
Synthèse comparative des méthodes de calculs

Les chapitres précédents ont montré les performances de plusieurs méthodes de calcul basées sur les moyennes, les régressions linéaires (intégrales et segmentées) et l'approche de séparation d'hydrogramme suivant les différents constituants étudiés et plusieurs indicateurs de variabilité. Ce chapitre présente dans un premier temps la comparaison de leurs performances afin de choisir leurs domaines d'application optimale. Dans un second temps, nous avons testé l'utilisation de la méthode basée sur la distribution statistique des concentrations (Mailhot et al, 2008, description dans le paragraphe 2.1.4.5.) sur la base d'un échantillon plus réduit de 25 sites sélectionnés.

Nous présentons ici les principaux résultats, pour plus de précisions, le lecteur peut se référer aux deux articles «Optimal methods for annual riverine flux reporting from infrequent sampling » et «Load estimation method using distributions with covariates : a comparison with commonly used estimation methods » présentés dans l'annexe 4

Enfin, compte tenu de ces résultats, nous présenterons les bases d'un système expert permettant de choisir la fréquence d'échantillonnage optimale pour une méthode donnée ou alors la méthode de calcul pour une fréquence d'échantillonnage donnée. Ceci dans le but d'établir un système expert d'aide à la décision.

Afin de comparer les performances des méthodes sur une période avec une variabilité hydrologique contrastée, des suivis de surveillance de 10 ans (± 2 ans) ont été sélectionnés. Les stations avec 20 ans de données journalières ou plus ont été divisées en deux jeux de données de 10 ans. Ainsi la base de données utilisée pour comparer les performances des méthodes de calculs est constituée de i) 21 stations avec huit à neuf ans de données ; ii) 41 stations avec 10 ans de données ; iii) 23 stations dont les données sont divisées en deux à quatre jeux de données. L'ensemble forme une base composée de 120 jeux de données de 8 à 10 ans représentant 1200 années-stations

Les biais et les imprécisions sur les flux sont déterminés pour chaque méthode de calcul à toutes les stations, à partir des simulations de suivis discrets à différentes fréquences (3 à 30 jours). La distribution des erreurs est ensuite analysée pour chaque méthode sur la base de l'exposant tronqué (b_{50sup}) de la régression C-Q et l'indicateur de durée du flux d'eau en 2% du temps ($W_{2\%}$).

6.1 Comparaison des performances de six méthodes de calculs

Les performances des méthodes de calculs des flux sont présentées ici à travers une analyse classique pour chaque méthode par types de matériaux : sels dissous totaux (SDT), nutriments dissous (NH₄, NO₃, PO₄) ; nutriments totaux (Prot et TKN) ; matière en suspension (MES). (Figure 6.1)

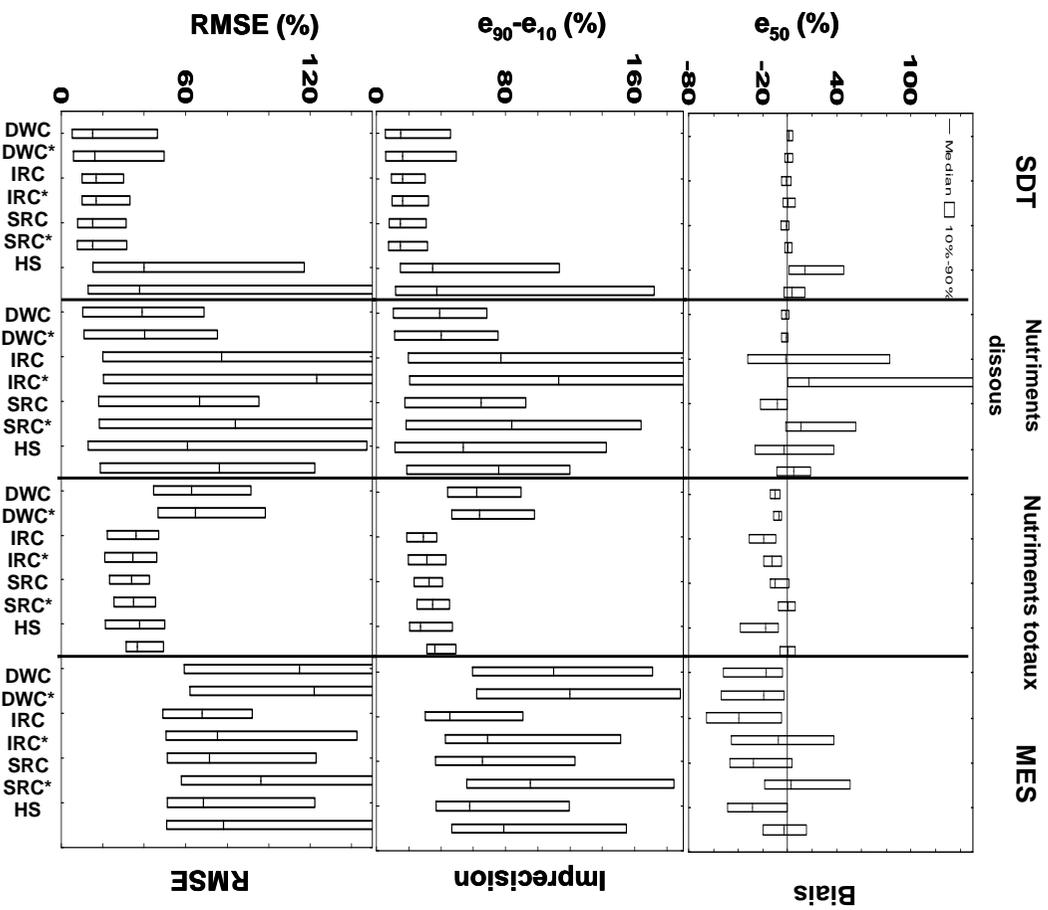


Figure 6-1 : Distribution comparée des incertitudes interannuelles-interstations, pour quatre types de matériaux fluviaux, à une fréquence mensuelle, pour huit méthodes de calculs : a) biais = e_{50} ; b) imprécisions = $e_{90} - e_{10}$; c) Erreur quadratique moyenne (RMSE)

6.1.1 Sels dissous totaux

Les biais sur l'estimation des flux sont limités de -2% à 10% par la méthode des concentrations moyennes pondérées (DWC). Le biais le plus fort est observé pour la rivière Redwood (USA, Californie) qui possède la variabilité hydrologique la plus élevée ($W_{2\%} > 37\%$) et des gammes de concentrations journalières entre 3100 et 5800 $\mu\text{S.cm}^{-1}$. La médiane des imprécisions interannuelles est aussi limitée (20%). La dispersion des imprécisions interannuelles varie entre 5% et 50%.

