0	57,0,0,0 déclin	2009-2013	$T, T_s$
T2-6	vague	<i>Yin2</i>	$Q, g_0, eos[\eta_0], sin[\eta_0]$	0	57,0,0,0 pic	2009-2013	$T, T_s$
T4-2	vague	<i>Yin2</i>	$Q, g_0, cos[\eta_0], sin[\eta_0]$	3	57,0,115,115 aléat.	2009-2013	$T, T_s$

La Figure 3.10 nous montre le résultat de l'estimation des paramètres du modèle dynamique pour chaque cas présenté dans le Tableau 3.5. La comparaison des résultats des tests T2, T2-3 et T2-2 nous permet de juger de l'importance du nombre de jaugeages utilisés. Lorsque l'on ne dispose d'aucune information par rapport à la végétation, il est possible de se référer aux valeurs de débits jaugés pour recueillir des informations quant à l'évolution de la végétation. Plus il y a de jaugeages (test T2) plus l'estimation des paramètres liées à la végétation est précise. Lorsque le nombre de jaugeages diminue (voir test T2-3, où 28 débits ont été mesurés avec une fréquence d'une mesure tous les 2 mois, et test T2-2 où 57 débits ont été mesurés de manière aléatoire au cours des 5 années d'étude) et même si ceux-ci sont bien répartis durant la période d'étude, l'estimation des paramètres du modèle liés à la végétation devient plus incertaine.

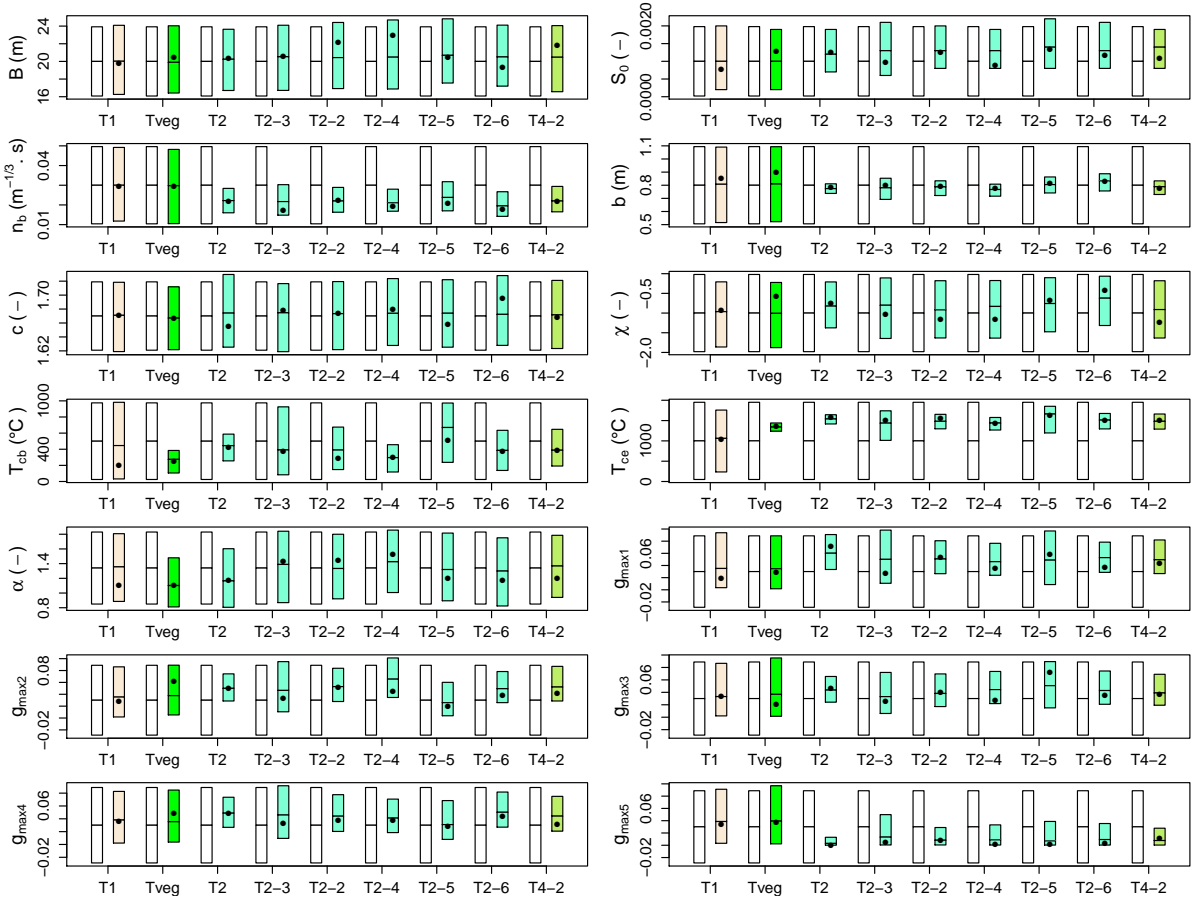


FIGURE 3.10 – Test de sensibilité par rapport au nombre de jaugeages et leurs répartitions - Comparaison des distributions a priori et a posteriori des paramètres estimés avec le modèle dynamique pour l'ensemble des tests présentés dans le Tableau 3.5.

La comparaison des tests T2-2, T2-4, T2-5 et T2-6 nous permet statuer sur la meilleure stratégie de jaugeage à adopter pour une bonne estimation du modèle dynamique. Différents scenarii sont proposés. Pour l'ensemble de ces tests, le nombre de jaugeages durant la période d'étude est de 57. Il est donc possible de comparer nos résultats indépendamment du nombre de jaugeages et seulement en fonction du programme de jaugeage choisi :

1. les débits ont été jaugés de manière aléatoire mais ceux-ci sont bien répartis durant la période P1 (voir test T2-2),
2. les jaugeages sont plus fréquents durant la période de croissance des plantes (voir test T2-4),
3. les jaugeages sont plus fréquents durant la période de déclin des plantes (voir test T2-5),
4. la plupart des jaugeages ont été effectués durant les périodes où le pic de croissance des plantes est observé (voir test T2-6).

Les distributions obtenues a posteriori des paramètres du modèle sont moins larges dans le cas où les jaugeages sont plus fréquents durant les périodes de croissance. Le gain sur l'estimation des paramètres n'est néanmoins pas significatif. Un jaugeage réparti avec

quelques informations sur la végétation (de niveau 3) donne des distributions a posteriori similaires (voir le cas T4-2). De notre point de vue, il est plus simple et moins coûteux de mettre en place une manière de suivre régulièrement l'évolution de la végétation que de déployer des équipes pour mesurer le débit de la station étudiée avec une fréquence soutenue. L'évaluation de la présence ou non de la végétation pourrait se faire avec des prises de photographies régulières du tronçon étudié.

### 3.3.2 Sensibilité à la précision des a priori des paramètres du modèle

A présent, nous effectuons un test où les distributions a priori des paramètres du modèle renseignées dans les fichiers de configuration sont plus précises (voir test T4bis). Le test T4bis est identique au test T4 sauf que les distributions a priori des paramètres du modèle sont différentes (voir Tableau 3.6). Ces dernières seront qualifiées de précises dans la suite.

TABLE 3.6 – Récapitulatif des distributions a priori, qualifiées de précises, des paramètres à estimer dans le modèle de végétation.

