

**ANALYSE DES RISQUES HYDROLOGIQUES ET IMPACTS
SUR LA QUALITE DE L'EAU DE LA FUTURE AUTOROUTE EST-
OUEST (ALGERIE)**

**HYDROLOGICAL RISKS ANALYSIS AND IMPACTS TO
WATER QUALITY FOR EAST-WEST MOTORWAY
(ALGERIA)**

T. Benkaci¹ & N. Dechemi²

¹ *Département d'hydraulique, Institut National Agronomique - El Harrach.
Alger. benkacitarik@yahoo.fr*

² *Département d'hydraulique, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique.
ndechemi@yahoo.com*

RESUME

Un grand projet autoroutier a été décidé par le gouvernement Algérien en matière de transport, il s'agit de la future autoroute Est-Ouest qui va relier les villes de l'extrême Est à celles de l'ouest du pays. Vu sa longueur qui dépasse 1200 km, cette autoroute a été divisée en plusieurs sections, pour faciliter son étude ainsi que sa réalisation. Cependant, les sections 1 et 2 de l'autoroute qui seront construites dans la partie Est du pays, traversent des oueds, des marécages, et des grands lacs tels que les lacs Tonga et Oubeira, à proximité de la ville d'El Kala. L'étude hydraulique a révélé une augmentation des niveaux de certains oueds ainsi qu'une possible extension des zones inondables dues aux différentes infrastructures. L'article est subdivisé en deux parties : la première traitant les aspects hydrologiques et hydrauliques, qui nous ont permis de simuler le fonctionnement hydraulique des principaux oueds et de prédire leurs niveaux, la deuxième partie traite les risques hydrologiques, et les impacts environnementaux après construction de l'autoroute.

Mots clés: Risque hydrologique, hydraulique, autoroute Est-Ouest, inondation, étude d'impact, Algérie.

ABSTRACT

A great motorway project was decided by Algerian government as regards transport; it acts of the future East-West motorway which will

connect the cities of the extreme East to those of western country, its alignment which exceeds 1200 km. However, the sections 1 and 2 of the future motorway which will be built in the eastern region of country, cross many rivers and lakes such as Tonga and Oubeira lakes, near the town of El Kala. In this paper, an impact study was supplemented to predict the hydrological risks of this motorway.

Hydraulic simulation studied using one-dimensional model of major rivers located in section 1 and 2, revealed an increase in the risks of flood and inundation area extension. An impact study was supplemented to predict the impact of the motorway on the modification of hydrology such as erosion, and water quality.

Key words: Hydrological risks, Hydraulic of stream, East-West highway, inundation, Impact Study, Algeria.

INTRODUCTION

L'Algérie pays à climat semi-aride, a vu ces dernières années une multiplication des inondations (Novembre 2001, Mai 2006, Novembre 2007) qui ont causé des dégâts humains et matériels très importants, que ce soient dans les bassins versants urbains ou ruraux. Ces inondations résultent généralement d'un débordement des cours d'eau ou d'une infiltration lente voire absente dans des espaces soumis à des averses de forte intensité (Roux, 2004).

Le pays qui s'étend sur une superficie de 2,4 millions km² possède un réseau routier le plus développé du continent africain. Cependant, avec l'augmentation du trafic routier et la multiplication des embouteillages, les voies routières sont presque saturées. Pour faciliter la circulation des marchandises, les infrastructures urbaines doivent être considérablement renforcées. Un nouveau projet autoroutier sera construit dans le nord de l'Algérie, d'une longueur de 1216 Km, et d'un profil de 2×3 voies séparées par un terre-plein central, cette autoroute assurera la liaison entre les régions frontalières Est à celles de l'Ouest, avec la desserte des principaux pôles en touchant directement 24 villes (MATP, 2008).

Selon les prévisions officielles (MATP, 2008), le projet créera des dizaines de milliers d'emplois directs et indirects et désenclavera et valorisera des régions entières, surtout celles situées loin des centres urbains. En effet, d'après les analyses faites par le gouvernement algérien, la future autoroute aura des conséquences économiques positives sur le développement du pays, cette nouvelle autoroute permettra :

- La création de près de 50 000 emplois directs et indirects;

- Le développement du trafic routier et du transport de marchandises ;
- Le développement touristique local par la création d'hôtels, et la construction de nouvelles villes relativement proches de l'axe autoroutier.