Avec la méthode de régression intégrale (IRC), les biais sur les estimations des flux sont très limités et la correction de Ferguson (IRC*) ne semble pas améliorer les performances. La plupart des régressions C-Q sont robustes ($r^2 > 0.5$), permettant ainsi une estimation fiable des flux même si les concentrations et les débits sont variables comme pour la rivière Dolores.

Avec les méthodes de régression segmentée (SRC₅₀ et SRC₅₀*), il n'y a pas d'amélioration des performances par rapport à IRC. La troncature n'est pas nécessaire pour l'estimation des sels dissous totaux.

Les méthodes de séparation d'hydrogramme (HS et HSM) ne sont quant à elle définitivement pas adaptées pour évaluer le flux annuel de SDT.

6.1.2 Nutriments dissous

Avec la méthode DWC, les biais sont bas (-6% à 1%) bien que les imprécisions varient de 7% pour les nitrates sur la Seine à Choisy jusqu'à 80% pour le phosphore dissous pour la rivière Sandusky à Fremont (USA, Ohio). Les flux de nutriments dissous avec la méthode IRC ont tendance à être fortement biaisés de -32% à 81%. Les relations C-Q sont souvent non linéaires avec des inflexions marquées en « U » (type d-C) ou en chevron (type c-D). Pour les types (c-S) concentrés-stables, la correction de Ferguson (IRC*) génère de forte surestimation. Les méthodes IRC et IRC* ne doivent pas être utilisées pour l'estimation du flux de nutriments dissous. La troncature permet de diminuer le biais (de 10% à 100%) et l'imprécision. Cependant en comparaison, les méthodes basées sur les moyennes (DWC, DWC*) sont plus performantes que les méthodes de régressions segmentées. L'estimation des flux par les méthodes HS et HSM sont moins performantes que les méthodes DWC et DWC* mais reste meilleure en terme de biais que les méthodes basées sur les régressions.

6.1.3 Nutriments totaux

Les méthodes DWC et DWC* génèrent des biais négatifs de -15% à -5%. Pour la méthode IRC, les flux sont systématiquement sous-estimés de -41% à -5%. Mais comme les imprécisions sont plus faibles que pour les méthodes basées sur les moyennes, les méthodes IRC et IRC* peuvent être utilisées. Pour les méthodes de régression segmentées, l'estimation de flux de nutriments totaux est meilleure que pour les méthodes de régression intégrale. La méthode segmentée corrigée SRC₅₀* génère les biais les plus bas. La dispersion de l'imprécision est du même ordre de grandeur que

celles des méthodes IRC et IRC*. Au vue des résultats, SRC₅₀ et SRC₅₀* sont plus performantes que DWC, DWC*, IRC, IRC*.

La méthode HSM génère des résultats équivalents à SRC₅₀ qui sont les deux méthodes les plus performantes pour estimer le flux annuel de nutriments totaux. La méthode HS, quant à elle, génère les biais les plus importants et est à exclure pour estimer le flux de nutriments totaux.

6.1.4 Matière en suspension

Avec les méthodes basées sur les moyennes (DWC et DWC*), les flux sont largement sous-estimés jusqu'à -80%. De plus les imprécisions sont plus fortes que pour les autres types de matériaux. Les méthodes basées sur les moyennes ne sont donc pas adaptées à l'estimation du flux annuel de MES à une fréquence de prélèvement mensuelle. La méthode IRC génère des biais forts de -65% à 1%. Ces biais sont réduits par la correction de Ferguson (-20% à 18%) pour les relations log C- log Q linéaires. Pour des relations de type c-S (exemple de la rivière Paria), l'ajustement est inapproprié et tend à augmenter largement les incertitudes. Dans ces cas, la méthode IRC* n'est pas appropriée. Les imprécisions sont plus fortes avec IRC pour les nutriments totaux et les SDT que pour les autres méthodes. La méthode de régression segmentée ne réduit pas les biais. A l'inverse la méthode SRC₅₀* est celle qui génère le biais le plus faible de toutes les méthodes de régression. En revanche, les imprécisions pour SRC₅₀* sont les plus importantes. La méthode HSM génère les biais les plus faibles sur l'estimation des flux de MES mais son imprécision reste forte. La méthode HS apparaît comme non adaptée à l'estimation du flux de MES.

6.2 Performances comparées de la méthode DC

Pour les SDT, les incertitudes sont faibles à l'exception de la moyenne des dispersions annuelles pour la rivière Redwood à Burkburnett, à cause de la forte variabilité des flux d'eau ($W_{2\%} > 20\%$).

L'estimation des flux annuels de nutriments (dissous et/ou totaux) est peu biaisée et relativement précise. Pour les MES, il existe une grande différence sur l'estimation des flux entre les rivières dont le $W_{2\%} < 10\%$, qui est non biaisée et précise et les rivières dont le $W_{2\%} > 10\%$ qui peut être non biaisée et très imprécise.

Comme les imprécisions sont fortes quelles que soient les méthodes pour l'estimation du flux de MES, cet indicateur n'est pas discriminant. La comparaison sera focalisée ici sur l'analyse des biais annuels et interannuels. Les méthodes sont comparées une à une avec la méthode DC, par l'intermédiaire d'un index k. Cet index est calculé pour une année ou une station selon : i) si l'avantage est à la méthode DC, la valeur de +1 est affectée ; ii) si l'avantage est pour les autres méthodes testées, la valeur de -1 est affectée.

Les +1 et -1 sont ensuite sommés pour tous les jeux de données en fonction des biais interannuels. Ceci va définir un index cumulatif de comparaison k. Ainsi une augmentation de k indique que la

méthode DC est la plus performante. A l'inverse, s'il y a une diminution du coefficient alors l'avantage est pour les autres méthodes.

