

Comparaison des réponses du bilan hydrique de bassins situés en Belgique et en Suisse à un changement de climat

Comparison of the water balance responses of belgian and swiss catchments to a climate change

D. Gellens and B. Schädler

Volume 10, Number 3, 1997

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/705286ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/705286ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (print)

1718-8598 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Gellens, D. & Schädler, B. (1997). Comparaison des réponses du bilan hydrique de bassins situés en Belgique et en Suisse à un changement de climat. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 10(3), 395–414.
<https://doi.org/10.7202/705286ar>

Article abstract

By strengthening the so called *greenhouse effect*, the rise of the atmospheric concentrations of anthropogenic gases, such as CO₂, chlorofluorocarbons (CFCs) and methane, will progressively modify the energy budget of the Earth atmosphere and disturb the climate. Temperature at the soil level will rise. Precipitation and air humidity will be modified, inducing a large perturbation of the water cycle and thus of water availability and hydrological extremes. The last International Panel on Climate Change report (IPCC 1994) states that a rise of 0.3 degrees Celsius per decade could be felt in the mean global temperature in the next century. The conclusions of the Second World Climate Conference (1992) pointed out that among the most likely impacts of climate change will be its effects on the hydrological cycle and water management systems. An increase of the incidence of extreme events, such as floods and drought, would cause increased frequency and severity of disasters.

The present paper is a synthesis of several separate published and some unpublished climate change impact studies (Bultot et al., 1988 a and b, 1992, 1994; Gellens, 1991; Schädler et al., 1992; Gellens and Demarée, 1993; Gellens and Roulin, 1996) carried out in Belgium and in Switzerland. All these studies have been done with the same hydrological model and the same climate change scenario. This procedure allows a strict comparison of the sensitivity studies and enables us to identify the common responses and the specific behaviour of the catchments. In this latter case, an attempt to identify the geomorphological origin of the particular responses is possible.

A set of eight catchments in Belgium and belonging to the Scheldt and Meuse river basins has been studied. These individual catchments cover areas from 100 km² to 1200 km² and are spread over the country in order to represent the main catchment types. Precipitation ranges from 730 to 1160 mm per year. In addition, three tributaries of the Rhine river in Switzerland have been selected in the low alpine altitude (lower than 1500 m a.s.l.). Precipitation rates are higher for these three catchments and range from 1080 to 1300 mm.

The adopted IRMB (Integrated Runoff Model - Bultot et al., 1976 and 1985) is a daily time step conceptual model. It has been designed at the Royal Meteorological Institute of Belgium to simulate the components of the water cycle in medium-sized catchments, i.e. catchments for which the input data, and in particular the precipitation, can be considered as uniform. The main data needed to run the IRMB model are the precipitation and the potential evapotranspiration. This latter variable is assessed by following the procedure described by Bultot et al. (1983) and requires several climatological data, i.e. the net radiation, the air temperature and humidity, the soil temperature at 10, 20 and 50 cm depth and the wind speed at 2 m above the soil. These data are also taken into account in the snow melting-accumulation simulation.

The adopted climate scenario has been constructed from the literature in order to combine the results of various simulations produced by different climate models (Bultot et al., 1988b) in a single set of climate increments. The main characteristics of the climate change scenario is a temperature rise reaching some 3 °C, with a higher increase in winter than in summer. Precipitation stress consists of a 50 mm yearly rise distributed as a winter rise (about 10 mm) and a slight summer decrease. Although these scenario increments are small in comparison with the year-to-year variability, they are however large enough to reveal the sensitivity of the water balance to climate perturbations. The detailed description of the algorithms used to apply the monthly increments on the daily time step are presented in Bultot et al. (1988b). After a calibration phase for the present climate conditions, a sensitivity analysis of the water balance of the catchments has been carried out by modifying the input data according to the scenario. This well known *if-then-what?* method gives the sensitivity of the various terms of the water cycle by comparing their values in the present runs and in the disturbed 2xCO₂ runs. For practical reasons, the reference periods of the simulation runs are not the same for all the catchments.

The study focuses on the evolution of evapotranspiration and soil moisture, of snow cover, of streamflow at the outlet and of groundwater storage. The impacts are also studied in terms of extreme events.

For all the catchments, the analysis shows a rise of the evapotranspiration equivalent to some 7 to 10 percent. A small decrease in soil moisture has also been simulated associated with an increase in dry soil days. Due to the temperature rise a strong depletion of the snow cover might be an economically dominant effect in the low alpine regions where winter sport activities represent a large part of the inhabitants' resources. According to the winter precipitation rise, the monthly streamflows in the cold period are also increased under the 2xCO₂ conditions.

Besides predictable trends common to all the catchments, the study also shows that some components of the water balance governed by the underground characteristics can present uneven responses. Catchments characterized by strong infiltration could be subject to positive evolution of the groundwater storage and of the baseflow, whereas catchments with predominant surface runoff could exhibit the reverse effect. These effects could be important mainly in summer during the low flow period. The altitude of the catchments also seems to be significant. All the lowland catchments present higher extreme streamflows, whereas catchments in low Alpine regions are spared this negative consequence.

While a large degree of uncertainty remains in the assessment of the climate in the next century, this study gives a first insight into the direction of the expected climate change impacts. It also points out the need to analyse the sensitivity of catchments with a particular attention to their characteristics.

Comparaison des réponses du bilan hydrique de bassins situés en Belgique et en Suisse à un changement de climat

Comparison of the water balance responses of Belgian and Swiss catchments to a climate change

D. GELLENS¹ et B. SCHÄDLER²

Reçu le 31 janvier 1996, accepté le 27 mai 1997*.

SUMMARY

By strengthening the so called "greenhouse effect", the rise of the atmospheric concentration of anthropogenic gases, such as the CO_2 , the CFC and the methane, will progressively modify the energy budget of the Earth atmosphere and disturb the climate. Temperature at the soil level will rise. Precipitation and air humidity will be modified inducing a large perturbation of the water cycle and thus of the water availability and the hydrological extremes. The last IPCC report (1994) states that a rise of 0.3 degree Celsius per decade could be felt in the mean global temperature in the next century. The conclusions of the Second World Climate Conference (1992) pointed out that among the most likely impacts of the climate change will be its effects on the hydrological cycle and water management systems. An increase of the incidence of extremes, such as floods and drought, would cause increased frequency and severity of the disasters.

The present paper is a synthesis exercise of several separate published and some unpublished climate change impact studies (BULTOT *et al.*, 1988 a and b, 1992, 1994; GELLENS, 1991; SCHÄDLER *et al.*, 1992; GELLENS and DEMARÉE, 1993; GELLENS and ROULIN, 1996) carried out in Belgium and in Switzerland. All these studies have been done by using the same hydrological model and the same climate change scenario. This procedure allows a strict comparison of the sensitivity studies and permits to point out the common responses and the specific behaviour of the catchments. In this last case, an attempt to identify the geomorphological origine of the particular responses is possible.

A set of eight catchments in Belgium and belonging to the Scheldt river and to the Meuse river has been studied. These basins are covering areas from 100 km² to 1,200 km² and are spread over the country in order to represent the

1. Institut Royal Météorologique de Belgique, Section de Calcul Numérique « J. Van Isacker », B-1180 Bruxelles, Belgique.

2. Service Hydrologique et Géologique National Suisse, Berne, Suisse.

* Les commentaires seront reçus jusqu'au 20 mars 1998.

main types of catchments. Precipitation is ranging from 730 mm to 1,160 mm per year. Three tributaries of the Rhine river in Switzerland have been selected in the low alpine altitude (lower than 1,500 m a.s.l.). Precipitation rates are higher and ranges from 1,080 mm to 1,300 mm.

The adopted IRMB (Integrated Runoff Model-Bultot) hydrological model (BULTOT *et al.*, 1976 and 1985) is a daily time step conceptual model. It has been design at the Royal Meteorological Institute of Belgium to simulate the components of the water cycle in medium-sized catchments, *i.e.* catchments for which the input data, and in particular the precipitation, can be considered as uniform. The main data needed to run the IRMB model are the precipitation and the potential evapotranspiration. This last variable is assessed by following the procedure described by BULTOT *et al.* (1983) and requires several climatological data, *i.e.* the net radiation, the air temperature and humidity, the soil temperature at 10, 20 and 50 cm depth and the wind speed at 2 m above the soil. These data are also taken into account in the snow melting-accumulation simulation.