Le parc naturel d'El Kala situé à l'Est de l'Algérie, représente une grande réserve naturelle, d'une superficie de 76 438 Ha. Le parc s'étend sur des lacs importants, en particulier les lacs Mellah (eau relativement salée) et les lacs Tonga et Oubeira (eau douce) qui représentent des sites d'hivernage et de nidification pour plusieurs anatidés. Ces lacs disposent de plusieurs espèces aquatiques (*Ramsar, 2003*). Ces zones humides représentent aussi la voie d'immigration de plusieurs oiseaux venant d'Europe. En plus de la faune, le parc englobe 850 espèces végétales. Doté d'une grande productivité biologique, ce parc assure une fonction importante qui est la prévention des inondations par sa capacité de stockage, c'est à partir de cette région (sections 1 et 2) que va débiter la nouvelle autoroute à l'Est du pays.

Cependant, vu le dernier tracé, la future autoroute va traverser des zones humides et fortement inondables, en particulier les sections 1 et 2, situées dans l'Est du pays ; les lacs, les oueds et les étangs se trouvant dans cette région ont fait de la région une zone humide protégée où des espèces animales et végétales rares font l'objet d'un suivi scientifique depuis plusieurs années.

Cette «urbanisation» d'un écosystème fragile et unique en Algérie a fait soulever plusieurs voix contre le projet, en effet la construction de l'autoroute et ses infrastructures aura pour conséquences :

- L'élimination et/ou le fractionnement de plusieurs terres agricoles ;
- Une augmentation de la pollution atmosphérique et hydrique, les rejets des huiles sur les voies naturelles des cours d'eau faciliteront la pollution des cours d'eau ;
- Une augmentation des inondations dues à l'obstruction de certains oueds et ruisseaux : les risques hydrologiques dus aux infrastructures représentent une conséquence négative d'un projet urbain. Dans ce cas, la détermination des plus hautes eaux après construction du projet ainsi que l'étendue des zones inondables est nécessaire avant l'exécution de ce projet. Cependant, pour reproduire et comprendre le fonctionnement complexe d'une rivière, il est nécessaire de le modéliser.

L'objet de cet article, est la modélisation hydraulique des rivières en vue d'une prévision des hautes eaux et une possible détermination des zones inondables, ainsi que l'impact de l'autoroute sur l'environnement et la qualité de l'eau.

PRESENTATION DE LA REGION D'ETUDE

La future autoroute traversera deux grands bassins versants Algériens, il s'agit des bassins de la Seybouse et du Côtier Constantinois. Cette région qui est soumise à un climat méditerranéen est caractérisée par deux saisons distinctes : l'une humide, marquée par une forte pluviosité, et par de faibles températures, allant du mois d'octobre au mois de mai, et l'autre, sèche et chaude, avec de fortes températures atteignant le maximum au mois d'août.

Du point de vue hydrogéologique, la principale nappe aquifère est située en dessous de l'aquifère superficiel, s'étendant sur toute la superficie de la plaine (Derradji *et al.*, 2004). Elle est contenue dans les graviers, sables et galets plio-quadernaires et encaissée dans un bassin d'effondrement (Gaud, 1979), la perméabilité de son toit, varie d'une région à l'autre.

Le tracé de la future autoroute pour les sections 1 et 2 est présenté dans la figure 1.