6.2.1 Biais interannuels

La figure 6.2 présente les résultats de l'index cumulatif de comparaison k en fonction du biais interannuel.

La méthode DC est clairement plus performante que IRC* et DWC quelles que soient les valeurs de biais interannuels. Les flux annuels sont globalement mieux estimés par la méthode DC que par la méthode SRC₅₀* et HSM. Cependant la méthode DC est moins performante que HSM pour des valeurs de biais < 5%. Les jeux de données pour lesquels la méthode DC est plus performante correspondent aux stations avec un $W_{2\%} > 20\%$. Ceci suggère que les méthodes DC et HSM, en termes de biais interannuels sont d'une performance équivalente à l'exception des stations à fortes variabilités hydrologiques ($W_{2\%} > 20\%$).

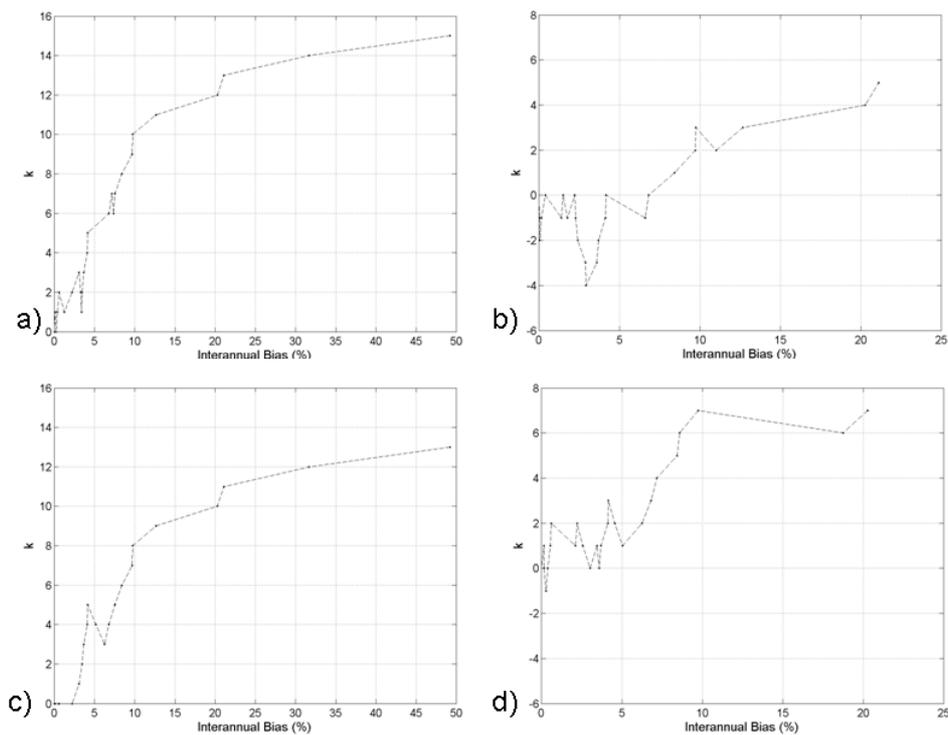


Figure 6-2 : Comparaisons des biais interannuels entre la méthode DC et a) IRC*; b) SRC₅₀*; c) DWC et d) HSM pour tous les jeux de données (échantillonnage mensuel)

6.2.2 Biais annuels

Le même index cumulatif k est calculé pour les biais annuels (équivalent à 248 ans pour 25 jeux de données). La méthode DC est plus performante que la méthode IRC* et SRC₅₀* au niveau des biais annuels.

La méthode DWC génère des biais plus faibles à DC pour des valeurs de biais inférieures à 15%. Ces faibles biais correspondent aux stations avec une faible variabilité ($W_{2\%} < 10\%$ et $b_{50sup} < 0.2$) où une valeur moyenne suffit à estimer correctement les concentrations. En comparaison avec la méthode HSM, pour des valeurs de biais entre 5% et 20%, HSM est largement meilleure que DC. Pour des valeurs $>25\%$, les performances des deux méthodes sont similaires.

La figure 6.3 est construite sur le même principe que les précédentes mais la performance est représentée en fonction des valeurs de $W_{2\%}$ pour les jeux de données sur les MES et en fonction des biais annuels pour les rivières avec un $W_{2\%} > 20\%$ (représentant un total de 80 ans de données). Ainsi pour des $W_{2\%} < 20\%$, HSM génère des biais annuels sur l'estimation des flux de MES plus faibles qu'avec la méthode DC. Pour les stations avec $W_{2\%} > 20\%$, la méthode est cette fois supérieure à HSM.

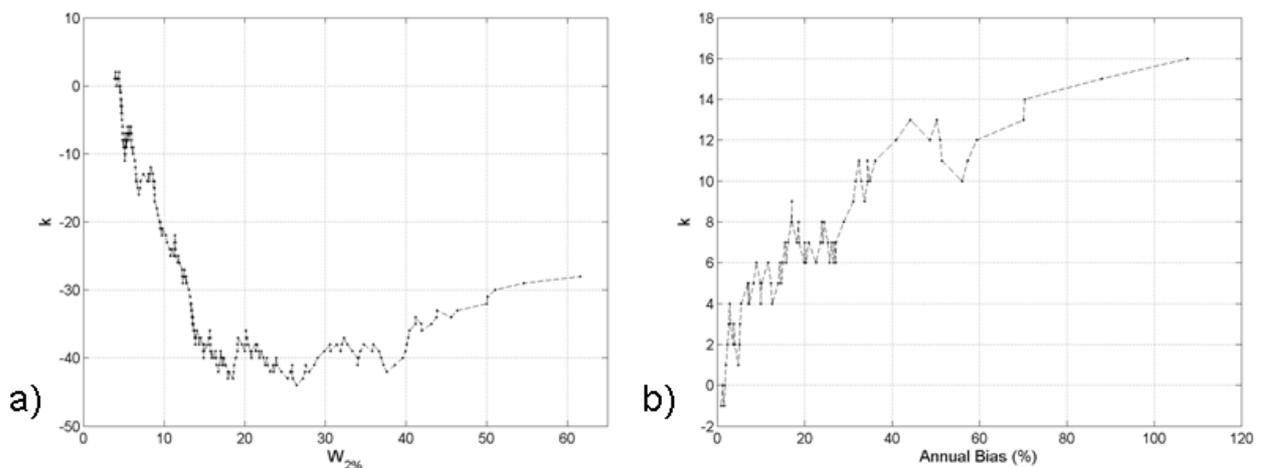


Figure 6-3 : Index cumulative de comparaison k pour les biais annuels (méthodes DC vs. HSM) en fonction du : a) $W_{2\%}$; b) biais annuels pour les stations avec $W_{2\%} > 20\%$ à un échantillonnage mensuel (jeux de données MES)