$B$ [m]	$S_0$ [-]	$n_b$ [ $\text{m}^{-1/3}\text{s}$ ]	$b$ [m]	$c$ [-]
$\mathcal{N}(20; 1)$	$\mathcal{N}(0.001; 0.00025)$	$\mathcal{N}(0.02; 0.005)$	$\mathcal{N}(0.7; 0.1)$	$\mathcal{N}(1.67; 0.025)$
$\chi$ [-]	$T_{base}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_{cb}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_{ce}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$\alpha$ [-]
$\mathcal{N}(-1; 0.1)$	FIXE à $6^{\circ}\text{C}$	$\mathcal{U}(0; 500)$ estimation initiale : 300	$\mathcal{U}(1000; 2000)$ estimation initiale : 1500	$\mathcal{N}(1.34; 0.1)$
$g_{max1}$ [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] $^{-\chi}$	$g_{max2}$ [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] $^{-\chi}$	$g_{max3}$ [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] $^{-\chi}$	$g_{max4}$ [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] $^{-\chi}$	$g_{max5}$ [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] $^{-\chi}$
$\mathcal{N}(0.03; 0.03)$	$\mathcal{N}(0.03; 0.03)$	$\mathcal{N}(0.03; 0.03)$	$\mathcal{N}(0.03; 0.03)$	$\mathcal{N}(0.03; 0.03)$

La Figure 3.11 compare les distributions a priori et a posteriori des paramètres estimés du modèle *Vegetation* pour les test T4 et T4bis. L'utilisation d'a priori plus précis semble améliorer l'estimation a posteriori des paramètres. En revanche, les erreurs relatives en termes de débits en fonction des débits observés ne sont quant à elles pas nettement diminuées. Les résultats fournis par BaM s'avèrent donc peu sensibles à la précision des distributions des paramètres renseignées a priori.

### 3.3.3 Sensibilité à l'option de sous-modèle de croissance choisie

Dans cette partie, les données et jaugeages utilisés sont les mêmes que celles du test T4 étudié en partie 3.1. Seuls les sous-modèles pour décrire la croissance des plantes vont varier. Le cas T4, T7 et T8 utilisent l'option *Growth Yin2*, *Growth Yin1* et *Growth Yin3*, respectivement. Les résultats de ces tests vont être comparés dans le but d'évaluer leur sensibilité à l'option choisie (voir Tableau 3.7).

La Figure 3.12 compare les distributions a priori et a posteriori des paramètres estimés du modèle dynamique pour ces 3 scenarii. Le trait entourant la boîte des distributions a posteriori nous informe sur l'option utilisée pour le sous-modèle de croissance :

- trait pointillé : *Growth Yin1*



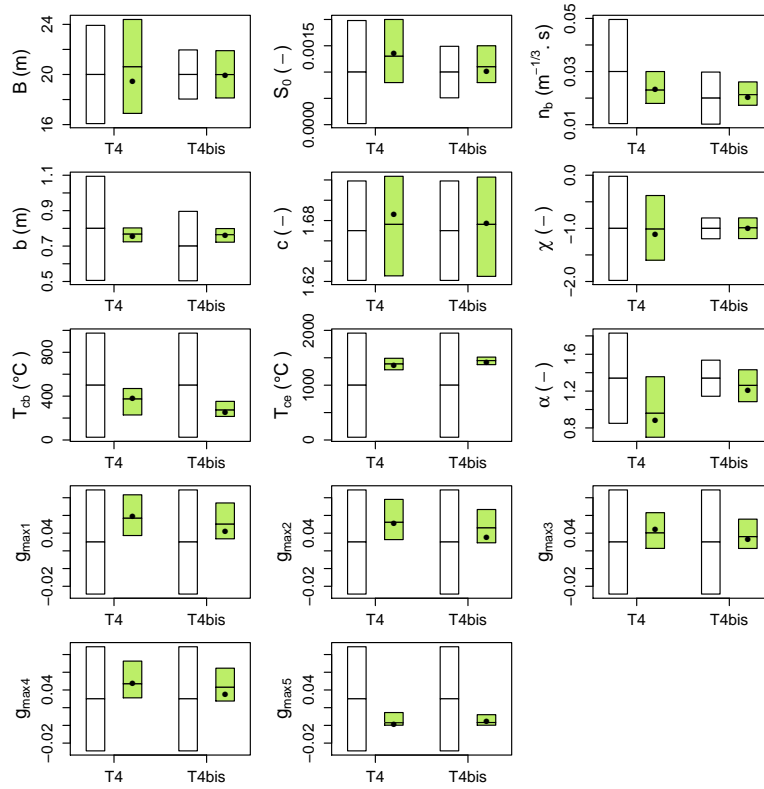


FIGURE 3.11 – Test de sensibilité par rapport à la précision des a priori des paramètres du modèle - Comparaison des distributions a priori et a posteriori des paramètres estimés avec le modèle dynamique pour les tests T4 et T4bis.

- traît plein : *Growth Yin2*
- traît tireté : *Growth Yin3*

Nous remarquons que globalement les estimations a posteriori sont similaires quelle que soit l'option choisie. Nous choisissons de garder arbitrairement l'option *Growth Yin2* pour la suite de nos tests de sensibilité.

TABLE 3.7 – Tests de sensibilité par rapport à l'option de sous-modèles de croissance choisie.

Sensibilité par rapport à l'option de sous-modèle de croissance choisie							
Tests	A priori	Option modèle	Type de jaugeages	Niveau d'info.	Nombre de jaugeages	Période	Temp. eau
T4	vague	<i>Yin2</i>	$Q, g_{\sigma}, \cos[\eta_0], \sin[\eta_0]$	3	141,0,115,115	2009-2013	$T, T_s$
T7	vague	<i>Yin1</i>	$Q, g_{\sigma}, \cos[\eta_0], \sin[\eta_0]$	3	141,0,115,115	2009-2013	$T, T_s$
T8	vague	<i>Yin3</i>	$Q, g_{\sigma}, \cos[\eta_0], \sin[\eta_0]$	3	141,0,115,115	2009-2013	$T, T_s$