The adopted climate scenario has been built from literature in order to combine the results of various simulations issued by different climate models (BULTOT *et al.*, 1988b) in a single set of climate increments. A temperature rise reaching some 3°C mainly characterizes the scenario with a higher increase in winter than in summer. Precipitation stress consists in a 50 mm yearly rise spread in a winter rise (about 10 mm) and a slight summer decrease. Although these scenario increments are small in comparison with the year-to-year variability, they are however large enough to reveal the sensitivity of the water balance to climate perturbations. The detailed description of the algorithms used to apply the monthly increments on the daily time step are presented in BULTOT *et al.* (1988b). After a calibration phase in the present climate conditions, the sensitivity of the water balance of the catchments has been carried out by modifying the input data according to the scenario. This well known "if – then – what?" method gives the sensitivity of the various terms of the water cycle by comparing their values in the present runs and in the disturbed 2 x CO₂ runs. For practical reasons, the reference periods of the simulation runs are not the same for all the catchments.

The study focusses on the evolution of the evapotranspiration and soil moisture, of the snow cover, of the streamflow at the outlet and of the ground water storage. The impacts are also tackled in terms of extreme events.

For all the catchments, the analysis shows a rise of the evapotranspiration equivalent to some 7 to 10 percent. A small decrease of the soil moisture has also been simulated going on with an increase of dry soil days. Due to the temperature rise a strong depletion of the snow cover might be an economically dominant effect in the low alpine regions where the winter sport activities represent a large part of the inhabitant's resources. According to the winter precipitation rise, the monthly streamflows of the cold period are also increased in the 2 x CO₂ conditions.

Besides predictable evolutions common to all the catchments, the study also shows that some components of the water balance governed by the underground characteristics can present uneven responses. Catchments characterized by a strong infiltration could be subject to positive evolution of the ground water storage and of the baseflow, while catchments with predominant surface runoff could meet the reverse. These effects could be important mainly in summer during the low flows period. The height of the catchments seems also to be significant. All the lowland catchments could present higher extreme streamflows, while catchments in low Alpine regions would almost not undergo this negative consequence.

While a large degree of uncertainties is remaining in the assessment of the climate in the next century, this study gives a first insight about the direction of the expected climate change impacts. It also points out the need to analyse the sensitivity of the catchments with a particular attention to their characteristics.

Key words : *hydrology, climate change, impacts, Belgium, Switzerland, river Scheldt, river Meuse, river Rhine.*

RÉSUMÉ

Les impacts possibles d'un changement de climat induit par l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre sur le bilan hydrique ont été simulés sur un ensemble de bassins hydrographiques situés en Belgique et en Suisse. Le modèle hydrologique conceptuel IRMB à pas de temps journalier a été utilisé à cette fin et les paramètres du modèle ont été optimisés sur chaque bassin. Les bassins ont une taille comprise entre 100 km² et 1 200 km² et couvrent des régions de plaine aussi bien que de moyenne montagne.

Un même scénario climatique a été adopté pour tous les bassins. Il est principalement caractérisé par une augmentation de la température de près de 3 °C et par une légère augmentation des précipitations annuelles. Cette méthodologie a été adoptée afin de montrer les sensibilités respectives des différents termes du bilan hydrique et de les mettre en rapport avec les caractéristiques des bassins étudiés. L'étude s'est focalisée sur l'évolution de l'évapotranspiration et de l'humidité du sol, de l'enneigement, des débits à l'exutoire et des réserves en eau souterraine. Les impacts sont également abordés en termes d'événements extrêmes.

Outre des évolutions qui sont prévisibles pour l'ensemble des bassins étudiés, telles une augmentation de l'évapotranspiration, une diminution légère de l'humidité du sol et une réduction de l'enneigement, les réponses de certains termes du bilan hydrique régis par les caractéristiques du sous-sol des bassins peuvent être sensiblement différentes d'une région à une autre. Ainsi, les bassins caractérisés par une infiltration importante subiraient une évolution favorable de leurs réserves en eau souterraine et des débits de base, alors que les bassins où le ruissellement de surface prédomine verraient une diminution se produire. L'altitude des bassins semble aussi jouer un rôle non négligeable. Tous les bassins de plaine présenteraient une augmentation des débits de crues extrêmes, alors que les bassins de moyenne montagne ne subiraient pour ainsi dire pas ces conséquences négatives.

Mots-clés : *changement de climat, Suisse, Belgique, Meuse, Rhin, Escaut.*

1 – INTRODUCTION

Depuis plusieurs décennies, les climatologues concentrent leurs efforts sur la modélisation et la simulation du climat. En particulier, l'évolution de ce dernier sous l'influence de l'augmentation des gaz à effet de serre fait l'objet de nombreuses recherches. Ces gaz sont en effet très variés et liés pour la plupart aux activités de l'homme. Parmi eux, il faut citer, outre le CO₂, le méthane, les chlorofluorocarbones et les oxydes d'azote. Il faut noter que la vapeur d'eau est un des gaz à effet de serre les plus importants aussi bien en ce qui concerne la quantité présente dans l'air que son action. Depuis près d'une dizaine d'années (IPCC, 1990,

1992, 1994), il est largement admis que l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre pourrait modifier le climat de la Terre dans un avenir relativement proche. Ces gaz absorbent en effet le rayonnement infrarouge émis par la surface de la Terre ; leur augmentation près du sol correspond donc à un « piégeage » plus important d'énergie et mène à une augmentation de la température. Les précipitations et l'humidité de l'air pourraient en conséquence aussi être perturbées. Cette perspective est reprise le plus souvent sous la dénomination de référence de « doublement de la concentration du CO_2 » ou « doublement du CO_2 ».

Dans l'hypothèse d'un doublement du CO_2 atmosphérique, les valeurs de la température de l'air et des précipitations en Europe pourraient différer sensiblement des valeurs observées actuellement (BERGER, 1981 ; BACH, 1989 ; IPCC, 1990). Les simulations effectuées au moyen de modèles généraux de circulation atmosphérique conduisent à : (i) des températures plus élevées en toutes saisons, avec un réchauffement plus important en hiver qu'en été ; (ii) une hausse de température plus accentuée aux hautes latitudes, et (iii) un accroissement généralisé du total annuel des précipitations en Europe.

Les modèles climatiques sont cependant des modèles à très grande échelle qui doivent permettre de simuler le climat sur tout le globe. La résolution spatiale des informations fournies par ces modèles reste donc limitée et ce malgré l'augmentation constante de la puissance des ordinateurs. Ainsi, il faut compter que la Belgique et les Pays-Bas ne représentent généralement qu'un point de grille de la maille numérique de ces modèles. Ceci signifie qu'il n'est pas question d'espérer trouver dans les simulations de ces modèles des indications permettant de différencier par exemple la partie nord de la Belgique des Ardennes au sud, alors que sur une distance de près de 200 km, les précipitations varient presque d'un facteur 2 (voir tableau 2). De plus, outre la résolution spatiale de ces modèles, des incertitudes importantes planent encore sur la répartition géographique et temporelle des modifications prévues, ce qui rend encore plus délicate la prédiction des impacts du changement de climat au niveau local.

En hydrologie, quand des études du bilan hydrique, de la gestion des ressources en eau, de l'évolution des crues ou de la recharge des aquifères sont abordées, c'est précisément l'échelle locale qui occupe une place prépondérante. Ces domaines qui touchent plus ou moins directement tout individu et les pouvoirs publics, nécessitent en effet la connaissance des caractéristiques climatiques, mais aussi géomorphologiques et physiographiques, d'entités géographiques d'extension plus limitées. Celles-ci sont chaque fois particulières et ne peuvent de ce fait pas être amalgamées en un « tout » moyen. Ces unités régionales peuvent être de tailles diverses comme les réservoirs d'orages, les retenues et barrages, les sites urbains ou les bassins versants, et sont pour la plupart clairement trop exiguës pour être prises en compte explicitement dans les modèles climatiques.

Conscients de l'influence potentielle d'un changement de climat sur la sévérité des désastres naturels, et en particulier, les crues et les sécheresses, de nombreuses recherches sont en cours (SWCC, 1991 ; KACZMAREK *et al*, 1996). Les modèles hydrologiques constituent les outils appropriés qui peuvent prendre le relais des modèles climatiques. Ces modèles ont été développés depuis de nombreuses années afin de résoudre les différents types de problèmes mentionnés et de répondre aux principales préoccupations des responsables de leur ges-

tion. Ils peuvent être utilisés pour étudier les impacts d'un changement de climat sur le bilan hydrique de bassins hydrographiques.