Toutes les comparaisons entre les méthodes ont été effectuées à une fréquence de prélèvement mensuelle. Cependant la fréquence d'échantillonnage peut avoir un impact sur l'estimation des flux annuels.

6.3 Les bases d'un système expert...

Les performances des méthodes de calculs évaluées précédemment ne sont plus maintenant analysées en fonction du type de matériaux. Les incertitudes sont ainsi regroupées par gamme de $M_{2\%}$, $W_{2\%}$ et b_{50sup} pour tous les matériaux confondus.

6.3.2 Variabilité du flux de matière ($M_{2\%}$)

L'indicateur de durée des flux de matière ($M_{2\%}$) est actuellement le facteur clé qui détermine le biais et l'imprécision sur l'estimation des flux. L'influence du $M_{2\%}$ est ici testée pour les quatre mêmes méthodes et pour cinq classes de $M_{2\%}$, i) $<10\%$; ii) de 10% à 20% ; iii) de 20% à 30% ; iv) de 30% à 50% ; v) $>50\%$ (Figure 6.4).

Les biais sur les flux annuels par DWC sont directement liés à l'indicateur de durée $M_{2\%}$. Pour des $M_{2\%} < 10\%$, les biais sont quasi nuls et augmentent avec le $M_{2\%}$. La même remarque peut être faite pour IRC* mais avec des dispersions plus importantes. Pour SRC₅₀*, la médiane des biais est également nulle mais la dispersion à l'intérieur de chaque classe est très importante de -10% à 90% pour des $M_{2\%} > 50\%$. Pour HSM, les biais ne sont pas reliés au $M_{2\%}$. Pour toutes les méthodes testées, les imprécisions augmentent avec le $M_{2\%}$, particulièrement DWC et SRC₅₀*. $M_{2\%}$ ne peut pas être obtenu à partir d'un suivi discret, cependant il peut être estimé avec un bon niveau de confiance par $W_{2\%}$ et b_{50sup} (Moatar *et al.*, 2010).

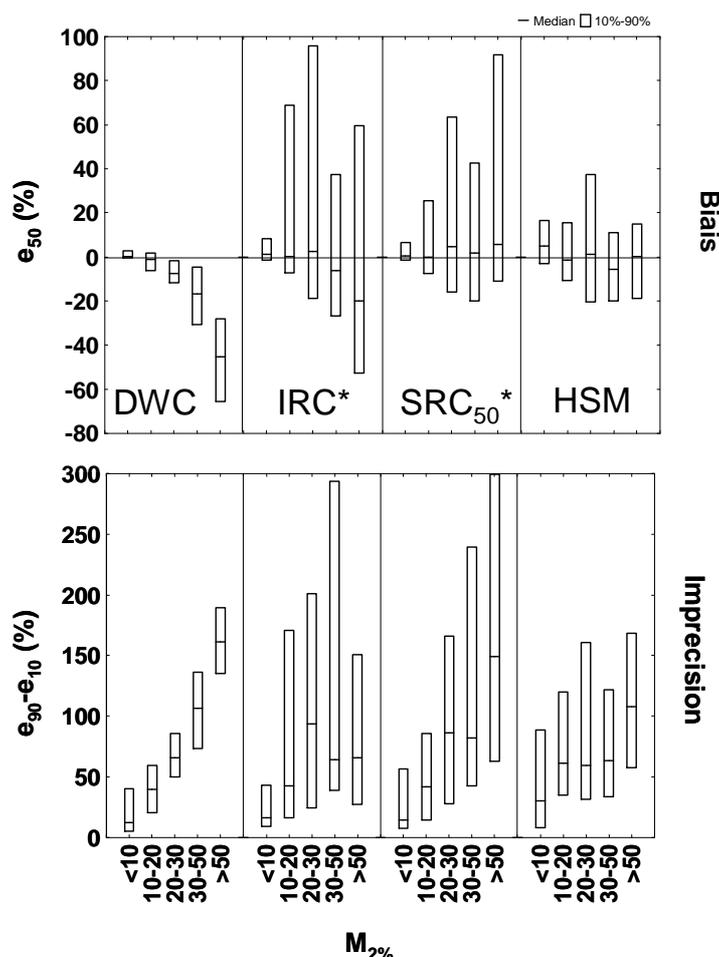


Figure 6-4 : Distribution des incertitudes interannuelles par gamme de $M_{2\%}$ pour quatre méthodes : DWC, IRC*, SRC₅₀* et HSM, à une fréquence mensuelle : a) biais ; b) imprécisions

6.3.3 Variabilité du flux d'eau et des concentrations ($W_{2\%}$ et b_{50sup})

Les biais sont établis à une fréquence mensuelle pour quatre méthodes de calcul (DWC, IRC*, SRC₅₀* et HSM) en fonction des gammes de $W_{2\%}$ et b_{50sup} (Figure 6.5).

Pour la méthode DWC, les biais sont dégradés pour des gammes de $W_{2\%}$ et/ou b_{50sup} qui augmentent. Pour les méthodes IRC* et SRC₅₀*, l'influence de ces deux indicateurs est visible même si elle est moindre que pour DWC. En revanche pour la méthode HSM, il n'y a aucune influence de ces deux indicateurs. La méthode HSM dans son fonctionnement prend déjà en compte la variabilité des concentrations avec la variabilité des débits ce qui la rend insensible à ces indicateurs.