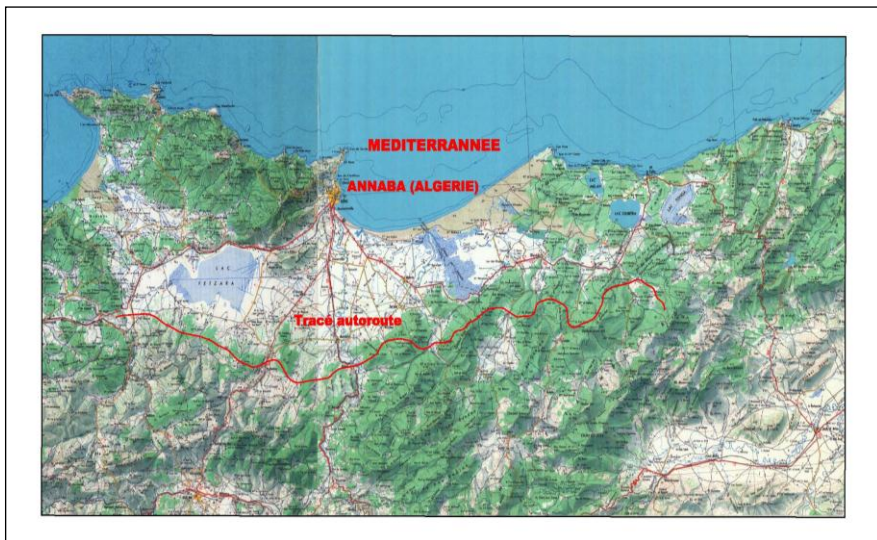


Fig. 1 Tracé de l'autoroute Est-Ouest (Sections 1 et 2)

Caractéristiques hydrologiques

Le bassin de la Seybouse dispose d'une dizaine de postes pluviométriques, cependant seuls trois (3) d'entre eux ont des données complètes. Pour ce qui est des stations hydrométriques leur densité est très faible, on ne dénombre que trois (3) stations, la plus importante est celle de Mirebeck en aval du bassin de la Seybouse, qui contrôle une superficie de

5840 km². Le bassin versant du côtier Constantinois est situé dans le Nord-Est algérien, il est alimenté par l'oued Bouna Moussa qui est formé par l'intersection des oueds de Kamouna et Soudan, et se ramifie en oueds Bou Alalah et El Kebir, ces deux bassins sont fortement drainés par des oueds et des thalwegs, et sont vulnérables aux crues et aux inondations de la période hivernale. Les caractéristiques hydrologiques de la zone du projet sont résumées dans le tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques hydrologiques de la zone d'étude

<i>Bassins</i>	<i>C. Constantinois</i>	<i>Seybouse</i>
S (km ²)	570	5955
Kc	1,20	/
H moyenne (m)	420	750
P annuelle (mm)	1060	834
D. drainage (Km/km ²)	4,8	2,2

Aperçu des calculs hydrologiques et hydrauliques de la future autoroute

Le tracé de l'autoroute pour la section 2 débute du PK0+000 au PK34+800, sillonne le lac de Garrat Fetzara et la nouvelle route nationale (RN84). Cette section est composée de 48 petits bassins versants, où il est prévu de construire trois (3) ponts. Pour ce qui est de la section 1, d'une longueur totale de 90 km elle débute du PK34+800 au PK 124, et traverse les oueds Seybouse et Bouna Moussa, ainsi que les lacs Oubeira et Garrat El Mkhedda.

La région de l'Est du pays est caractérisée par une forte pluviométrie (qui peut atteindre annuellement 1000 mm) et des intensités de pluies très importantes. L'analyse fréquentielle des pluies maximales journalières par la loi de Galton (Loi log-normale) donne une pluie maximale journalière de période de retour 100ans, de 145 mm pour la station pluviométrique de Ain El Assel. Les débits des oueds augmentent rapidement en période hivernale. L'étude hydrologique a permis d'identifier les principaux bassins versants où devront être implantés des dalots. Au total, plus de 170 dalots devront être installés le long de l'autoroute pour les deux sections.

Pour l'estimation du débit de projet, l'étude hydrologique est basée sur les équations de la méthode rationnelle pour des bassins présentant des superficies inférieures à 5km². Pour des bassins versants dont la superficie est supérieure à 5km², le débit de projet sera estimé selon la méthode SCS

(SCS, 1972, 1976), dont le débit unitaire Q ($m^3/s/km^2/mm$) est exprimé selon la relation :

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} = \frac{(P - 0.2 \cdot S)^2}{P + 0.8 \cdot S} \quad (1)$$

Où : S représente la capacité maximale d'infiltration, qui dépend du type du sol, et de la couverture végétale, le débit de projet Q_p est calculé comme suit (FHWA, 2002) :

$$Q_p = 0.00043 \times 10^{C_0 + C_1 \cdot \log(t_c) + C_2 \cdot (\log(t_c))^2} \times A \times Q \quad (2)$$

Où : A représente la superficie du bassin versant (km^2), t_c le temps de concentration, C_0 , C_1 et C_2 sont des paramètres déduits graphiquement en fonction du type des précipitations.