L'objet de ce texte est de faire la synthèse de diverses études menées depuis plusieurs années sur différents bassins hydrographiques situés en Belgique et en Suisse. Ces études ont tout d'abord porté sur trois bassins typiques de Belgique et ont permis de mettre en exergue les réponses communes et spécifiques de bassins présentant des caractéristiques différentes (BULTOT *et al.*, 1988 a et b) ainsi que leur incidence sur la variabilité des débits (GELLENS, 1991). Une démarche visant à multiplier les bassins étudiés a été ensuite poursuivie afin de mieux cerner les facteurs prépondérants. Ainsi, cinq bassins (GELLENS et DEMARÉE, 1993) puis huit ont été abordés en Belgique (GELLENS et ROULIN, 1996). Pendant ce temps, le même type d'étude a été entrepris en Suisse. L'étude de la Murg comme premier bassin (BULTOT *et al.*, 1992) a été suivie de deux autres bassins de moyenne montagne (SCHÄDLER *et al.*, 1992). Outre la perturbation du bilan hydrique, ces études ont montré l'importance d'un changement de climat même limité sur les caractéristiques de l'enneigement en moyenne montagne, zone essentielle pour les sports d'hiver (BULTOT *et al.*, 1994).

La confrontation de ces études de sensibilité réalisées sur des régions de plaines pour la Belgique et de moyenne montagne pour la Suisse, permettra de tirer les traits saillants des tendances mises en évidence de manière séparée jusqu'à ce jour. Après une description du modèle hydrologique et du scénario de changement de climat adoptés, les caractéristiques des bassins hydrographiques seront décrites succinctement. Les impacts de la perturbation climatique sur l'humidité du sol, l'évapotranspiration et l'enneigement seront ensuite abordés. Les études de la sensibilité des écoulements à l'exutoire et de l'évolution des réserves en eau souterraine seront développées *in fine*.

2 – MODÈLE HYDROLOGIQUE IRMB

Le modèle hydrologique adopté pour réaliser l'ensemble des études de bassins abordées est un modèle conceptuel à pas de temps journalier. Il a été développé à la Section Hydrologie de l'Institut Royal Météorologique de Belgique pour simuler les différentes composantes du cycle de l'eau de bassins hydrographiques de taille comprise entre 100 km² et 1 500 km². Le modèle IRMB, pour Integrated Runoff Model – F. Bultot, a été décrit en détail par BULTOT et DUPRIEZ (1976 et 1985). Il est constitué, comme l'illustre la figure 1, d'une cascade de sous-réservoirs reconstituant de manière idéalisée les processus physiques qui se produisent dans la nature, comme l'interception des précipitations par la végétation, l'accumulation de la neige lorsque les températures sont suffisamment basses ainsi que la fusion de cette dernière, l'égouttement de la pluie à la surface du sol, l'eau qui s'infiltre puis qui percole en profondeur pour rejoindre les aquifères mais aussi l'eau qui rejoint l'exutoire *via* le chevelu hydrographique.

Les principales données journalières nécessaires au fonctionnement du modèle sont les précipitations spatiales et l'évapotranspiration potentielle, ETP. Cette dernière est estimée par la méthode du bilan d'énergie (BULTOT *et al.*,

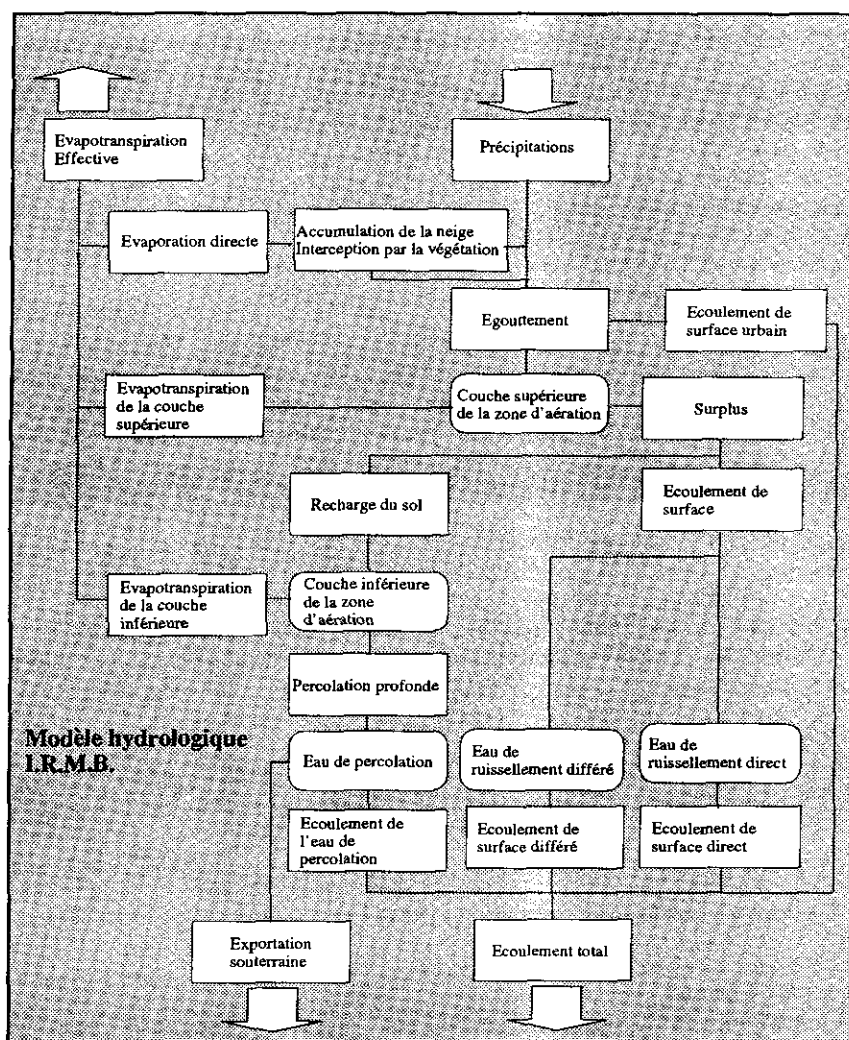


Figure 1 Schéma descriptif du fonctionnement du modèle hydrologique IRMB.

Flow chart of the IRMB hydrological model.

1983) pour chacune des couvertures végétales prises en considération dans la description de l'occupation des sols des bassins. L'estimation de l'ETP requiert la connaissance de la température de l'air, de la tension de vapeur d'eau, du bilan radiatif, de la vitesse du vent à 2 mètres et de la température du sol à 10, 20 et 50 cm. La plupart de ces variables sont également utilisées pour évaluer la fusion de la neige. En supposant que ces variables météorologiques sont dominées par des phénomènes d'advection, il est expédient de leur attribuer les mêmes valeurs quelque soit le type de végétation.

La surface des bassins est subdivisée en un maximum de huit types d'occupation des sols, à savoir sept couvertures végétales (forêts de feuillus, forêts de conifères, prairies, céréales d'hiver, céréales de printemps, maïs et betterave) et une couverture imperméable. Chacune d'entre elles est caractérisée par sa superficie, son type d'interception des précipitations par la canopée, son maximum en eau dans le sol disponible pour l'évapotranspiration et son albédo. Ces dernières variables sont susceptibles d'évoluer au cours de l'année afin de suivre la croissance de la végétation. Les différents contenus en eau décrivant chacune des couvertures des bassins sont traités séparément et aucune interaction entre les occupations de sol n'est prise en considération. Dans la suite, ce sont les moyennes de ces variables intégrées sur tous les bassins qui seront analysées pour effectuer les études de cas.

Le modèle IRMB comprend certains paramètres qui doivent être optimisés. Ainsi l'équivalent en eau de la partie supérieure de la zone d'aération, qui doit être portée à saturation avant que du ruissellement de surface n'apparaisse, et les hydrogrammes unitaires sont déduits des hydrogrammes observés. Une méthode visant à réduire l'erreur quadratique d'estimation est adoptée pour estimer des paramètres comme la récession des eaux souterraines ou l'exportation souterraine vers des bassins contigus.