Les méthodes IRC et IRC* sont généralement recommandées pour des produits dilués ou stables avec les débits ($b_{50sup} < 0.2$). Les méthodes SRC₅₀ et SRC₅₀* sont recommandées pour les types de relation C-Q : « c-S » et « s-C ». La méthode SRC₅₀* est appropriée pour $b_{50sup} > 0.8$ et $W_{2\%} < 10\%$. Pour les méthodes HS et HSM, les performances ne sont pas influencées par des valeurs de

variabilités hydrologiques ($W_{2\%}$) et hydrosédimentologiques (b_{50sup}) élevées. Les méthodes DWC et DWC* sont recommandables pour des faibles valeurs de $W_{2\%}$ et b_{50sup}

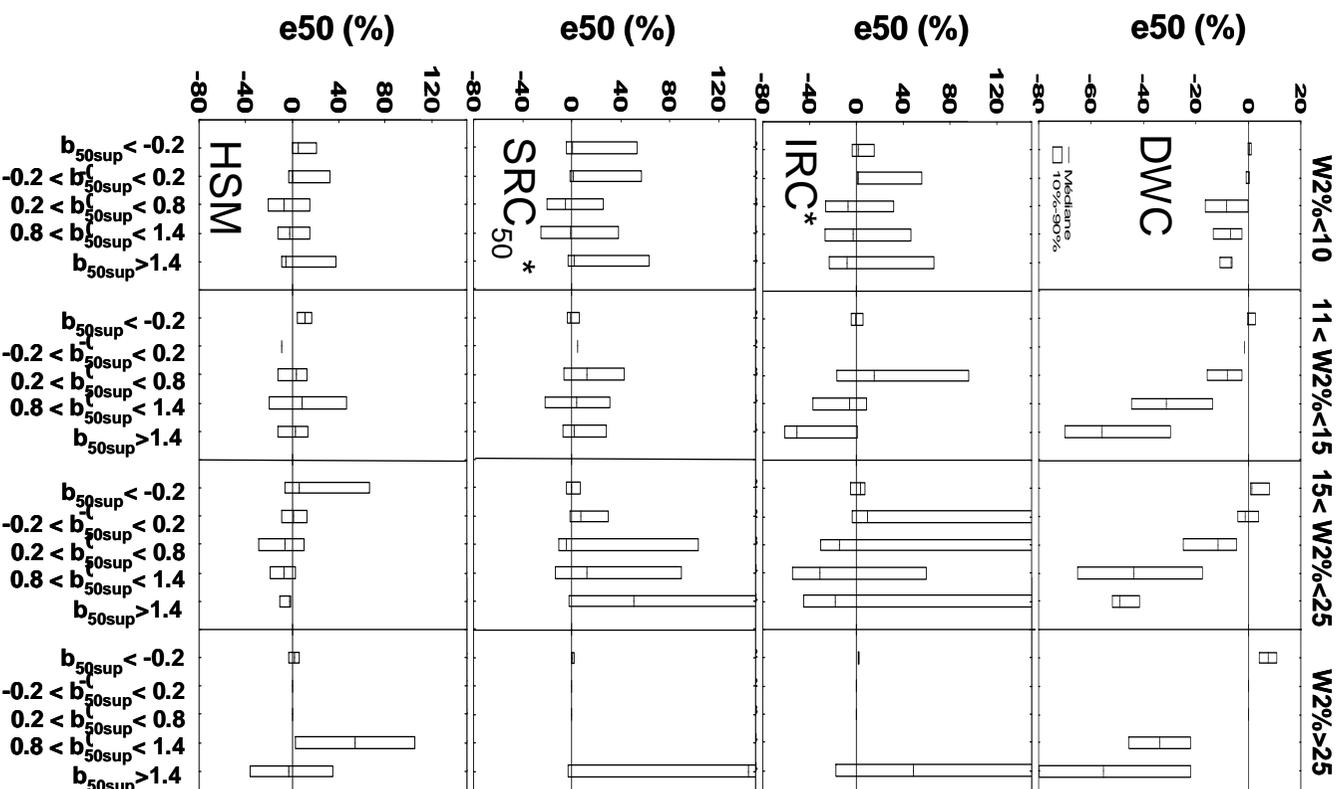


Figure 6-5 : Distribution des incertitudes interannuelles par gamme de $W_{2\%}$ et b_{50sup} pour la méthode DWC, IRC*, SRC₅₀* et HSM à un intervalle d'échantillonnage mensuel: a) biais et b) imprécision

6.3.4 Influence de la fréquence d'échantillonnage

L'intégralité de la base de données a été subdivisée en cinq classes de b_{50sup} indépendamment du $W_{2\%}$. La méthode DWC est illustrée ici (Figure 6.6) pour des intervalles d'échantillonnages de 1 à 30

jours. Le principal résultat est que tous les biais augmentent linéairement avec l'intervalle d'échantillonnage. Mais la distribution des biais, pour une fréquence donnée, est extrêmement variable et dépend essentiellement du b_{50sup} . Pour les éléments dilués ou stables ($b_{50sup} < 0.2$) les biais sont proches de zéro ou nuls quelle que soit la fréquence d'échantillonnage. Ce n'est pas le cas pour les éléments concentrés qui sont divisés en trois groupes, où les biais augmentent linéairement avec l'intervalle d'échantillonnage. Les imprécisions augmentent avec l'intervalle d'échantillonnage pour $b_{50sup} > 0.8$. En dessous de 0.8, les imprécisions ne varient pas beaucoup à l'exception des très hautes fréquences d'échantillonnage (< à 7 jours).