Sur le plan hydraulique, l'équation de Manning-Strickler sera utilisée pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques. Le calage des profils en long des dalots qui va permettre de déterminer le contrôle amont ou aval, sera calculé par deux méthodes : la méthode américaine (Normann *et al.*, 1985) qui se base sur l'estimation des pertes de charges, et la méthode développée dans le guide de l'assainissement routier (RAR, 1982) qui représente une méthode simplifiée de l'équation de Bernoulli.

SIMULATION HYDRAULIQUE DES RIVIERES

Une des problématiques d'une autoroute est le franchissement des cours d'eau, pour cela on construit des ponts qui devront traverser les grandes rivières, il est donc impératif de connaître la réaction de ces rivières en période de crues, et de définir l'étendue des zones inondables à proximité de l'autoroute (Bradley, 1978). Dans ce cas, on doit recourir à une simulation hydraulique (ou numérique) de la rivière. Parmi les modèles hydrauliques on distingue deux classes :

- Les modèles monodimensionnels (1D) dits filaires, dans ce cas la géométrie du cours d'eau est représentée par une succession de profils en travers, où la vitesse de l'eau est calculée seulement suivant l'axe de l'écoulement ;
- Les modèles bidimensionnels (2D), qui modélisent la section du cours d'eau par un maillage 2D, c'est-à-dire qu'ils permettent de calculer les champs de hauteur et de vitesse de l'eau sur chaque maille (Horrit *et al.*, 2002).

La résolution d'un modèle hydraulique nécessite des données concernant la géométrie, et les caractéristiques de l'écoulement, parmi les

données géométriques figurent la longueur du tronçon étudié, sa largeur, la forme du lit, mais également la morphologie du cours d'eau (Roux, 2004).

La détermination de la hauteur maximale des crues permettra d'estimer une revanche (clearance) entre la hauteur maximale d'une rivière et le pont. Le support informatique utilisé est le logiciel HEC-RAS 4.0 (2004), qui est un logiciel 1-D, capable de simuler le fonctionnement d'une rivière ainsi que son comportement hydraulique avec possibilités d'insertion d'ouvrages hydrauliques tels que ponts.

Description des rivières étudiées

La nouvelle autoroute traversera 11 grands oueds se trouvant dans les sections 1 et 2. Dans cet article, nous nous intéresserons à la simulation de quatre (4) oueds, dont les caractéristiques hydrologiques et hydrauliques sont résumées dans le tableau 2.

Tableau 2. Caractéristiques géomorphologiques des rivières étudiées

No.	Rivière	PK	Sup (BV) (Km ²)	L (Km)	Pente rivière (m/m)
1	Khanga	34+280	87	16,3	0,008
2	Seybouse	43+600	5 840	200,0	0,001
3	Bouhallouf à	88+400	191	25,8	0,002
4	Oued kebir	94+200	989	45,80	0,0008

L'oued Khanga, situé au PK34+280 (Section 2), draine une superficie de 87 km². Il présente des débits élevés en période hivernale en particulier les mois de Mars, seule la rive droite est relativement inondée, alors que l'oued Seybouse (PK 43+600) qui est le principal collecteur du bassin de la Seybouse, draine une superficie de 5840 km². A son embouchure, l'oued Seybouse déborde et inonde les deux rives en moyenne tous les dix ans. Pour ce qui de l'oued Bouhalloufa (PK 88+400), situé dans une vallée fortement drainée par des petits cours d'eau et des lacs temporaires, les basses rives de cette rivière sont très vulnérables aux inondations durant la période hivernale. Le quatrième oued est l'oued El kebir (PK94 +200), cet oued est formé en amont d'une confluence de l'oued El kebir et de l'oued Guergour, ce dernier est situé sur une zone marécageuse. Le tracé de l'autoroute traversera aussi la vallée de Bouna-Moussa située en aval d'un barrage qui collecte les eaux du bassin de la Cheffia. Le laminage des crues de ce barrage est resté longtemps problématique. En effet, c'est en période

de fortes précipitations que le barrage lâche des débits importants et provoque généralement la montée brusque des eaux de l'oued El kebir, et inonde les plaines avoisinantes.