3 – SCÉNARIO DE CHANGEMENT DE CLIMAT

Malgré les incertitudes qui persistent encore à l'heure actuelle en ce qui concerne l'ampleur et les délais exacts du changement de climat, il est dès à présent nécessaire d'évaluer comment le cycle hydrologique pourrait évoluer afin de pouvoir éventuellement mettre en garde les autorités concernées. Pour ce faire, les hydrologues, ainsi d'ailleurs que beaucoup de scientifiques appartenant à des disciplines utilisant les résultats des équipes de climatologues, font appel à des scénarios climatiques. Ces scénarios sont constitués d'informations sur les modifications prévisibles des différentes variables climatiques, comme les températures, les précipitations, l'humidité de l'air, le rayonnement et doivent former dans la mesure du possible un ensemble cohérent.

Les impacts du changement de climat sont alors étudiés en effectuant une étude de sensibilité du modèle, c'est-à-dire en adoptant la méthode du « si,..., alors,... » suivie dans la plupart des études d'impacts (KUUSISTO *et al.*, 1994). Le modèle dont les paramètres ont été calés sous les conditions climatiques actuelles, est utilisé sous le climat perturbé et les différentes variables produites comparées aux simulations obtenues sous les conditions actuelles.

Le scénario adopté dans les présentes études est résumé au tableau 1. Il a été construit sur la base de différentes sources détaillées dans BULTOT *et al.* (1988 a). Il peut être considéré comme étant un scénario relativement modéré car l'augmentation moyenne de température adoptée est proche de 3 °C, alors qu'une marge comprise entre 1,5 °C et 4,5 °C est généralement acceptée dans tous les rapports officiels publiés par l'Organisation Météorologique Mondiale et l'IPCC. Les précipitations, quant à elles, n'augmentent que d'un peu plus de

50 mm par an, avec une légère diminution estivale. Cette modification du régime pluviométrique est de ce fait beaucoup plus faible que la variabilité interannuelle qui est observée dans les régions étudiées. Le scénario adopté ne correspond donc pas à proprement parler à un bouleversement complet du climat mais plutôt à un radoucissement légèrement plus humide qui ne modifierait pas profondément le climat maritime humide actuel. Pour la Belgique, ces conditions ressembleraient somme toute au climat que connaît la région de la Loire en France. Vis-à-vis de scénarios plus récents comme ceux développés dans le cadre de l'IPCC (CUBASH *et al.*, 1994) ou par le « Climate Research Unit » (UK) (HULME *et al.*, 1994), ce scénario garde toute sa pertinence.

Tableau 1 Changements spécifiques des températures de l'air et des précipitations dans l'hypothèse d'un changement de climat induit par le doublement de la concentration du CO_2 atmosphérique (d'après BULTOT *et al.*, 1988b).

Table 1 Air temperature and precipitation scenario describing the climate change induced by the doubling of the atmospheric CO_2 concentration (according to BULTOT *et al.*, 1988b).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
incrément de température (K)													
scénario 2 x CO_2	3,1	3,4	3,4	3,1	2,8	2,7	2,5	2,3	2,3	2,7	2,8	3,2	2,86
incrément de précipitation (mm par mois)													
scénario 2 x CO_2	9,3	10,5	9,9	10,2	-1,2	-2,7	-1,6	-2,2	0,0	5,3	8,1	8,7	54,3

Les détails de la procédure permettant de distribuer les incréments mensuels au niveau des données journalières sont donnés dans BULTOT *et al.* (1988b). En particulier les températures sont augmentées de manière simple tandis que les précipitations sont multipliées par un facteur mensuel permettant d'obtenir l'incrément correspondant au scénario sur la période de référence adoptée. L'évolution de l'ETP est quant à elle liée aux modifications des différentes variables météorologiques intervenant dans l'équation de Penmann. Elle requiert certaines hypothèses supplémentaires, comme celle de l'invariance de l'humidité relative dans les conditions 2 x CO_2 par rapport à celle observée à l'heure actuelle. L'importance de cette hypothèse a été abordée dans BULTOT et GELLENS (1989). Il est cependant clair que la variabilité du climat n'est pas modifiée par la procédure de construction de scénarios qui est suivie ici.

4 – BASSINS HYDROGRAPHIQUES ET PÉRIODES DE RÉFÉRENCE

Le matériel de base de ce texte est constitué par les études de sensibilité de huit bassins hydrographiques situés en Belgique et présentés partiellement dans

BULTOT *et al* (1988), GELLENS (1991), GELLENS et DEMARÉE (1993) et GELLENS et ROULIN (1996). Ces bassins ont été choisis en raison de leurs spécificités et de façon à représenter les principales zones géologiques de ce pays. Il s'agit des bassins de la Zwalm à Nederzwalm, de l'Aa à Poederlee, de la Dyle à St Joris-Weert, de l'Herk à Wellen, de la Meuse à Dalhem, de la Berwinne à Dalhem, de l'Ourthe orientale à Houffalize et de la Semois à Membre. Une coopération internationale a également été l'occasion de compléter cette analyse en réalisant trois études de bassins situés en Suisse (BULTOT *et al.*, 1992, 1994 et SCHÄDLER *et al.*, 1992). Ceci a permis d'élargir le champ d'investigation aux bassins d'altitudes plus élevées et présentant des caractéristiques géologiques différentes. Ces bassins situés dans le bassin du Rhin sont la Murg à Frauenfeld, l'Ergolz à Liestal et la Broye à Payerne. Les principales caractéristiques des bassins sont reprises au tableau 2. La localisation des bassins est illustrée à la figure 2. Le tableau 2 reprend également pour chacun d'eux, les températures et précipitations moyennes.

Pour les bassins situés en Belgique, la période de référence sur laquelle les simulations ont été effectuées, s'étend de 1901 à 1990. Pour des raisons pratiques, une période plus courte a dû être adoptée lors de l'analyse de la réponse des bassins situés en Suisse (à savoir, 1981-1988 pour la Murg, 1983-1990 pour l'Ergolz et 1980-1990 pour la Broye). Des périodes de référence aussi différentes qui ne recouvrent pas la même variabilité climatique, nécessitent quelques précautions quant à l'interprétation des études de sensibilité. N'ayant pas de solution aisément applicable afin d'homogénéiser les périodes de référence, la démarche suivie consistera à formuler les résultats de manière essentiellement qualitative.

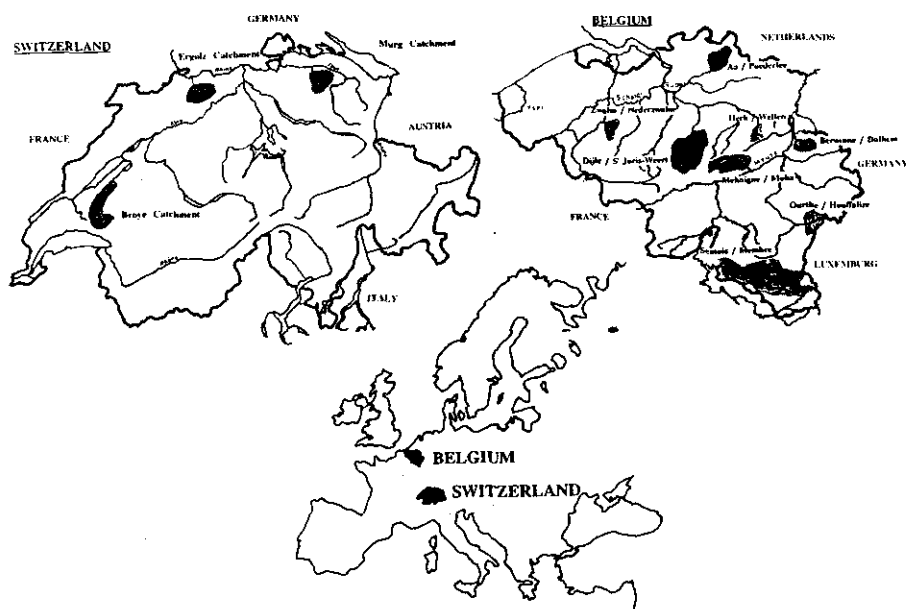


Figure 2 Carte de situation des bassins hydrographiques étudiés.
Location map of the studied catchments.

Tableau 2 Caractéristiques physiques, températures et précipitations moyennes des bassins hydrographiques étudiés.