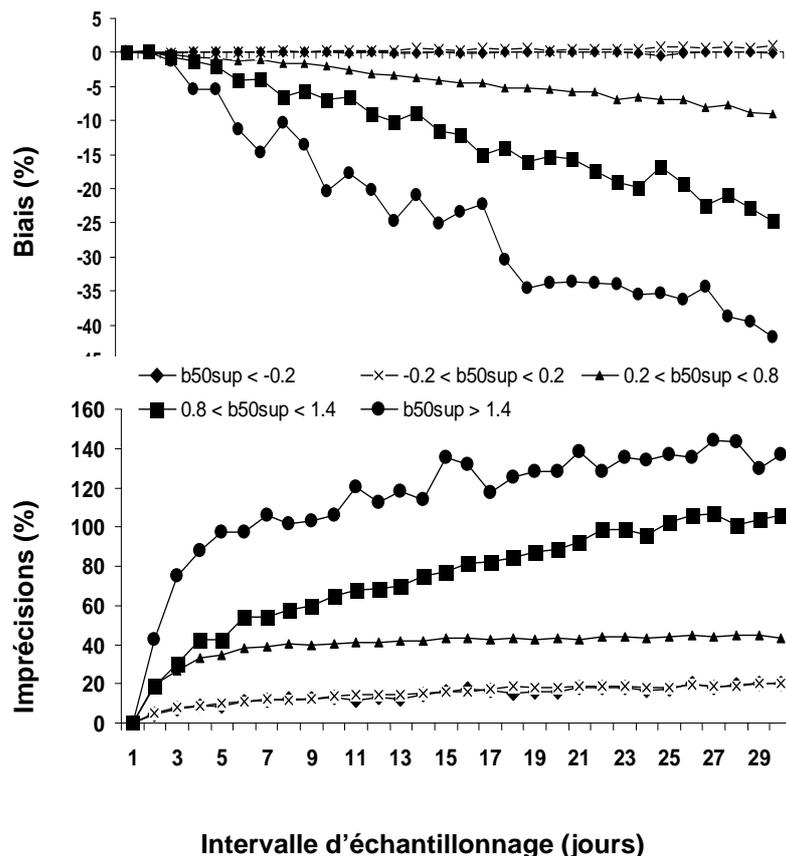


Figure 6-6 : Influence de la fréquence d'échantillonnage sur les biais et imprécisions sur les flux annuels par classe de b_{50sup} pour la méthode DWC : Toutes les stations et les types de matériaux (n=120) a) médiane des biais, b) médiane des imprécisions

Méthode DC : Dans ce cas sont présentées les dispersions interannuelles et la moyenne des dispersions annuelles pour les 25 jeux de données pour trois fréquences d'échantillonnage : mensuelle, bimensuelle, hebdomadaire (Figure 6.7). L'augmentation de la fréquence d'échantillonnage n'améliore pas les biais interannuels pour les stations dont la variabilité hydrologique et des concentrations sont faibles.

A l'inverse pour des conditions de variabilité élevées, la dispersion des erreurs augmente quand l'intervalle d'échantillonnage augmente. La méthode DC peut donc s'utiliser à une fréquence mensuelle pour les stations à faible variabilité hydrologique et à une fréquence bimensuelle pour les stations à forte variabilité hydrologique.

Le passage d'une fréquence bimensuelle à hebdomadaire n'augmente pas significativement les résultats.

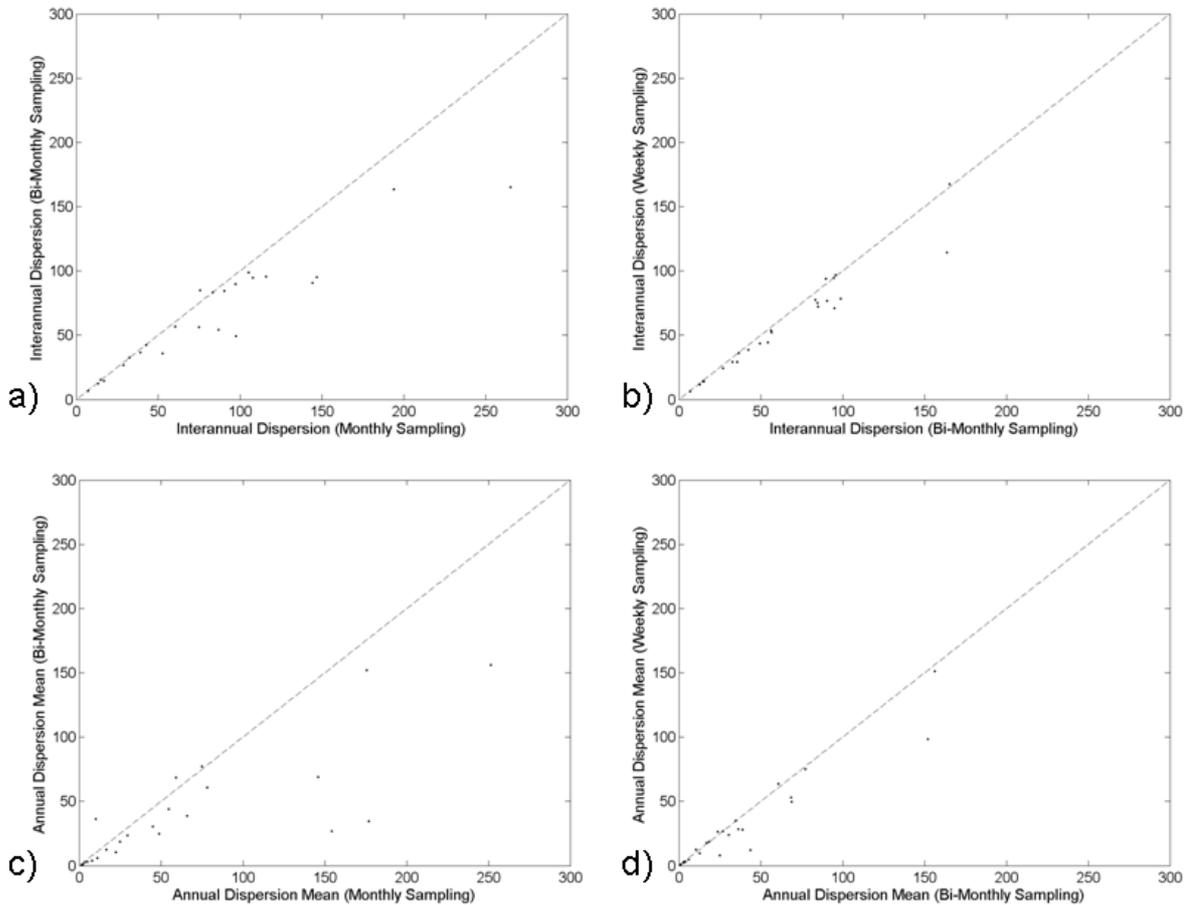


Figure 6-7 : Dispersion interannuelle (tous les jeux de données) pour: a) Mensuelle (axe-x) vs. bimensuelle (axe-y) ; b) bimensuelle (axe-x) vs. Hebdomadaire (axe-y) et moyenne des dispersions annuelles (tous les jeux de données) pour : c) mensuelle (axe-x) vs. bimensuelle (axe-y) ; d) bimensuelle (axe-x) vs. hebdomadaire (axe-y)

La détermination des conditions optimales d'utilisation des méthodes résultent de la combinaison de i) classification des types de matériaux (b_{50sup}) et de la variabilité hydrologique ($W_{2\%}$) à une station donnée ; ii) de la fréquence d'échantillonnage minimum pour atteindre les objectifs de performances ciblés.