Collecte des données et établissement des profils de la rivière

La modélisation d'une rivière nécessite plusieurs étapes, à commencer par l'établissement des profils en travers des rivières qui vont permettre de limiter les différentes sections d'amont en aval. Ces profils doivent être minutieusement réalisés, car la première source d'erreur concernant la modélisation de la rivière est due aux erreurs topographiques des différentes sections. En effet, Casas et al., (2006) considèrent la précision topographique comme le facteur critique et déterminant pour toute modélisation hydraulique d'une rivière. Ces profils sont représentés par des coordonnées X-Y, où X est la distance par rapport à un point de référence, et Y est l'élévation correspondante. Un exemple de profil en travers avec insertion d'un pont est donné pour l'oued Seybouse (Fig. 2).

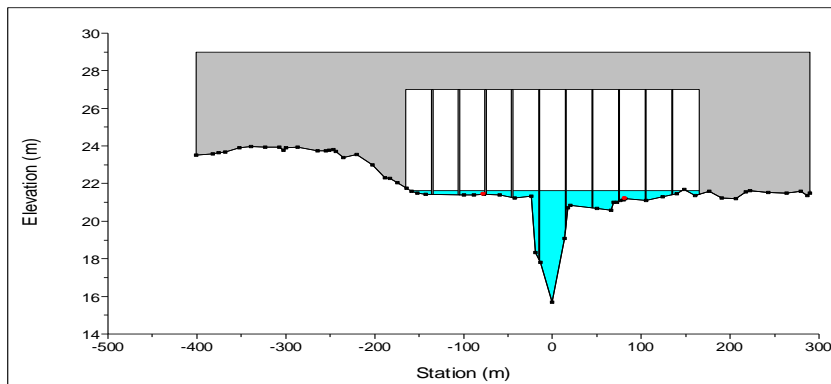


Fig. 2 Exemple d'un profil en travers avec insertion d'un pont (Oued Seybouse)

Bases théoriques et techniques du modèle (Logiciel Hec-Ras)

Dans le logiciel Hec-Ras, la ligne d'eau est calculée d'une section à une autre en résolvant l'équation de l'énergie par une méthode itérative (HEC-RAS, 2004). Elle est obtenue à partir de l'équation de quantité de mouvement, et représente la conservation de la charge hydraulique de Bernoulli. L'équation résolue est la suivante :

$$Y_1 + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = Y_2 + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_e \quad (3)$$

où : Y_1 et Y_2 représentent la hauteur d'eau, Z est la cote du fond du lit de

la rivière, g est la gravité ($9,81 \text{ m}^2/\text{s}$), h_e représentent les pertes de charge entre deux sections, elles sont calculées comme suit (*HEC-RAS, 2004*) :

$$h_e = L\bar{S} + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (4)$$

Dans cette équation, L et \bar{S} représentent respectivement la distance et la pente entre deux sections, C est le coefficient de contraction, égal à 0.1.

Dans notre étude, l'écoulement est mono-dimensionnel, dans ce cas:

$$\frac{dQ}{dx} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{dH}{dx} = \frac{I - J}{1 - Fr^2} \quad (5)$$

Où : Q est le débit (m^3/s), H est la hauteur d'eau moyenne comptée à partir du fond du lit (m), I est la pente du lit (m/m), J est la pente de la ligne d'énergie (m/m), calculée à l'aide l'équation de Manning-Strickler.

La distance entre deux sections est généralement de 100 à 200 m, cette donnée est essentielle, elle permet la convergence du modèle (*HEC-RAS, 2004*). La largeur des profils est en fonction de la largeur des rives, de l'importance du débit de la rivière, et du relief. En zones de montagnes, les profils en travers présentent des largeurs moins importantes qu'en zones de plaines.

La pente du lit de la rivière doit être mesurée avec beaucoup de précision, en effet, une surestimation de cette pente aura pour conséquence un passage au régime torrentiel, et donc une sous-estimation de la hauteur d'eau de la rivière (selon le principe de Bernoulli). Le choix de la rugosité en particulier celle du fond de la rivière est déterminant, ce paramètre exprimé en coefficient de Manning conditionne le régime d'écoulement. Pour les berges, le programme permet d'introduire les coefficients de rugosité, ce qui permet d'estimer l'avancée des crues sur les rives. Théoriquement on peut caler le modèle en donnant des valeurs entre 0,03 et 0,04 pour le chenal principal, et peuvent atteindre 0,06 pour les rives (*CETMEF, 2001*). Pour les coefficients de contraction et d'expansion, ils sont de 0,1 et 0,3 respectivement (*HEC, 1997*).