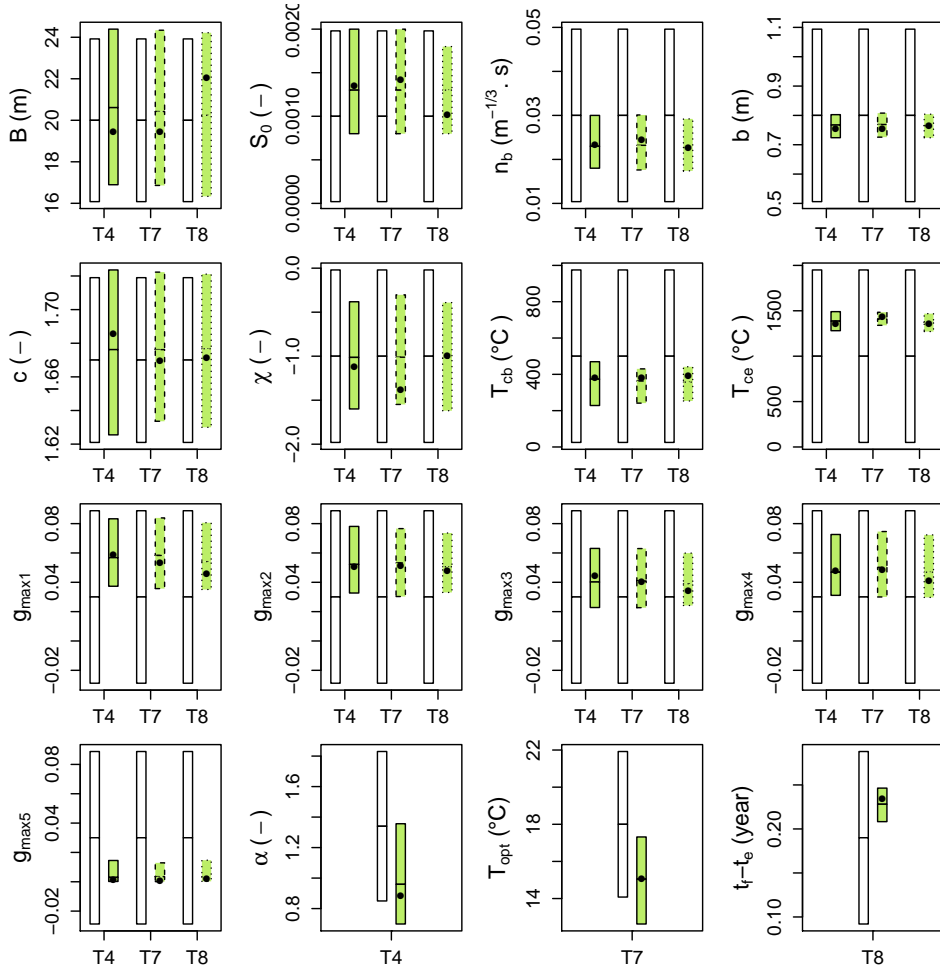


FIGURE 3.12 – Test de sensibilité par rapport à l’option du sous-modèle croissance choisie - Comparaison des distributions a priori et a posteriori des paramètres estimés avec le modèle dynamique pour l’ensemble des tests du Tableau 3.7.

### 3.3.4 Sensibilité aux données de température utilisées en entrée

#### 3.3.4.1 Utilisation des températures de l’eau lissée et brute

Dans cette partie, nous allons juger de l’utilité d’avoir à la fois la température de l’eau brute et celle lissée comme données d’entrée. En d’autres mots, nous voulons vérifier si la température de l’eau lissée va effectivement nous permettre de mieux estimer certains paramètres du modèle dynamique ou si celle-ci peut être évincée pour simplifier le calcul dans le code *BaM*. L’ensemble des tests effectués sont répertoriés dans le Tableau 3.8.

La Figure 3.13 montre les résultats obtenus pour l’estimation des paramètres du modèle dynamique après exécution du code *BaM* pour les différents cas du Tableau 3.8. Lorsque la boxplot est colorée entièrement, cela signifie que l’estimation a été réalisée en utilisant la température de l’eau brute et lissée en entrée. En revanche, si celle-ci est hachurée, seule la température de l’eau brute a été utilisée.

TABLE 3.8 – Tests de sensibilité par rapport aux données d’entrée de température de l’eau utilisées (brute ou lissée).

Sensibilité aux données de température utilisées en entrée							
Tests	A priori	Option modèle	Type de jaugeages	Niveau d’info.	Nombre de jaugeages	Période	Temp. eau
T4	vague	<i>Yin2</i>	$Q, g_{\sigma}, \cos[\eta_0], \sin[\eta_0]$	3	141,0,115,115	2009-2013	$T, T_s$
T9	vague	<i>Yin2</i>	$Q, g_{\sigma}, \cos[\eta_0], \sin[\eta_0]$	3	141,0,115,115	2009-2013	$T$
T7	vague	<i>Yin1</i>	$Q, g_{\sigma}, \cos[\eta_0], \sin[\eta_0]$	3	141,0,115,115	2009-2013	$T, T_s$
T10	vague	<i>Yin1</i>	$Q, g_{\sigma}, \cos[\eta_0], \sin[\eta_0]$	3	141,0,115,115	2009-2013	$T$
T8	vague	<i>Yin3</i>	$Q, g_{\sigma}, \cos[\eta_0], \sin[\eta_0]$	3	141,0,115,115	2009-2013	$T, T_s$
T11	vague	<i>Yin3</i>	$Q, g_{\sigma}, \cos[\eta_0], \sin[\eta_0]$	3	141,0,115,115	2009-2013	$T$

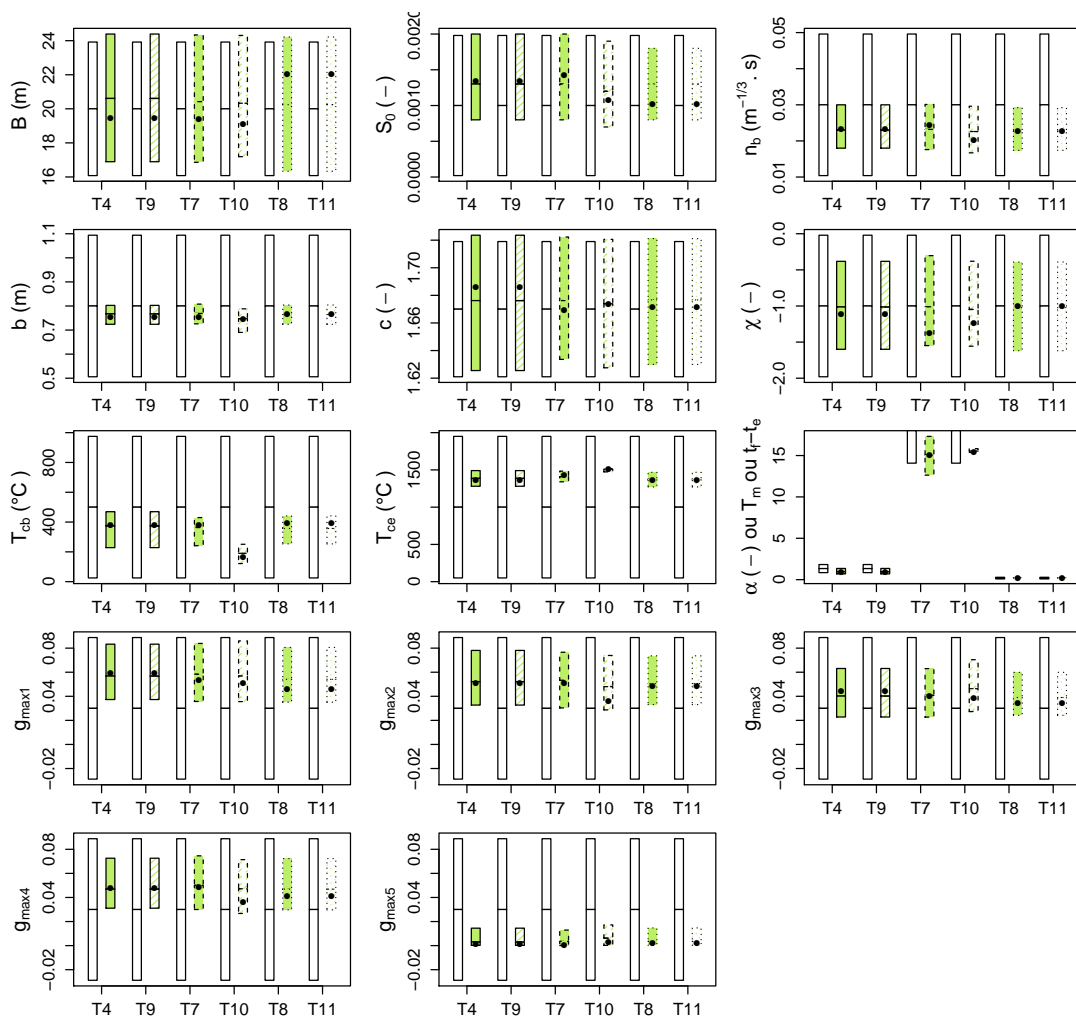


FIGURE 3.13 – Test de sensibilité par rapport à la température de l’eau choisie comme donnée d’entrée - Comparaison des distributions a priori et a posteriori des paramètres estimés avec le modèle dynamique pour l’ensemble des tests du Tableau 3.8.