Table 2 *Physical characteristics, mean temperature and precipitation of the studied catchments.*

Bassin	Superficie	Altitude moyenne	Altitude min-max	Température (°C)	Précipitations (mm/an)	Géomorphologie
Zwalm/Nederzwalm (*)	115 km ²	75 m	9-157 m	9,6	745,8	plat, sol sablo-argileux
Aa/Poederlee (*)	204 km ²	22 m	9-35 m	9,4	813	plat, sable de Campine
Herk/Wellen (*)	108 km ²	100 m	39-131 m	9	732,6	plat, sol sablo-limoneux
Mehaigne/Moha (**)	345 km ²	100 m	81-152 m	8,9	797,8	plat, sol limoneux en plateau, sous-sol calcaire
Dyle/St Joris-Weert (*)	645 km ²	103 m	27-170 m	9,3	815,2	aquifère important, sol sablo-limoneux
Berwinne/Dalhem (**)	118 km ²	216 m	84-355 m	8,3	907,4	valloné, roches calcaires
Ourthe orientale/Houffalize (**)	327 km ²	465 m	180-539 m	7,4	1 025,7	valloné, sols rocheux schisteux et calcaires
Semois/Membre (**)	1 235 km ²	388 m	176-500 m	7,6	1 162,3	socle rocheux et aquifères perchés
Murg/Frauenfeld (***)	212 km ²	580 m	390-1 035 m	8,1	1 219,8	molasses et moraines
Ergolz/Liestal (***)	261 km ²	590 m	305 -1 169 m	8,6	1 084,4	karst
Broye/Payerne (***)	392 km ²	710 m	441-1 514 m	7,2	1 298,1	molasses et alluvions quaternaires importants

(*) tributaires de l'Escaut et (**) de la Meuse en Belgique, (***) tributaires du Rhin en Suisse.

5 – ÉTUDES DE SENSIBILITÉ DU CYCLE HYDROLOGIQUE

Le modèle IRMB permet d'aborder l'étude des phénomènes physiques importants à l'échelle des bassins hydrographiques. Le but de cette étude de sensibilité

est d'examiner si dans les conditions d'un changement de climat induit par l'accroissement de CO_2 , l'assèchement du sol, les débits extrêmes, que ce soient les crues dangereuses pour les populations ou les périodes d'étiage exceptionnelles, ne vont pas se produire plus fréquemment. Risque-t-on par exemple en Belgique de connaître plus souvent des années de sécheresse similaires à 1976 avec des restrictions imposées au niveau de la distribution des eaux et des dégâts en agriculture, ou encore, faut-il craindre plus souvent que naguère, des crues catastrophiques similaires à celles que la Meuse et le Rhin ont connues en décembre 1993 et janvier 1995 ? Au contraire, est-il possible que des retombées positives puissent se manifester ? Quatre thèmes principaux vont être abordés en étudiant les variables de sortie du modèle hydrologique IRMB. Il s'agit de l'humidité du sol et de l'évapotranspiration, de l'enneigement, des débits à l'exutoire et des réserves en eau souterraine.

5.1 Humidité du sol et évapotranspiration

Étant donné qu'un même forçage climatique a été imposé aux variables climatiques des onze bassins, que ce soit en Belgique ou en Suisse, l'évapotranspiration évolue de la même façon dans tous les cas. Le tableau 3 illustre une augmentation de l'évapotranspiration annuelle de près de 8 pour cent. La légère diminution des précipitations, durant l'été, conduit à un déficit hydrique légèrement plus important que dans les conditions climatiques actuelles. L'humidité moyenne du sol, définie comme le rapport entre le contenu en eau de la zone d'aération du sol et de son contenu maximum, diminue donc un peu, à savoir, seulement de 2-3 pour cent. Il est en conséquence naturel de s'attendre à des épisodes de sécheresse du sol un tout petit peu plus marqués à la fin de certaines saisons estivales et en automne. L'évolution du nombre de jours durant lesquels l'humidité du sol descend sous la limite de 60 pour cent illustre bien cette tendance (*tabl. 3*).

L'augmentation des températures pourrait en outre favoriser une saison de végétation plus précoce et plus longue. En se fiant à ces indices, il pourrait donc se produire un léger accroissement de la biomasse et donc de la production agricole. Certaines années cependant, des épisodes plus aigus durant lesquels le sol serait sec à très sec pourraient se manifester et occasionner certains dégâts ; les rendements agricoles des cultures dérobées et des pâturages pourraient alors en souffrir, à moins que des variétés plus résistantes à ces conditions ne soient sélectionnées. Dans la présente étude, les propriétés de la végétation sous les conditions $2 \times \text{CO}_2$ ont été conservées identiques à celles des conditions actuelles.

5.2 Enneigement

L'évolution de la couverture neigeuse n'est pas à proprement parler un sujet de préoccupation pour la Belgique. Il est clair cependant qu'un réchauffement de près de trois degrés compromettrait quasi définitivement tout sport d'hiver dans la région d'altitude plus élevée des Ardennes. À l'opposé, un tel réchauffement pourrait avoir de graves répercussions en Suisse où les activités liées au tourisme et aux sports d'hiver représentent un secteur clé de l'économie nationale. Le nombre moyen de jours par an durant lesquels le sol est au moins en partie couvert par de la neige est repris dans le tableau 3. Dans l'hypothèse d'un réchauffement de climat, la réduction la plus drastique s'opère dans les zones basses. Dans ces dernières, le nombre de jours de neige est réduit à seulement 5 jours en moyenne par an. Dans

le Sud de la Belgique, seuls une dizaine de jours pourraient encore être escomptés alors qu'en moyenne plus de 30 jours par an sont actuellement observés dans les Ardennes (Berwinne, Ourthe orientale et Semois).

Tableau 3 Évapotranspiration, humidité du sol et nombre de jours d'enneigement des bassins hydrographiques étudiés.

Table 3 *Evapotranspiration, soil moisture and numbers of days with snow of the studied catchments.*

	Zwalm	Aa	Dyle	Herk	Mehaigne	Berwinne	Ourthe or.	Semois	Murg	Ergolz	Broye
Évapotranspiration (mm d'eau par an)											
actuellement	499	478,5	478,9	485,7	500,6	525,4	525,4	502	601,8	641,3	592,2
scénario 2 x CO ₂	531,7	526,8	509,3	518,1	533,9	559,8	559,7	536	656,5	696,9	650,5
différence	32,7 (7 %)	48,3 (10 %)	30,4 (6 %)	32,4 (7 %)	33,3 (7 %)	34,4 (7 %)	44,3 (9 %)	34,0 (7 %)	54,7 (9 %)	55,6 (9 %)	58,3 (10 %)
Humidité du sol (en pour cent de la valeur à saturation)											
actuellement	79 %	79 %	86 %	79 %	78 %	87 %	86 %	89 %	89 %	83 %	87 %
scénario 2 x CO ₂	77 %	77 %	84 %	76 %	76 %	84 %	83 %	87 %	88 %	80 %	84 %
Nombre de jours durant lesquels l'humidité du sol est inférieure à 60 pour cent (sol sec)											
actuellement	63,4	77,3	39,7	75,9	77	32,4	40,4	29,9	6,8	37	18,6
scénario 2 x CO ₂	87,1	80,7	51,9	96,7	98,1	43,7	59,3	40	15,9	62	34,4
Nombre moyen de jours d'enneigement (jours par an)											
actuellement	13,5	17,5	20,1	20,1	22,4	36,1	46,4	38,3	108,4	81,4	153,8
scénario 2 x CO ₂	3,8 (28 %)	4,6 (26 %)	5,7 (28 %)	5,7 (28 %)	6,2 (28 %)	10,8 (30 %)	13,4 (29 %)	9,7 (25 %)	50,0 (46 %)	37,1 (46 %)	91,1 (59 %)

Vu l'importance des enjeux économiques en Suisse, une analyse à caractère socio-économique a été réalisée dans le bassin de la Broye (BULTOT *et al.*, 1994). Ce bassin est situé dans la tranche d'altitude où les effets d'un réchauffement sont susceptibles de se faire sentir de manière critique. En effet, les altitudes comprises entre 1200 et 1500 m représentent les zones où une large proportion des infrastructures de sports d'hiver sont situées. Des scénarios de réchauffement progressif de près de 1, 2 et 3 °C ont été imposés et l'évolution de l'enneigement étudiée.