Sur le plan hydraulique, il est indispensable de fixer des conditions aux limites du système modélisé, on supposera donc que le régime est de type fluvial en aval, et que le débit de la section correspond à celui de la période de retour des crues observées. La présence de petits lacs temporaires ou d'étangs à proximité du talweg principal ne doit pas influencer la simulation

de la rivière, en effet ces "zones d'eau mortes" ne participent pas à l'écoulement.

Il est donc impératif de fixer dans le programme de simulation ces zones, pour ne pas fausser les calculs.

Pour l'insertion d'un pont dans le programme, on doit modéliser correctement l'ouvrage, en respectant le nombre, les dimensions (largeur), et la localisation des piliers, ainsi que la hauteur et la longueur des remblais, dans cette étude, la largeur des piliers est fixée à 1,50 m, la distance séparant deux piliers est de 30 m.

On détaille dans le tableau 3, les longueurs des ponts ainsi que le nombre des piliers prévus pour chaque pont:

Tableau 3. Nombre de piliers pour chaque pont étudié

No.	Rivière	L. pont (m)	N. piliers
1	Khanga	30	/
2	Seybouse	330	10
3	Bouhalloufa	90	2
4	Oued kebir	180	5

Calage et validation du modèle

Pour pouvoir reproduire le comportement hydraulique de la rivière, deux paramètres importants doivent être connus, la hauteur des crues historiques, et le débit correspondant.

La hauteur des crues (plus hautes eaux connues) est obtenue après enquêtes et vérification sur le terrain, et auprès des populations. Pratiquement, tous les débits des crues recensés dans cette région correspondent à une période d'observation de moins de 40 ans (après 1970). Cependant, on ne dispose que de 3 stations hydrométriques, la plus proche est la station de Mirebeck située en aval de l'oued Seybouse, ces données ont été prises en considération pour l'estimation des débits à différentes périodes de retour de l'oued Seybouse. Pour les oueds de Khanga et Bouhalloufa, l'estimation des débits a été faite par la méthode SCS, les valeurs du Curve Number (CN) sont respectivement de 77 et 78. Pour l'oued Kebir, vu sa superficie (989 km²), la méthode SCS n'est plus valable (SCS, 1972, 1986). Dans ce cas, nous avons pris en considération les débits spécifiques (m³/s/km²) des trois stations les plus proches à savoir celles de Mirebeck, de Ain el Assel, et de Ain berda. Ces débits extrapolés par unité de surface, ont été ajustés en fonction de la superficie contrôlée par l'Oued kebir.

Le programme doit procéder à plusieurs itérations en variant les valeurs de ce coefficient jusqu'à ce que l'écart (E) entre le niveau d'eau observé et simulé par le modèle (niveau de la crue) soit minimal :

$$E = N_{sim} - N_{obs} \quad (6)$$

Les débits des différents oueds sont détaillés dans le tableau 4.

Tableau 4. Débits pour différentes périodes de retour des rivières étudiées

No.	Rivière	Q _{50 ans} (m ³ /s)	Q _{100ans} (m ³ /s)	Méthode
1	Khanga	119,0	160,0	SCS
2	Seybouse	2000,0	2315,0	Gumbel
3	Bouhalloufa	247,6	297,1	SCS
4	Oued kebir	882,0	1000,0	Débit spécifique

Il est à noter que dans cet article, il n'est pas question de juger de la capacité du modèle ou de la structure de modélisation, ou même d'identifier les sources d'incertitude. Dans leurs travaux de comparaison entre diverses approches de modèles hydrauliques, *Horrit et Bates (2002)* ont souligné la robustesse du modèle mono-dimensionnel HEC-RAS dans la simulation de certaines crues. *Geoffroy (2007)* a testé la sensibilité du modèle HEC-RAS dans la simulation des paramètres morphogènes d'une rivière du Bas-Rhin et a noté la fiabilité du modèle dans la reproduction des lignes d'eau, et de l'étendue des crues.

RESULTATS DES SIMULATIONS

L'impact d'un ouvrage hydraulique tel que les ponts sur l'écoulement d'un cours d'eau doit être analysé avec beaucoup de précision. En effet, la connaissance de l'extension des inondations en particulier en amont de l'autoroute est importante pour déterminer les zones à risques.