Le température de l'eau lissée ne sert pas directement lorsque l'on utilise les options *Growth Yin2* et *Growth Yin3* (Figure 3.13). Elle est utile seulement pour une meilleure estimation des paramètres dérivés du modèle, à savoir  $T_m$  pour chaque année (voir Figure 3.14). D'ailleurs avec  $T_s$  prise comme donnée d'entrée, l'estimation des paramètres dérivés  $T_m$  semble meilleure que lorsqu'uniquement  $T$  est utilisée. L'option *Growth Yin1* utilise directement la température lissée. Au vu des résultats obtenus, il semblerait que lorsque  $T$  seule est utilisée, les estimations des paramètres du modèle sont plus précises qu'avec  $T$  et  $T_s$ . Nous remettons donc en question l'utilité de  $T_s$ . Pour simplifier le modèle et rendre l'outil *BaM* plus simple à utiliser, nous proposons de retirer cette variable d'entrée.

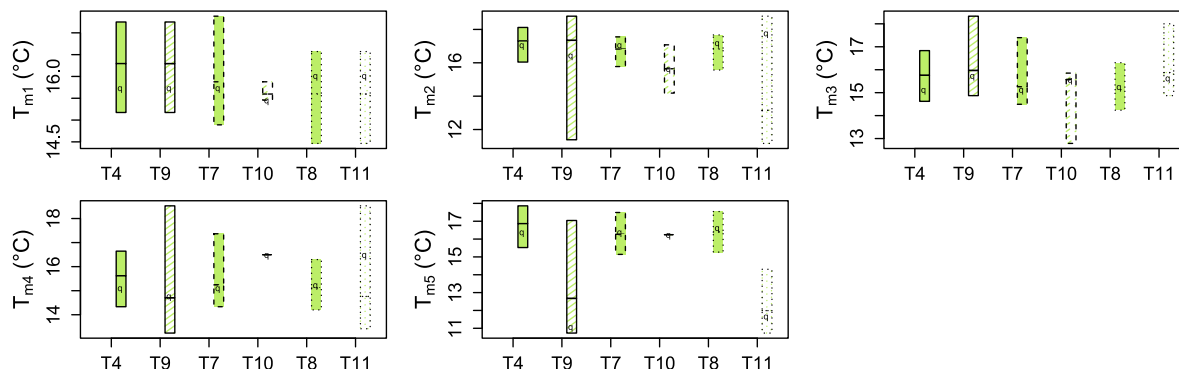


FIGURE 3.14 – Test de sensibilité par rapport à la température de l'eau choisie comme donnée d'entrée - Analyses des paramètres dérivés.

### 3.3.4.2 Utilisation de la température de l'air lissée et brute

Sur certaines stations hydrométriques, la température de l'eau n'est pas mesurée. Cette donnée est néanmoins nécessaire pour faire fonctionner notre objet modèle *Vegetation*. En revanche, grâce aux réanalyses SAFRAN, nous avons quasiment toujours accès à la température de l'air. Pour certaines stations la relation température de l'air / température de l'eau est très explicite. Pour le cas de Ladhof, une relation linéaire est observée (voir Figure 3.15). L'utilisation de l'une ou l'autre température donnera globalement les mêmes résultats (voir Figure 3.16).

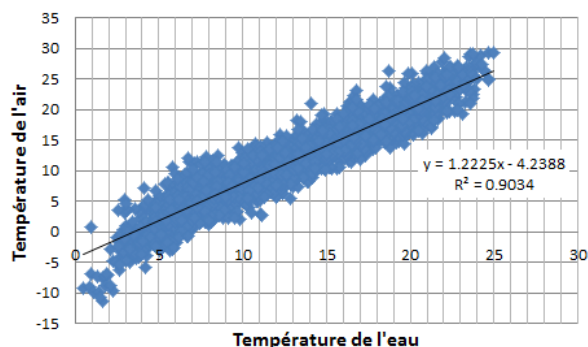


FIGURE 3.15 – Relation entre la température de l'eau et de l'air pour la station de Ladhof.

En revanche, pour d'autres stations la relation est moins évidente (température de l'eau constante, température de l'eau variant à cause d'un apport de nappe, ou autre). Dans ce cas, notre modèle proposé ne sera pas utilisable pour estimer les débits. Il faudra donc explorer d'autres pistes et utiliser d'autres modèles de croissance (ex : utilisant le rayonnement, les nutriments, l'oxygène dissout, etc.) pour pouvoir étudier ce genre de station. Par rapport au modèle dynamique et à son implémentation dans *BaM*, l'idée serait donc d'augmenter le nombre de sous-modèles de croissance en option pour permettre de couvrir le plus de cas possibles.

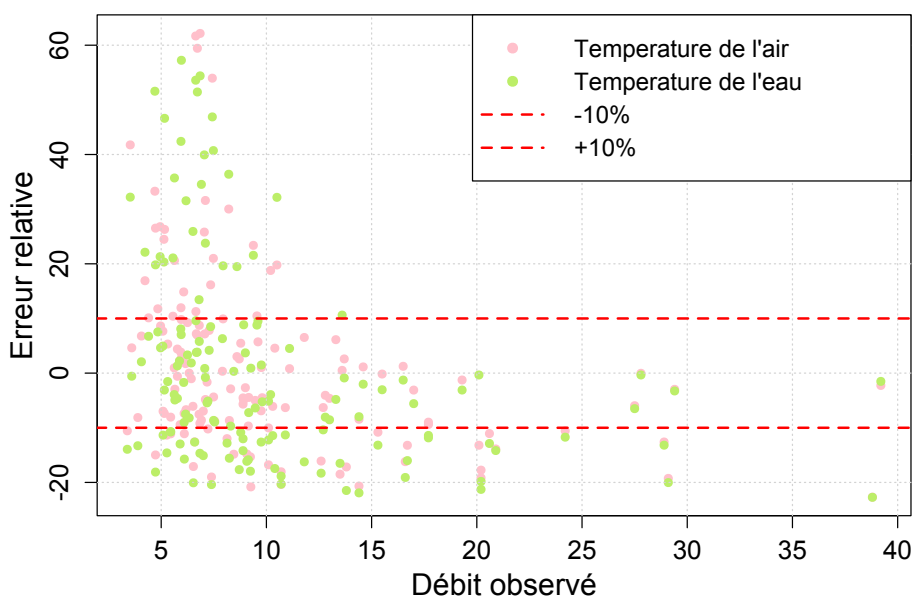


FIGURE 3.16 – Erreurs relatives de débits déduites de la reconstruction de la chronique de débit de la période 1 en fonction de la valeur du débit observé. Les points verts et roses représentent les erreurs issues du calcul avec le modèle *Vegetation* avec pour donnée d'entrée la température de l'eau et de celui avec le modèle *Vegetation* avec pour donnée d'entrée la température de l'air, respectivement.

### 3.4 Amélioration du modèle proposé

Nous avons vu que le modèle *Vegetation* permettait une meilleure estimation des débits pour une station végétalisée que le modèle non-dynamique *BaRatin* (voir partie 3.2). En revanche, des erreurs relatives en termes de débits atteignant jusqu'à 60% sont encore observables (voir Figure 3.8), notamment pour l'estimation des faibles débits. Il est donc nécessaire d'améliorer le modèle proposé.

Nous proposons d'effectuer une analyse par année de la période 1. Le modèle *Vegetation* va être appliqué à chacune de ces années. Les paramètres estimés du modèle sont comparés dans le but de détecter ceux qui s'avèrent stables au fur et à mesure des années et ceux qui varient. A la suite de cette analyse, nous serons en mesure de décider si des paramètres initialement variables doivent être fixés dans le modèle et inversement.

Le Tableau 3.9 récapitule les différents tests effectués par année sur la période 1.