Cette étude a permis de montrer qu'une augmentation de la température de 1 °C n'affecte pas de manière significative l'enneigement à cause de la variabilité naturelle importante de la température et des précipitations. Une élévation de près de 3 °C par rapport aux conditions actuelles, c'est-à-dire le scénario de base, provoque quant à elle une réduction drastique des précipitations de neige et à un raccourcissement de la période d'enneigement de près de deux mois. Les stations de sports d'hiver passent alors en dessous des conditions de rentabilité. Les solutions face à cette

menace ne peuvent s'envisager qu'au niveau politique, car promouvoir le développement de stations situées à des altitudes systématiquement plus élevées dans un environnement plus fragile d'altitude n'est pas sans risque. Dans le cas contraire, les populations de moyenne montagne devraient consentir à s'adapter à une diminution de leurs revenus apportés à l'heure actuelle par leurs activités hivernales.

5.3 Débits à l'exutoire

Les débits constituent la variable principale des simulations hydrologiques. En effet, elle est la moins difficilement mesurable et la capacité d'un modèle à simuler correctement les divers phénomènes physiques qui se produisent dans un bassin hydrographique se juge principalement sur la base de l'adéquation des débits simulés et observés. Au niveau pratique, c'est sans conteste la variable qui a le plus d'impact sur la population. En effet, crues et pénuries sont deux sujets de préoccupation privilégiés qui peuvent se produire quasiment chaque année.

Dans les études de sensibilité, deux aspects importants sont donc abordés. Comment le régime moyen des débits pourrait-il évoluer ? Ensuite, comment pourraient évoluer les débits extrêmes ? Étant donné qu'une augmentation des précipitations hivernales est prévue, comment les crues pourraient-elles évoluer ? Les dangers d'inondations seront-ils plus importants ? À l'inverse, en été et en automne, les basses eaux seront-elles encore plus basses ? Si c'est le cas, les dangers de pollution, d'eutrophisation deviendraient d'autant plus grands qu'ils se trouveraient combinés à une hausse des températures.

Les débits moyens des différents bassins sont repris au tableau 4. Suite aux effets combinés des précipitations hivernales plus importantes et des faibles valeurs de l'évapotranspiration durant cette saison, les simulations montrent que les débits moyens de cette saison augmentent dans tous les bassins. Durant la saison estivale, les débits moyens répondent quant à eux de façon différente d'un bassin à l'autre ; leur réponse dépend en fait essentiellement de la géologie du terrain. Dans la plupart des cas, une diminution des débits moyens se marque et est aisément explicable par la faible diminution des pluies d'été qui se superpose à l'augmentation de l'évapotranspiration. C'est le cas des bassins de la Zwalm, de la Berwinne, de l'Ourthe orientale, de la Semois et des trois bassins suisses. Dans tous ces cas les risques mentionnés précédemment sont à craindre et en particulier dans des zones comme le bassin de la Semois qui sont déjà soumises durant l'été à de très fortes pressions touristiques accompagnées de rejets d'effluents importants donnant lieu à des pollutions organiques. La qualité des eaux de consommation d'une manière générale pourrait être compromise alors que cette ressource naturelle est souvent une richesse déjà menacée par les polluants industriels ou agricoles. Le développement de stations d'épuration des eaux usées se justifie donc d'autant plus dans la perspective du réchauffement progressif du climat.

Quatre cas échappent à une diminution estivale des débits. Il s'agit des bassins de la Dyle, de l'Herk, de la Mehaigne et de l'Aa. Ces bassins sont recouverts de sols fortement perméables et l'eau excédentaire de l'hiver pénètre dans le sous-sol où elle est accumulée jusqu'à l'été dans les aquifères. Ces eaux sont libérées progressivement en été et soutiennent davantage les débits. Pour ces bassins, la qualité des eaux pourrait donc être améliorée et les risques de pollution moins graves. Les ressources en eau de ces zones pourraient donc devenir plus importantes aussi bien pour l'agriculture que pour l'industrie. Les étiages suivent directement la tendance des débits moyens de la période estivale.

Tableau 4 Régime mensuels des écoulements moyens à l'exutoire des bassins étudiés (en mm/mois) (scénario 0) et sous les conditions du $2 \times \text{CO}_2$ (scénario 1) ; les cases ombrées correspondent aux cas où les valeurs du scénario 1 sont inférieures aux valeurs actuelles.

Table 4 *Monthly regimes of the streamflow of the studied catchments (in mm/month) (scenario 0) and in the $2 \times \text{CO}_2$ conditions (scenario 1); shaded cells indicate values in scenario 1 lower than present climate values.*

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Zwalm													
Scénario 0	31,9	26,6	24,2	16,0	12,5	7,5	5,5	5,8	7,9	16,2	25,5	31,0	210,6
Scénario 1	36,3	31,1	28,1	19,8	12,9	6,9	5,2	5,3	7,6	16,7	27,2	34,6	231,7
Aa													
Scénario 0	38,9	31,7	30,5	21,8	16,3	12,1	12,3	11,6	12,9	18,9	26,6	34,5	268,0
Scénario 1	42,2	37,2	33,7	27,2	18,6	13,9	13,0	11,6	13,0	20,1	28,5	35,4	294,5
Herk													
Scénario 0	19,9	17,8	18,1	14,9	13,7	11,1	10,6	10,2	9,5	10,6	12,2	18,2	167,0
Scénario 1	22,8	20,8	20,4	17,1	14,8	11,8	11,1	10,5	9,9	11,2	13,2	20,5	184,0
Dyle													
Scénario 0	21,4	19,3	20,5	18,4	17,8	15,5	15,3	14,9	14,7	16,6	17,6	20,4	212,5
Scénario 1	23,5	21,3	22,4	20,3	19,0	16,3	16,1	15,6	15,2	17,4	18,8	22,2	227,9
Mehaigne													
Scénario 0	34,6	28,4	27,3	20,2	16,6	12,7	13,1	13,5	10,2	12,9	18,4	33,1	240,9
Scénario 1	39,3	32,7	30,0	22,9	17,4	12,8	13,2	13,2	10,4	13,4	19,6	37,2	262,2
Berwinne													
Scénario 0	40,1	34,2	34,4	26,1	16,8	13,2	14,3	13,1	10,5	13,8	20,5	36,9	273,7
Scénario 1	48,2	41,3	38,8	29,7	16,6	11,3	12,1	10,6	9,0	13,5	22,0	42,6	295,6
Ourthe orientale													
Scénario 0	84,8	69,5	59,3	45,1	25,5	14,9	14,7	14,8	17,0	28,5	53,3	82,9	510,2
Scénario 1	94,1	76,2	57,5	46,0	24,8	13,4	12,2	11,7	13,4	25,5	53,8	91,6	520,2
Semois													
Scénario 0	96,3	81,5	72,2	53,9	32,1	19,9	20,4	18,9	18,5	32,2	55,2	94,7	595,7
Scénario 1	108,3	88,8	71,9	54,8	31,4	16,8	17,0	15,7	16,0	30,1	57,1	103,8	611,7
Murg													
Scénario 0	76,4	59,3	73,5	56,1	44,7	52,9	31,2	34,1	33,7	40,3	31,4	74,4	608,0
Scénario 1	88,1	63,7	70,6	58,3	42,8	47,0	26,5	28,4	29,5	39,7	33,2	81,9	609,6
Ergolz													
Scénario 0	40,9	41,1	58,5	58,9	43,7	47,0	20,4	15,4	23,8	24,5	28,3	38,8	441,1
Scénario 1	46,0	48,7	54,0	60,0	40,9	41,5	17,6	12,7	21,1	24,0	30,6	44,0	440,9
Broye													
Scénario 0	71,9	69,9	97,9	69,2	57,1	50,9	25,6	20,8	38,7	66,4	51,8	73,0	693,2
Scénario 1	91,7	76,0	84,7	70,5	54,7	43,7	22,3	16,8	33,7	64,0	56,2	82,3	696,5

En ce qui concerne les crues hivernales en Belgique, les simulations montrent que les débits extrêmes seront plus élevés (GELLENS, 1991) et qu'en conséquence il faut craindre que les crues deviennent plus dangereuses et provoquent plus de dégâts. À ce propos, le renforcement des normes de sécurité dans les zones inondables des vallées permettrait d'atténuer cet effet négatif ; de nouveaux règlements de construction pourraient également être préconisés. Cette augmentation des dangers de crues pourraient par ailleurs se superposer aux risques d'élévation du niveau de la mer pour les bassins proches du littoral. En effet, si les crues surviennent lors des périodes de hautes eaux, les digues qui protègent les régions côtières basses et même fluviales pourraient ne plus être suffisamment hautes. Ce grave danger potentiel devrait être étudié de façon spécifique.