Il existe ainsi deux façons de considérer le système expert : i) pour une méthode en fonction de la fréquence d'échantillonnage (Figure 6.8) ; ii) pour une fréquence ciblée avec différentes méthodes de calcul (Figure 6.9)

6.4 Vers un système expert

La comparaison des performances des méthodes de calculs pour plusieurs fréquences de suivis en fonction de descripteur hydrologique, hydrochimique et/ou hydrosédimentologique permet l'élaboration d'un système expert. Ce système a pour but de faciliter l'aide à la décision en choisissant la méthode et/ou la fréquence optimale pour estimer la qualité de l'eau.

6.4.1 Pour la méthode des concentrations moyennes pondérées (DWC)

Ce système se présente sous la forme d'un tableau à double entrée constitué de la variabilité hydrologique ($W_{2\%}$) et de la variabilité hydrochimique/hydrosédimentologique (b_{50sup}). Il peut ainsi permettre de choisir la fréquence optimale pour une méthode donnée. L'exemple choisi ici est celui de la méthode DWC et les critères de sélection sont définis pour une estimation, des flux annuels, biaisée de moins de $\pm 10\%$ et une imprécision inférieure à $\pm 30\%$. Un exemple chiffré pour les biais interannuels à la station Seine à Choisy est illustré sur la figure 6.8. Ces biais interannuels sont déterminés pour une fréquence mensuelle de suivis.

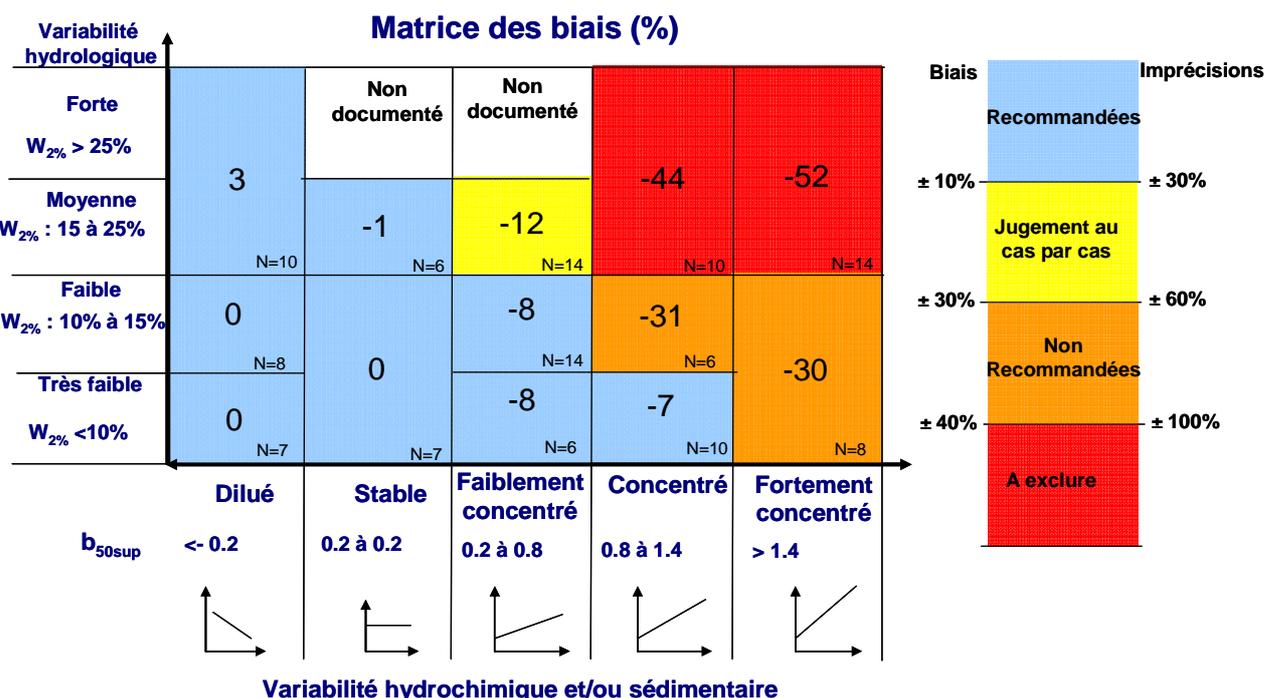


Figure 6-8 : Valeurs de biais interannuels sur la station Seine à Choisy générées par la méthode DWC à une fréquence de suivis mensuelle au sein de la matrice définie par $W_{2\%}$ et b_{50sup}

Les biais augmentent fortement avec la variabilité des flux caractérisée par une combinaison des descripteurs $W_{2\%}$ - b_{50sup} , de 0% pour $W_{2\%} < 10\%$ et $b_{50sup} < -0.2$ et jusqu'à -52% pour $W_{2\%} > 25\%$ et $b_{50sup} > 1.4$. La combinaison des résultats pour les biais et les imprécisions interannuelles entre les

stations permet la construction d'un système expert avec les fréquences optimales d'utilisation de la méthode DWC (Figure 6.9).