TABLE 3.9 – Analyse par année - récapitulatifs des différents tests.

Tests	A priori	Option modèle	Type de jaugeages	Niveau d'info.	Nombre de jaugeages	Période	Temp. eau
T12	vague	<i>Yin2</i>	$Q, g_{\sigma}, \cos[\eta_0], \sin[\eta_0]$	3	141,0,115,115	2009	$T, T_s$
T13	vague	<i>Yin2</i>	$Q, g_{\sigma}, \cos[\eta_0], \sin[\eta_0]$	3	141,0,115,115	2010	$T, T_s$
T14	vague	<i>Yin2</i>	$Q, g_{\sigma}, \cos[\eta_0], \sin[\eta_0]$	3	141,0,115,115	2011	$T, T_s$
T15	vague	<i>Yin2</i>	$Q, g_{\sigma}, \cos[\eta_0], \sin[\eta_0]$	3	141,0,115,115	2012	$T, T_s$
T16	vague	<i>Yin2</i>	$Q, g_{\sigma}, \cos[\eta_0], \sin[\eta_0]$	3	141,0,115,115	2013	$T, T_s$

La Figure 3.17 présente les résultats des estimations des paramètres du modèle par année. L'analyse de leurs distributions a posteriori nous permet de juger de leur stabilité au cours de la période. Les paramètres non dépendant de la végétation, à savoir  $B$ ,  $S_0$ ,  $n_b$ ,  $b$ , et  $c$  sont stables ; leurs distributions se chevauchent au cours de la période 1.

Le paramètre le plus instable est incontestablement  $T_{ce}$ , à savoir la température cumulée d'extinction servant à estimer le temps d'extinction  $t_e$  dans le sous-modèle de croissance. Dans la version du modèle *Vegetation* proposée, ce paramètre est estimé une fois pour l'ensemble de la période. Nous proposons à l'image du paramètre  $g_{max}$  de le faire varier et l'estimer chaque année. Ceci nous amène donc à questionner l'utilité de la température de l'eau en entrée. Dans ce cas, le paramètre  $t_e$  du sous-modèle croissance peut être assimilé à un paramètre stochastique à déterminer chaque année dans le modèle sans utiliser  $T_{ce}$ . Le modèle de croissance se transformerait donc peu à peu en un modèle statistique au détriment de l'aspect physique et biologique initialement voulu. L'aspect biologique est néanmoins très présent dans la description mathématique de l'évolution de la plante (démarrage, croissance, déclin).

Le paramètre  $T_{cb}$ , excepté pour l'année 2012, semble plutôt stable. Cette exception peut sans doute s'expliquer par un retard dans le cycle de croissance de la végétation dû à une mort tardive des plantes durant l'année 2011 (voir Figure 1.14). Ce dernier peut être estimé qu'une seule fois pour l'ensemble d'une période stable. La température de l'eau doit donc rester présente en entrée pour l'estimation de ce paramètre. Les paramètres  $\alpha$  et  $\chi$  sont également plutôt stables.

A contrario, après analyse des distributions a posteriori du  $g_{max}$ , nous pensons qu'il n'est pas forcément nécessaire de le faire varier chaque année. Il serait sans doute intéres-

sant d'avoir des données provenant d'autres stations pour vérifier cette hypothèse. Faute de données, nous pensons qu'il serait judicieux de modifier le modèle *Vegetation* dans *BaM* pour couvrir le plus de cas possibles et le laisser plus flexible. L'idéal serait que l'utilisateur, grâce à son expertise, puisse choisir les paramètres à fixer sur une période ou à faire varier par année (ou autre durée) dans le sous-modèle croissance du modèle *Vegetation* (ex :  $g_{max}$ ,  $T_{ce}$ , les deux ?,  $T_{cb}$ ,  $\alpha$ ).

Dans le cas de Ladhof, si l'on permettait au paramètre  $T_{ce}$  de varier chaque année, les erreurs relatives de débits seraient sans doute extrêmement réduites par rapport à celle présentées sur la Figure 3.5, approchant au final celles obtenues suite à l'analyse par année (Figure 3.18), à savoir des erreurs relatives comprises entre  $\pm 10\%$ . Un nouvel exécutable du modèle *Vegetation* faisant varier  $T_{ce}$  chaque année et fixant  $g_{max}$  sur l'ensemble de la période d'étude devrait être proposé prochainement pour vérifier nos affirmations.

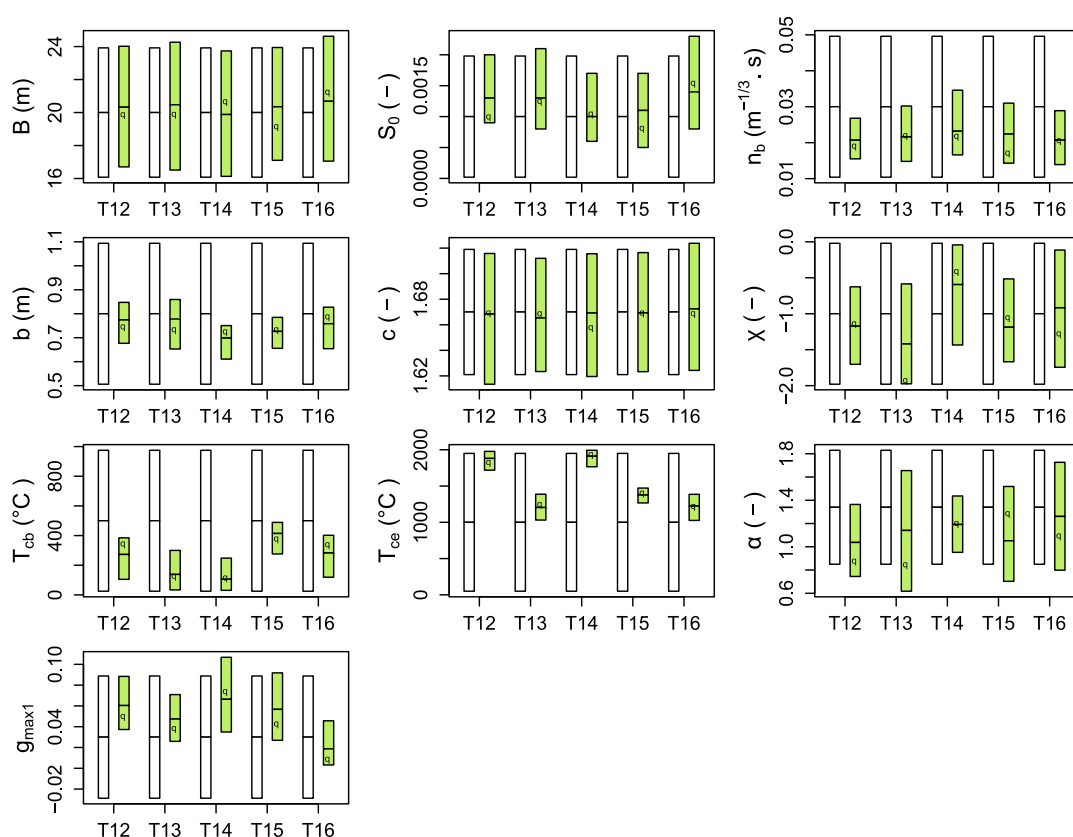
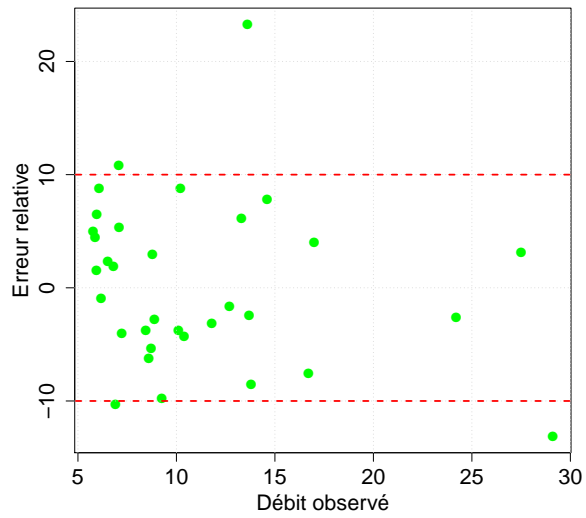
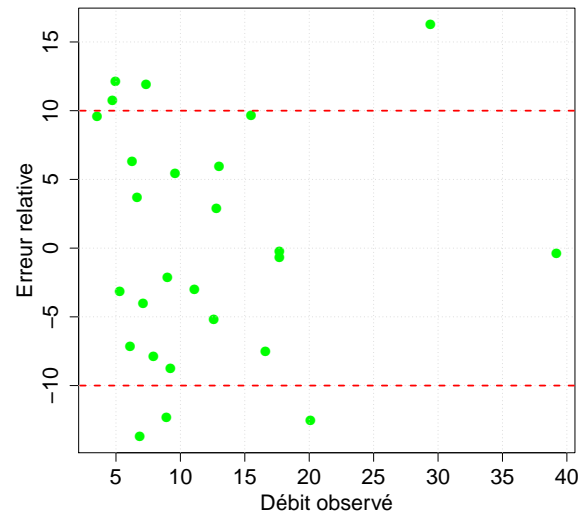