En Suisse, contre toute attente, le mécanisme d'augmentation des crues les plus élevées ne se marque pas dans la même mesure. Certains bassins comme l'Ergolz et la Broye montrent (SCHÄDLER *et al.*, 1992) même un léger tassement des valeurs extrêmes, conduisant à une stabilisation des risques liés aux pointes de crues extrêmes. Dans ces régions, les crues importantes sont en fait liées non pas aux pluies hivernales ou printanières comme en Belgique, mais bien à la fonte de la neige printanière qui accompagne des fortes pluies. La contribution la plus importante en volume provient alors de la fonte rapide de l'eau accumulée sous forme de neige. Avec l'augmentation des températures liée au réchauffement du climat, cette accumulation de neige est réduite et le produit de la fonte de la neige est de ce fait moins important. Le mécanisme des crues se rapproche donc de celui des régions tempérées de plus faible altitude.

À ces conclusions, il faut néanmoins ajouter certaines précautions quant à la modélisation proprement dite. Les modèles hydrologiques à pas de temps journalier comme le modèle IRMB ne peuvent pas simuler de manière stricte les pointes de crue instantanées mais permettent de modéliser les moyennes journalières des débits. Pour analyser ces phénomènes, l'adoption d'une modélisation à pas de temps plus court est nécessaire mais requiert en contrepartie des quantités d'informations hydrométéorologiques et physiques beaucoup plus importantes que les modèles à pas de temps journalier. En outre, en ce qui concerne la construction des scénarios climatiques, la communauté des hydrologues ne dispose pas à ce jour d'informations suffisantes sur l'évolution des fréquences et des intensités des précipitations dans les conditions climatiques du changement de climat. Il reste donc certaines incertitudes qui ne peuvent être levées dans l'immédiat mais qu'il faut garder en mémoire lors de l'interprétation des résultats des études de sensibilité.

Les études d'impact sur des entités hydrographiques bien spécifiques montrent que les caractéristiques locales sont importantes et qu'elles devraient être prises en considération dans les modèles globaux. Des résultats concordants ont été mis en évidence au Royaume Uni (ARNELL, 1992) sur base d'une modélisation à pas de temps mensuel.

5.4 Réserves en eau souterraine

Directement en rapport avec les débits à l'exutoire, les réserves en eau souterraines telles qu'elles sont conceptualisées par le modèle IRMB, représentent ici aussi bien le contenu des aquifères, s'ils existent, que les eaux qui transitent plus ou moins directement dans le sous-sol.

Les eaux souterraines sont largement exploitées dans de nombreux pays d'Europe, et en particulier en Belgique où elles représentent près des trois quarts des eaux de distribution (THOMSEN, 1989). Leur évolution est donc cruciale si l'on considère que la demande ne fait que croître et que si l'on n'y prend garde, leur qualité pourrait se dégrader. Les causes de cette baisse de qualité peuvent être attribuées à différentes contaminations par des rejets aussi bien industriels qu'agricoles, auxquels il faut encore ajouter les rejets directs d'effluents dans les cours d'eau.

Les contenus en eau des réserves souterraines des différents bassins sous le scénario de changement de climat sont repris au tableau 5. Alors que les quatre bassins de la Dyle, de l'Herk, de la Mehaigne et de l'Aa pourraient présenter des réserves plus importantes et donc des perspectives intéressantes d'exploitation, le cas le plus généralement simulé conduit à une réduction des réserves au moins pendant la fin de l'été et l'automne. Dans le Sud de la Belgique, de nombreuses sociétés locales exploitent des captages. Un appauvrissement des aquifères comme par exemple les petits aquifères perchés de la Semois pourrait conduire à des restrictions plus fréquentes de la fourniture d'eau et à des désagréments pour la population. Il faut noter à ce propos que certaines pénuries se marquent déjà régulièrement dans certaines régions de ce pays, sans pour autant que les conditions climatiques ne soient particulièrement exceptionnelles. Par ailleurs, en Suisse, les bassins de l'Ergolz et de la Broye comptent plusieurs sociétés qui exploitent les eaux à des fins d'embouteillage d'eau minérale. Dans les deux pays, la perspective de l'évolution possible du climat devrait encourager une gestion plus « durable » de toute l'exploitation et de la distribution de l'eau.

CONCLUSION

L'augmentation constante de la concentration des gaz à effet de serre devrait entraîner dans le futur un changement progressif de climat. Ce dernier serait principalement caractérisé par un réchauffement de près de 3 °C. Des impacts non-négligeables sur le cycle de l'eau d'une manière générale devraient également se manifester. En particulier la présente synthèse a montré certains impacts sur le régime des cours d'eau, les risques de crues élevées et de pollution, ainsi que sur les ressources en eau souterraine.

De nombreuses incertitudes persistent encore quant à l'ampleur exacte du changement de climat au niveau régional ainsi qu'en ce qui concerne son déroulement dans le temps. Un consensus scientifique s'est cependant clairement établi et il est d'ores et déjà possible de prédire la direction dans laquelle le climat évoluera. Toutes les informations ne sont pas encore disponibles et les études d'impacts doivent admettre des hypothèses complémentaires. En particulier, l'humidité de l'air, l'intensité et la fréquence des précipitations sont des facteurs importants dont l'évolution est encore difficile à prévoir avec précision.

Vu les enjeux, il est impératif d'informer les décideurs, dès à présent et dans la mesure du possible, quant à l'évolution du climat et de ses conséquences pour qu'ils puissent tenir compte de ces données nouvelles dans les stratégies pour l'avenir.

Tableau 5 Régime mensuels des contenu moyen des réserves en eau souterraines des bassins étudiés (en mm) (scénario 0) et sous les conditions du $2 \times \text{CO}_2$ (scénario 1) ; les cases ombrées correspondent aux cas où les valeurs du scénario 1 sont inférieures aux valeurs actuelles.

Table 5 *Monthly regime of the underground waters content of the studied catchments (in mm) (scenario 0) and in the $2 \times \text{CO}_2$ conditions (scenario 1) shaded cells indicate values in scenario 1 lower than present climate values.*

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Zwalm													
Scénario 0	60,7	60,7	56,7	50,0	43,1	38,7	35,2	32,8	32,6	36,3	45,3	54,7	45,6
Scénario 1	62,9	64,3	60,2	53,7	45,9	40,1	35,8	33,0	32,2	38,0	45,4	55,8	47,1
Aa													
Scénario 0	49,5	47,0	41,3	37,2	30,1	23,8	20,3	18,8	19,1	23,4	32,7	44,0	32,2
Scénario 1	56,4	57,2	50,9	43,5	35,1	27,4	22,6	19,9	19,6	24,2	34,4	46,8	36,5
Herk													
Scénario 0	464,6	473,3	474,8	467,5	455,5	444,2	435,1	428,8	425,3	424,0	431,2	447,0	447,5
Scénario 1	518,7	531,2	533,2	526,6	513,2	499,1	487,5	478,9	473,5	471,2	479,1	497,9	500,7
Dyle													
Scénario 0	427,6	447,1	455,3	450,2	431,7	409,2	389,1	371	355,7	349	363,2	393,5	403,6
Scénario 1	454,6	479,1	489,0	486,0	466,4	440,5	416,5	394,5	375,3	366,1	381,2	415,8	430,5
Mehaigne													
Scénario 0	268,6	273,3	272,8	265,7	255,0	245,7	239,8	236,2	232,6	232,0	241,9	256,4	251,6
Scénario 1	299,5	307,1	306,7	300,7	289,4	278,0	270,1	264,4	259,4	257,5	267,8	284,7	282,0
Berwinne													
Scénario 0	123,8	126,1	121,9	111,7	99,5	91,1	87,1	83,7	82,7	85,6	97,8	113,0	102,1
Scénario 1	126,5	129,3	122,8	112,6	99,8	90,3	85,5	81,7	80,2	83	96,7	114,1	101,9
Ourthe orientale													
Scénario 0	54,1	53,7	52,3	44,9	32,3	23,8	20,7	19,7	21,0	26,7	41,0	49,3	36,5
Scénario 1	54,8	53,6	51,4	45,3	32,8	23,3	19,1	17,4	18,1	24,4	40,8	50,4	35,9
Semois													
Scénario 0	89,7	97,2	95,7	87,8	73,3	58,6	47,9	39,5	34,1	36,5	52,9	75,7	65,7
Scénario 1	89,7	96,1	93,6	86,2	72,4	57,6	46,4	37,6	31,7	33,8	51,6	76,1	64,4
Murg													
Scénario 0	39,1	37,8	35,1	33,4	25,7	30,0	22,3	21,0	20,7	24,0	20,2	35,3	28,7
Scénario 1	44,1	41,7	35,5	34,9	26,3	28,0	19,7	18,0	17,8	22,7	20,4	36,4	28,8
Ergoiz													
Scénario 0	18,6	19,8	23,0	24,2	19,9	22,1	15,0	10,2	9,8	12,8	12,9	16,5	17,0
Scénario 1	20,5	22,8	23,4	25,1	19,8	20,8	13,6	8,9	8,5	12,1	13,1	17,9	17,2
Broye													
Scénario 0	42,0	41,5	44,6	43,3	35,6	33,9	22,1	15,2	19,4	34,4	34,6	39,0	33,8
Scénario 1	48,5	51,2	48,8	47,0	36,5	31,9	20,3	13,4	16,9	32,4	34,6	43,3	35,4