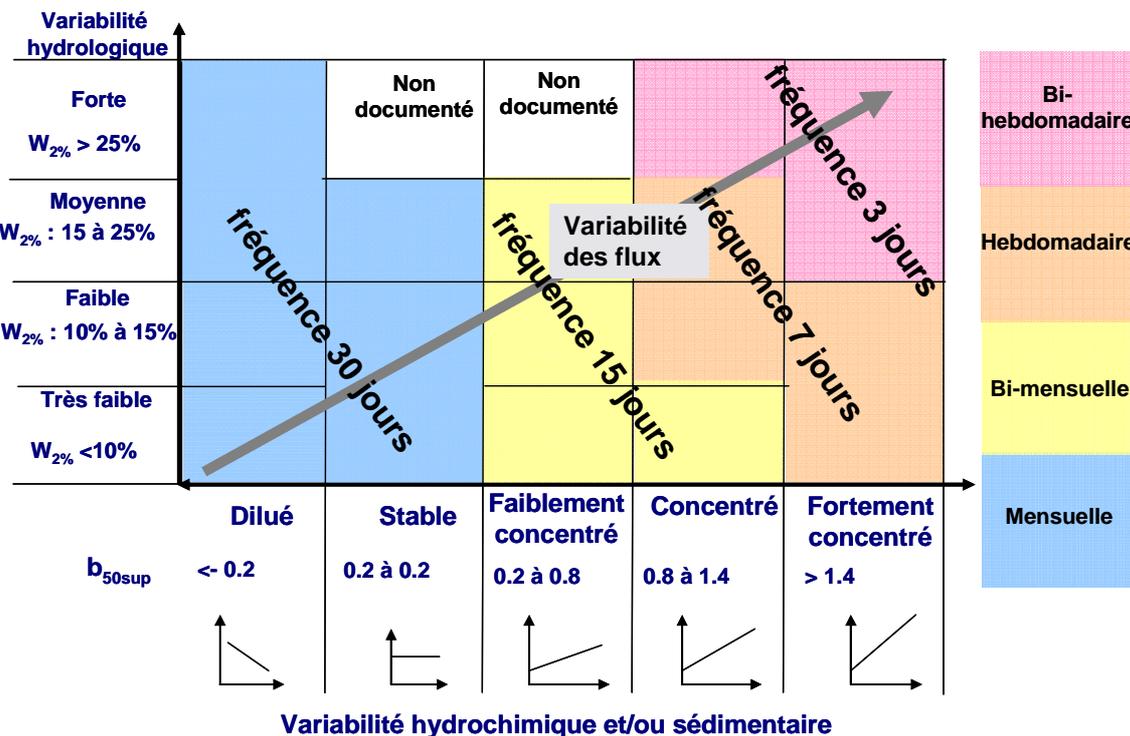


Figure 6-9 : Fréquence optimale d'utilisation de la méthode DWC au sein de la matrice définie par $W_{2\%}$ et b_{50sup}

Une fréquence mensuelle est ainsi recommandée pour les éléments dilués ou stables avec les débits quelle que soit la variabilité hydrologique ($W_{2\%}$).

Une fréquence bimensuelle est recommandée pour les éléments faiblement concentrés quel que soit le $W_{2\%}$ et pour les éléments concentrés si $W_{2\%}$ est inférieure à 10%.

Une fréquence hebdomadaire est recommandée pour les éléments concentrés ($0.8 < b_{50sup} < 1.4$) si $W_{2\%}$ varie de 10% à 25% et pour les éléments fortement concentrés si $W_{2\%}$ est inférieure à 15%.

Dans les cas « extrêmes » où la variabilité hydrologique est supérieure à 25% pour les éléments concentrés ou fortement concentrés, une fréquence de 3 jours est recommandée pour une estimation du flux annuel biaisé de moins de $\pm 10\%$ et une imprécision inférieure à $\pm 30\%$.

Il est à rappeler que dans le cas de la méthode DWC, un abaque a été élaboré (Moatar et al., 2006, 2010). Cet abaque permet de sélectionner la fréquence à utiliser pour des objectifs de performances précis ou de déterminer les erreurs précisément en fonction de la fréquence d'échantillonnage. Le système expert permet ici de choisir une fréquence de suivis en fonction des descripteurs $W_{2\%}$ et b_{50sup} mais il peut également être utilisé d'une autre manière en sélectionnant la méthode la plus appropriée pour une fréquence de suivis donnée.

6.4.2 Pour une fréquence mensuelle des suivis

La 2^{ème} façon d'utiliser le système expert est de considérer une fréquence (ici mensuelle) pour plusieurs méthodes (Figure 6.10). Ainsi pour les matériaux dont les types de relation C-Q sont dilués ($b_{50sup} < -0.2$), comme les sels dissous totaux, l'ammonium et les orthophosphates et pour les types de relation stable ($-0.2 < b_{50sup} < 0.2$) comme certains nutriments dissous, l'ensemble des méthodes de calcul peut être recommandable. Plus le b_{50sup} augmente, plus le nombre de méthodes est limité. Pour des b_{50sup} compris entre 0.2 et 0.8, les méthodes IRC et SRC₅₀ sont à exclure. Ensuite seules les méthodes de régressions corrigées (IRC* et SRC₅₀*), la séparation d'hydrogramme modifiée (HSM) et de distribution statistique des concentrations (DC) sont à recommander. Quand pour une condition donnée, plusieurs méthodes sont recommandables, seules celles étant les plus performantes sont indiquées.

Dans les conditions de forte variabilité, $W_{2\%} > 25\%$ et $b_{50sup} > 1.4$, seules les méthodes HSM et DC sont recommandables.

$W_{2\%} > 25$	DWC, DWC*	Non documenté	Non documenté	HSM DC	HSM DC
$15 < W_{2\%} < 25$		IRC*, SRC50*	HSM, SRC50*		
$10 < W_{2\%} < 15$	DWC, DWC*	DWC, DWC*	IRC*, SRC50*	IRC*, SRC50*	HSM DC
$W_{2\%} < 10$	DWC, DWC*		IRC*, SRC50*	IRC*, SRC50*	
	$b_{50sup} < -0.2$	$0.2 < b_{50sup} < 0.2$	$0.2 < b_{50sup} < 0.8$	$0.8 < b_{50sup} < 1.4$	$b_{50sup} > 1.4$

Figure 6-10 : Conditions optimales d'utilisation de différentes méthodes de calcul à une fréquence mensuelle au sein de la matrice définie par $W_{2\%}$ et b_{50sup}