FIGURE 3.17 – Estimation a priori et a posteriori des paramètres du modèle *Vegetation* par année.

La comparaison entre la reconstruction des cycles de croissance obtenue avec le modèle *Vegetation* appliqué sur la période 1 avec celle obtenue avec le modèle *Vegetation* appliqué par année confirme l'intérêt de modifier et d'améliorer notre modèle ainsi que  $T_{ce}$  n'est pas le bon critère pour prédire  $t_e$  (voir Figure 3.19). Les cycles de croissance sont globalement bien reconstruits si l'on utilise le modèle annuel. Les valeurs des jaugeages de proxys croissance sont obtenues en suivant le processus détaillé dans la partie 1.5.1.1 et en utilisant les paramètres estimés pour le modèle *Vegetation* choisi. Les observations sont



(a) T12 - année 2009



(b) T13 - année 2010

FIGURE 3.18 – Exemple d’erreurs relatives obtenues en fonction du débit observée suite à une analyse par année. La Figure 3.18a présente les résultats pour le test T12 (année 2009) et la Figure 3.18b pour le test T13 (année 2010).

recalculées en fonction du calage du modèle choisi. Les valeurs de proxys croissance ne sont pas les mêmes que celles présentées sur la Figure 1.13. Le modèle dynamique choisi et amélioré semble donc prometteur et adéquat.



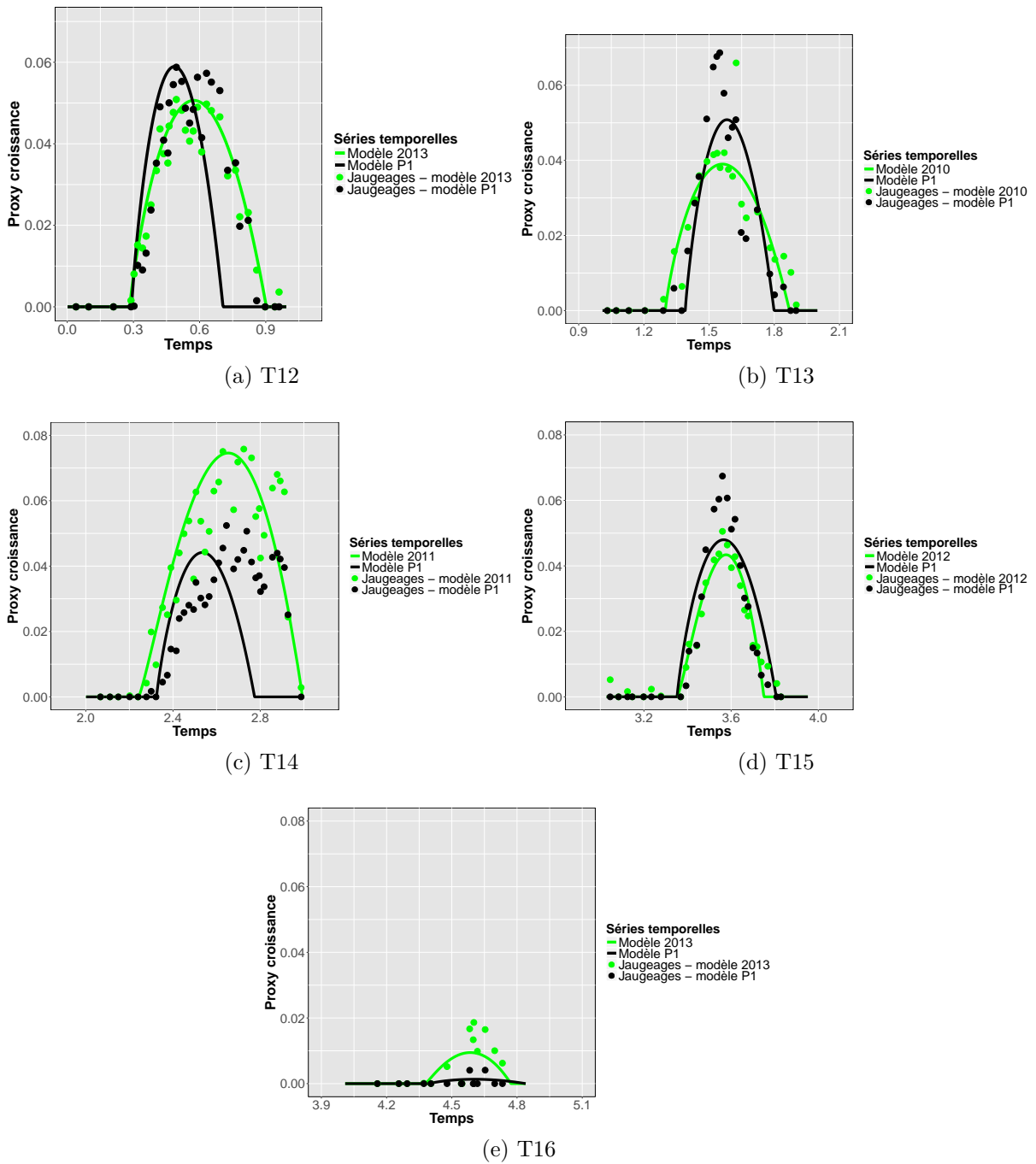


FIGURE 3.19 – Reconstruction des cycles de proxys croissance (indicateurs de biomasse). Comparaison entre le modèle *Vegetation* utilisé par année et le modèle *Vegetation* utilisé sur la période P1 (2009-2013).

# Conclusions et perspectives

Un modèle dynamique pour l'estimation des débits des stations hydrométriques affectées par la présence de végétation aquatique a été développé. A l'aide d'une étude bibliographique et de l'analyse d'un cas de station bien documenté (Ill à Colmar - Ladhof), un modèle à base physique et simple d'utilisation a été élaboré. Son intérêt est qu'il ne demande pas de connaissances poussées par rapport aux plantes présentes sur la station.

Le modèle dynamique s'écrit comme le produit d'un débit non-influencé par la végétation avec un terme décrivant l'influence de la végétation. Ce dernier varie temporellement et est fonction de la rugosité induite par l'évolution des plantes. Un sous-modèle est donc nécessaire et a été proposé pour décrire la croissance de la plante au cours du temps.