Les études de sensibilité du bilan d'eau de bassins hydrographiques situés en Belgique et en Suisse ont montré que de nombreuses variables hydrologiques sont sensibles au changement de climat induit par le doublement du CO_2 atmosphérique. Elles ont en outre montré que les réponses des bassins peuvent être fort différentes d'un lieu à l'autre, et que ces réponses dépendent dans un large mesure des caractéristiques de chaque entité telles la nature du sous-sol et l'altitude. Les mesures à prendre devront donc être envisagées au cas par cas afin de minimiser les impacts négatifs ; elles pourraient même dans certains cas tenter de tirer parti des conséquences du changement de climat induit par l'augmentation des gaz à effet de serre.

Étant donné les disparités importantes des réponses locales de certaines variables hydrologiques, l'analyse des impacts d'un changement de climat à l'échelle des grands bassins passe nécessairement par l'étude détaillée du cycle hydrologique sur tout son territoire. Cette constatation est à l'origine des efforts déployés par exemple par la Commission Hydrologique du Rhin pour étudier, dans son ensemble, le bassin du Rhin grâce à une synergie d'équipes travaillant sur des sous-bassins (pas de temps horaire et journalier) et sur le bassin tout entier (pas de temps mensuel). C'est dans ce cadre que se situent les études menées sur les trois bassins situés en Suisse et présentées ici. Dans cette même voie, l'étude des impacts hydrologiques en Belgique requiert une modélisation détaillée des bassins de la Meuse et de l'Escaut. Des études en ce sens font l'objet de projets à ce jour.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été financée d'une part par le Programme d'Impulsion « Global Change » financé par l'État belge – Service du Premier Ministre – Services Fédéraux aux Affaires Scientifiques, Techniques et Culturelles, et d'autre part par le Programme National de Recherche « Changements climatiques et catastrophes naturelles » (PNR 31) du Fonds National Suisse de la Recherche.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Arnell, N.W. (1992). Factors controlling the effects of climate change on river flow regimes in a humid temperate environment. *J. Hydrol.* 132 : 321-342.
- Bach, W. (1989). Projected climate changes and impacts in Europe due to increased CO_2 . Proceedings of the Conference on Climate and Water, Helsinki, 11-15 September 1989, vol. I, 31-50.
- Berger, A. (Editor) (1981). Climatic Variations and Variability : Facts and Theories. NATO Advanced Study Institutes Series. Series C : Mathematical and Physical Sciences. Reidel Publishing Company. Dordrecht, 795 p.
- Bultot, F., Dupriez, G.L. (1976). Conceptual hydrological model for an average-sized catchment area. *J. Hydrol.*, 29 : 251-292.
- Bultot, F., Coppens, A., Dupriez, G.L. (1983). Estimation de l'évapotranspiration potentielle en Belgique (Procédure Révisée).

- Inst. Roy. Mét. Pub., Série A, n° 112, Uccle-Bruxelles. 28 p.
- Bultot, F., Dupriez, G.L. (1985). Daily effective evapotranspiration from a river basin. In: Casebook on Operational Assessment of Areal Evaporation. *Oper. Hydrol. Rep.*, 22 (WMO-No 635) : 80-105.
- Bultot, F., Dupriez, G.L., Gellens, D. (1988a). Estimated regime of energy-balance components, evapotranspiration and soil moisture for a drainage basin in the case of a CO₂ doubling. *Climatic Change*, 12 : 39-56.
- Bultot, F., Coppens, A., Dupriez, G.L., Gellens, D., Meulenberghs, F. (1988b). Repercussions of a CO₂ doubling on the water cycle and on the water balance – A case study for Belgium. *J. Hydrol.* 99 : 319-347.
- Bultot, F., Gellens, D. (1989). Simulation of the impact of atmospheric CO₂ doubling on precipitation and evapotranspiration. Study of the sensitivity to various hypotheses. Proceedings of the Conference on Climate and Water, Helsinki, 11-15 September 1989: vol. I, 73-92.
- Bultot, F., Gellens, D., Spreafico, M., Schädler, B. (1992). Repercussions of a CO₂ doubling on the water balance – A case study in Switzerland. *J. Hydrol.* 137 : 199-208.
- Bultot, F., Gellens, D., Schädler, B., Spreafico, M. (1994). Effects of climate change on snow accumulation and melting in the Broye catchment (Switzerland). *Climate Change* 28 : 339-363.
- Cubasch, U., Meehl, G., Zhao, Z.C. (1994). IPCC WG1 Initiative on Evaluation of Regional Climate Simulations. Summary Report Prepared for IPCC and Model Evaluation Consortium for Climate Assessment. MECA, Electric Power Research Institute, Palo Alto, USA, 12 p + annexes.
- Gellens, D. (1991). Impact of a CO₂-induced climatic change on river flow variability in three rivers in Belgium. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16 : 619-625.
- Gellens, D., Demarée, G. (1993). Sensitivity of the hydrological cycle. Impact of the climate change induced by the doubling of the CO₂ atmospheric concentration. In the Proceedings of the "Belgian Impulse Program Global Change Symposium" 17 & 18 May 1993. vol. III. Belgian Science Policy Office, 217-243.
- Gellens, D., Roulin E. (1996). Global Climate Change. Possible evolution of the hydrological cycle and water resources in Belgium. Final report of the "Global Change" project GC/34/022. Service du Premier Ministre – Services Fédéraux des Affaires Scientifiques, Techniques et Culturelles/Institut Royal Météorologique, Uccle. 30 p.
- Hulme, M., Conway, D., Brown, O., Barrow, E. (1994). Climate change scenarios for Great Britain and Europe. A report accompanying the datasets prepared for the "Landscape Dynamics and Climate Change" TIGER IV3.a Consortium. Climate Research Unit, Norwich, UK, 29 p.
- Kaczmarek Z., Strzepek, K., Somlyódy, L., Pryazhinskaya, V. (1996). Water Resources in the Face of Climatic/Hydrological Uncertainties. Kluwer Academic Press, IIASA, Laxenburg, Austria, 395 p.
- Kuusisto, E., Lemmelä, R., Liebscher, H., Nobilis, F. (1994). Climate and water in Europe; some recent issues. WMO Regional Association IV (Europe). Working Group on Hydrology. Painatuskus Oy. Helsinki.
- Schädler, B., Spreafico, M., Bultot, F., Gellens, D. (1992). Evaluation Wasserhaushaltsmodelle. Vorstudie. Nationales Forschungsprogramm 31: "Klimaänderungen und Naturkatastrophen", 64 p.
- Thomsen, R. (1989). The effect of climate variability and change on groundwater in Europe. Proceedings of the Conference on Climate and Water, Helsinki, 11-15 September 1989: 486-500.
- IPCC (1990). Climate Change: The IPCC Scientific Assessment. WMO/UNEP. Houghton J.T., Jenkins G.J. and Ephraums J.J. (Eds.), Report of Working group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK 364 p.
- IPCC (1992). Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. WMO/UNEP. Houghton J.T., Callander B.A. and Varney S.K. (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK 200 p.
- IPCC (1994). Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and Eva-

luation of the IPCC IS92 Emission Scenarios. WMO/UNEP. Houghton, J. T., Meira Filho, L.G., Bruce, J., Callander, B.A., Haites, E., Harris, N. and Maskell, K. (Ed.). Cambridge University Press, Cambridge, UK, 578 p.

SWCC (1991). Climate Change: Science, Impacts and Policy. Proceedings of the Second World Climate Conference. WMO, UNEP, UNESCO, IOC, FAO and ICSW J. Jäger and H.L. Ferguson (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, 578 p.