Par rapport à un modèle classique de type *BaRatin*, le modèle proposé fournit de meilleurs résultats. Les tests effectués sur la station de Ladhof montrent néanmoins que sa performance est limitée pour l'estimation des faibles débits. Des erreurs jusqu'à plus de 50% sont encore observées. Pour les plus forts débits les erreurs sont comprises entre  $\pm 20\%$ , ce qui est plus acceptable. En revanche, les reconstructions des cycles de croissance de la végétation à la suite des estimations des paramètres du modèle ne sont pas satisfaisantes. La forme du cycle est souvent mal représentée. Des améliorations ont été proposées.

Nous pensons que les erreurs en termes de débits sont principalement dues à une mauvaise estimation des paramètres du sous-modèle liés à l'évolution de la végétation. Une analyse à l'échelle annuelle a permis de montrer que certains paramètres restaient stables au cours des années tandis que d'autres variaient significativement. Dans notre sous-modèle, le paramètre que nous avons choisi comme variable, à savoir la croissance maximale de la plante (sorte d'indicateur de la biomasse maximale), n'était pas le plus adéquat. D'autres comme le temps d'extinction de la plante (mort de la plante) semblent plus instables. Le temps d'extinction initialement relié à un paramètre physique (la température de l'eau cumulée d'extinction) ne devient plus qu'un paramètre stochastique du sous-modèle si l'on choisit de le faire varier chaque année. En faisant varier tous les paramètres liés à la végétation chaque année, les erreurs relatives de débits en fonction du débit observé sont regroupées entre  $\pm 10\%$ .

Il n'est sans doute pas nécessaire de faire varier l'ensemble des paramètres liés aux plantes lors d'une étude d'une station végétalisée pour obtenir une bonne estimation du débit. Selon son expertise, le gestionnaire de la station pourrait choisir de fixer ou faire varier les paramètres du modèle dynamique implémenté dans BaM sur une période stable (sans détarages nets). Dans notre cas, nous avons choisi de les faire varier chaque année sur une période de 5 ans de stabilité. Le temps où la variation doit se produire pourra être spécifié par l'utilisateur par l'intermédiaire d'une donnée d'entrée. Un nouvel exécutable du modèle dynamique devrait être proposé prochainement dans ce sens.

Dans cette étude, nous n'avons pas abordé la question d'une utilisation du modèle en temps réel. Comme le modèle fonctionne avec l'analyse des données de température de l'eau sur l'ensemble de l'année, certains paramètres comme par exemple les temps optimal, de démarrage ou d'extinction, vont être difficiles à déterminer. La solution pourrait être d'estimer ces paramètres de manière purement statistique sans utiliser les données de température pour l'année en cours. Les incertitudes sur ces paramètres estimés seraient réduites en utilisant les valeurs obtenues après analyse des chroniques de température de l'eau durant les années précédentes de la période stable étudiée. L'estimation du paramètre  $g_{max}$  (croissance maximale de la plante) en temps réel peut poser également problème si celui-ci varie chaque année. Dans le cas de Ladhof, celui-ci est plutôt stable, mais sur une autre station aucune information nous permet de dire que son comportement sera similaire. Comme pour les paramètres liés à la température, la valeur de  $g_{max}$  sera évaluée grâce aux valeurs des années précédentes puis son incertitude sera réduite lors d'ajout de nouveaux jaugeages lors de l'estimation. Des développements sont donc encore nécessaires avant que le modèle soit utilisable en temps réel.

Dans ce rapport, nous avons seulement étudié le cas d'un contrôle chenal unique affecté par la présence de végétation. Le cas d'un contrôle par section où il y aurait de la mousse présente sur un seuil par exemple n'a pas été traité. Le modèle dynamique proposé n'est pas adapté pour ce genre de cas. La mousse est souvent nettoyée manuellement et ne croît pas de la même manière que le type de plantes présenté dans cette étude. Le sous-modèle de croissance n'est pas indispensable. Une simple correction de la hauteur d'eau en fonction de la hauteur de mousse présente sur le seuil suffirait pour une bonne estimation des débits.

Une perspective de ce travail concerne l'intégration de notre modèle lors d'analyses multicontrôles. Une réflexion est à prévoir quant à la gestion de la continuité entre les différents contrôles (par exemple entre une partie de la courbe de tarage variant en fonction du temps et l'autre partie indépendante de ce dernier ou alors entre deux parties de courbe dépendant du temps). Pour l'instant, nous sommes capables avec les résultats de l'estimation du modèle *Vegetation* dans *BaM* de créer des courbes de tarage à contrôle unique. Le cas multicontrôle, pris en compte dans le modèle *BaRatin*, n'est pas encore développé.

# Bibliographie

- ABERLE, J. et JÄRVELÄ, J. (2013). Flow resistance of emergent rigid and flexible flood-plain vegetation. *Journal of Hydraulic Research*, 51(1):33–45.
- ADAMS, M.-P., COLLIER, C., UTHICKE, S., OW, Y.-X., LANGLOIS, L. et O'BRIEN., K. (2017). Model fit versus biological relevance : Evaluating photosynthesis-temperature models for three tropical seagrass species. *Scientific reports*, 7(39930):1–12.
- ALBAYRAK, I., NIKORA, V., MILER, O. et O HARE, M. (2014). Flow-plant interactions at leaf, stem and shoot scales : drag, turbulence, and biomechanics. *Aquatic Sciences*, 76(2):269–294.
- ARCEMENT, G.-J. et SCHNEIDER, V.-R. (1989). Guide for selecting manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains. *U.S. Geological Survey Water Supply*, Paper 2339:1–67.
- BARNES, H.-H. (1967). Roughness characteristics of natural channels : color photographs and descriptive data for 50 stream channels for which roughness coefficients have been determined. *U.S. Geological Survey Water Supply*, Paper 1849.
- BONNIFAIT, L., LE COZ, J. et RENARD, B. (2012). Analyse des courbes de tarage de 7 stations hydrométriques de la dreual alsace. Rapport technique, Irstea Lyon.
- BRIÈRE, J.-F., PRACROS, P., ROUX, A.-Y.-L. et PIERRE, J. (1999). A novel rate model of temperature-dependent development for arthropods. *Environmental Entomology*, 28:22–29.
- CARR, G.-M., DUTHIE, H.-C. et TAYLOR, W. (1997). Models of aquatic plant productivity : a review of the factors that influence growth. *Aquatic Botany*, 59:195–215.
- CHOW, V.-T. (1959). *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill, NewYork.
- COELHO, D.-T. et DALE, R.-F. (1980). An energy-crop growth variable and temperature function for predicting maize growth and development : planting to silking. *Agronomy journal*, 72:503–510.
- COON, W. (1998). Estimation of roughness coefficients for natural stream channels with vegetated banks. *U.S. Geological Survey Water Supply*, Paper 244:145.
- COWAN, W.-L. (1956). Estimating hydraulic roughness coefficients. *Agricultural Engineering*, 37(7):473–475.

- DE LANGRE, E. (2008). Effect of wind on plants. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 40:141–168.
- DEUTSCH, C.-A. (2008). Impacts of climate warming on terrestrial ectotherms across latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105:6668–6672.
- FATHI-MAGHADAM, M. et KOUWEN, N. (1997). Nonrigid, nonsubmerged, vegetative roughness on floodplains. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(1):51–57.
- FOLKARD, A.-M. (2011). Vegetated flows in their environmental context : a review. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering and Computational Mechanics*, 164(1):3–24.
- GUERRERO, J.-L., WESTERBERG, I.-K., HALLDIN, S., XU, C.-Y. et LUNDIN, L.-C. (2012). Temporal variability in stage discharge relationships. *Journal of Hydrology*, 446-447:90–102.
- HICKS, D.-M. et MASON, P.-D. (1999). *Roughness Characteristics of New Zealand Rivers*. NIWA, Christchurch.
- JALONEN, J. (2015). *Hydraulics of vegetated flows : estimating riparian plant drag with a view on laser scanning applications*. Thèse de doctorat, Aalto University School of Engineering.
- JÄRVELÄ, J. (2004). Determination of flow resistance caused by non-submerged woody vegetation. *International Journal of River Basin Management*, 2(1):61–70.
- JOHNSON, F.-H., EYRING, H. et STOVER, B.-J. (1974). *The theory of rate processes in biology and medicine*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- KOUWEN, N. et FATHI-MOGHADAM, M. (2000). Friction factors for coniferous trees along rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(10):732–740.
- LACTIN, D., HOLLIDAY, N.-J., JOHNSON, D.-L. et CRAIGEN, R. (1995). Improved rate model of temperature-dependent development by arthropods. *Environmental Entomology*.
- LE COZ, J., RENARD, B., BONNIFAIT, L., BRANGER, F. et LE BOURSICAUD, R. (2014). Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves : A Bayesian approach. *Journal of Hydrology*, 509:573–587.
- LIMERINOS, J.-T. (1970). Determination of the manning coefficient from measured bed roughness in natural channels. *U.S. Geological Survey Water Supply*, Paper 1898-B.
- LUHAR, M. et NEPF, H. (2013). From the blade scale to the reach scale : a characterization of aquatic vegetative drag. *Advances in Water Resources*, 51:305–316.
- MANSANAREZ, V. (2016). *Non-unique stage-discharge relations : Bayesian analysis of complex rating curves and their uncertainties*. Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes.

- MANSANAREZ, V., RENARD, B., LE COZ, J. et LANG, M. (2018). Shift happens ! A stage-period-discharge model for hydrometric rating changes at known times. Unpublished.
- MEYER-PETER, E. et MÜLLER, R. (1948). Formulas for bed-load transport. *In Proceedings of the 2nd IAHR Congress*, pages 39–64, Stockholm, Sweden.
- MORIN, J., LECLERC, M., SECRETAN, Y. et BOUDREAU, P. (2000). Integrated twodimensional macrophytes-hydrodynamic modeling. *Journal of Hydraulic Research*, 38(3):163–172.
- MORLOT, T. (2014). *La gestion dynamique des relations hauteur-débit des stations d'hydrométrie et le calcul des incertitudes associées*. Thèse de doctorat, Grenoble University. [in French].
- NEARY, V., CONSTANTINESCU, S., BENNETT, S. et DIPLAS, P. (2012). Effects of vegetation on turbulence, sediment transport, and stream morphology. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(9):765–776.
- NEPF, H.-M. (2012). Hydrodynamics of vegetated channels. *Journal of Hydraulic Research*, 50(3):262–279.
- NIKORA, V. (2010). Hydrodynamics of aquatic ecosystems : An interface between ecology, biomechanics and environmental fluid mechanics. *River Research and Applications*, 26:367–384.
- OLSEN, J., MCMAHON, C.-R. et HAMMER, G.-L. (1993). Prediction of sweet maize phenology in subtropical environments. *Agronomy journal*, 85:410–415.
- O'NEILL, R.-V., GOLDSTEIN, R.-A., SHUGART, H.-H. et MANKI, J.-B. (1972). Terrestrial ecosystem energy model, us ibp eastern deciduous forest biome memo report 72-19. Rapport technique, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge.
- PASCHE, E. et ROUVÉ, G. (1985). Overbank flow with vegetatively roughened flood plains. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(9):1262–1278.
- PETRYK, S. et BOSMAJIAN, G. (1975). Analysis of flow through vegetation. *Journal of Hydraulic Division*, 101(7):871–884.
- PUECHBERTY, R., PERRET, C. et POLIGOT-PITSCH, S. (2017). Charte qualité de l'hydrométrie - Guide de bonnes pratiques. Rapport technique, Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer.
- RAINVILLE, F., HUTCHINSON, D., A. STEAD A, d. D. M. et ELLIOT, D. (2016). Hydrometric manual data computations, stage-discharge model development and maintenance. Rapport technique, Water Survey of Canada, Environment and Climate Change Canada.
- RATKOWSKY, D.-A., LOWRY, R.-K., McMEEKIN, T.-A., STOKES, A.-N. et CHANDLER, R.-E. (1983). Model for bacterial culture growth rate throughout the entire biokinetic temperature range. *Journal of Bacteriology*, 154:1222–1226.

- RENARD, B. (2017). Un code de calcul pour l'estimation d'un modèle quelconque et son utilisation en prédiction. Rapport technique, Irstea, unité de recherche RiverLy.
- ROOM, P.-M. (1986). Equations relating growth and uptake of nitrogen by *salvinia molesta* to temperature and the availability of nitrogen. *Aquatic Botany*, 24:43–59.
- SHIELDS, F.-D., COULTON, K. et NEPF, H. (2017). Representation of vegetation in two-dimensional hydrodynamic models. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(8):1–9.
- SPAIN, J.-D. (1982). *BASIC microcomputer models in biology*. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, MA.
- THÉBAULT, J.-M. (1985). étude expérimentale de la nutrition d'un copépode commun (*temora stylifera dana*). effets de la température et de la concentration de nourriture. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 93:223–234.
- TOLLENAAR, M., DAYNARD, T.-B. et HUNTER, R.-B. (1979). Effect of temperature on rate of leaf appearance and flowering date in maize. *Crop Science*, 19:363–366.
- VAN DER HEIDE, T., ROIJACKERS, R.-M.-M., VAN NES, E.-H. et PEETERS, E.-T.-H.-M.-. (2006). A simple equation for describing the temperature dependent growth of free-floating macrophytes. *Aquatic Botany*, 84:171–175.
- VÄSTILÄ, K. et JÄRVELÄ, J. (2014). Modeling the flow resistance of woody vegetation using physically based properties of the foliage and stem. *Water Resources Research*, 50:229–245.
- VÄSTILÄ, K. et JÄRVELÄ, J. (2017). Characterizing natural riparian vegetation for modeling of flow and suspended sediment transport. *Journal of Soils and Sediments*, pages 1–17.
- WESTERBERG, I., GUERRERO, J.-L., SEIBERT, J., BEVEN, K. et HALLDIN, S. (2011). Stage-discharge uncertainty derived with a non-stationary rating curve in the Choluteca River, Honduras. *Hydrological Processes*, 25(4):603–613.
- WHITTAKER, P., WILSON, C., ABERLE, J., RAUCH, H.-P. et XAVIER, P. (2013). A drag force model to incorporate the reconfiguration of full-scale riparian trees under hydrodynamic loading. *Journal of Hydraulic Research*, 51(5):569–580.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (2010). Manual on Stream Gauging. Computation of discharge - Vol. II. Rapport technique 1044, WMO.
- YAN, W. et HUNT, L.-A. (1999). An equation for modelling the temperature response of plants using only the cardinal temperatures. *Annals of Botany*, 84:607–614.
- YIN, X., GOUDRIAAN, J., LANTINGA, E.-A., VOS, J. et SPIERTZ, H.-J. (2003). A flexible sigmoid function of determinate growth. *Annals of Botany*, 91:361–371.
- YIN, X., KROPFF, M.-J., MCLAREN, G. et VISPERAS, R.-M. (1995). A nonlinear model for crop development as a function of temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77:1–16.