Pour ce qui est des valeurs de rugosité (exprimé en coefficient de Manning), elles varient entre 0,033 pour l'oued Seybouse, et 0,038 pour l'oued Bouhalloufa, qui présente de fortes rugosités. Toutefois, la différence d'eau entre le niveau de la rivière observé et simulé (erreur de simulation) ne doit pas dépasser une marge importante, dix (10) cm d'erreur représente une limite acceptable, pour des grandes rivières présentant des grands débits telle que la Seybouse, une différence de moins de quinze (15) cm serait acceptable.

Pour bien éclaircir les résultats de la modélisation, nous présentons dans le tableau 5, les valeurs des niveaux d'eau observé et simulé des rivières au

droit du futur pont, ainsi que les valeurs du coefficient de Manning (n) le plus optimal :

Tableau 5. Valeurs du coefficient de Manning obtenu après calage

No	Rivière	Q (m ³ /s)	Année	N. observé (m)	N. simulé (m)	Ecart (m)	Manning
1	Khanga	78,4	1984	57,72	57,83	0,11	0,035
2	Seybouse	844,0	1971	21,56	21,66	0,10	0,033
3	Bouhalloufa	203,0	1984	22,50	22,59	0,09	0,038
4	Oued Kebir	670,0	1984	19,86	20,08	0,22	0,035

Pour mieux illustrer l'impact hydrologique de l'autoroute, on présente les résultats des niveaux des oueds en conditions actuelles c'est-à-dire avant le projet (Situation 1), et après construction des ponts (Situation 2) pour des débits de périodes de retour de 50 et 100 ans.

Tableau 6. Niveaux d'eau simulés pour des périodes de retour de 50 et 100 ans

No	Rivière	Q50 ans			Q100 ans		
		Situation 1	Situation 2	Différence	Situation 1	Situation 2	Différence
1	Khanga	57,98	58,19	0,21	58,20	58,50	0,30
2	Seybouse	23,98	24,36	0,38	24,75	25,10	0,35
3	Bouhalloufa	22,71	23,41	0,70	22,84	23,61	0,77
4	Oued kebir	20,82	21,30	0,48	21,03	21,66	0,63

D'après le tableau 6, on remarque une nette augmentation des niveaux des rivières après construction des ponts et des infrastructures de l'autoroute. Pour une période de retour de 50 ans, le niveau d'eau des rivières augmente en moyenne de près de 0,44m avec un maximum pour l'oued Bouhalloufa dont le niveau va monter de 0,70m après construction du pont et de ses infrastructures. Pour des débits correspondants à une période de retour centennale, la montée des eaux des rivières la plus importante est enregistrée au niveau de l'oued Bouhalloufa, en effet l'augmentation du niveau d'eau est de près de 0,80 m. Ceci, peut être expliqué par la géomorphologie étroite du lit de la rivière, les piliers du pont et ses remblais obturent considérablement le lit de la rivière, ce qui provoque cette montée en amont du pont. Pour l'oued Khanga, l'augmentation des niveaux d'eau est due principalement aux remblais et

aux obstructions créées par le pont, la différence de niveau d'eau est en moyenne de 20 cm.

Augmentation des zones inondables

L'estimation des surfaces inondables par un modèle hydraulique est une étape difficile sur les plans théorique et pratique. En effet, vu l'absence de cartes de zones inondables, il est difficile d'estimer ces surfaces sans recours aux calages, où les valeurs du coefficient de Manning des rives gauche et droite sont mal connues, et où les pentes négatives des rives rendent complexes cette estimation. Cependant, nous pouvons nous contenter des valeurs de rugosité des rives (coefficients de Manning) citées dans le *CETMEF* (2001), et que nous avons utilisés pour l'estimation des hautes eaux, ces valeurs varient essentiellement en fonction de l'occupation du sol. Etant donnée la montée des niveaux des eaux après construction des ponts et mise en place des remblais de l'autoroute, les diverses simulations montrent une augmentation des surfaces inondées dans la partie amont de l'autoroute. La figure 3 montre clairement l'allure des surfaces inondées pour l'oued Bouhalloufa, et cela avant et après construction de l'autoroute en fonction du débit.

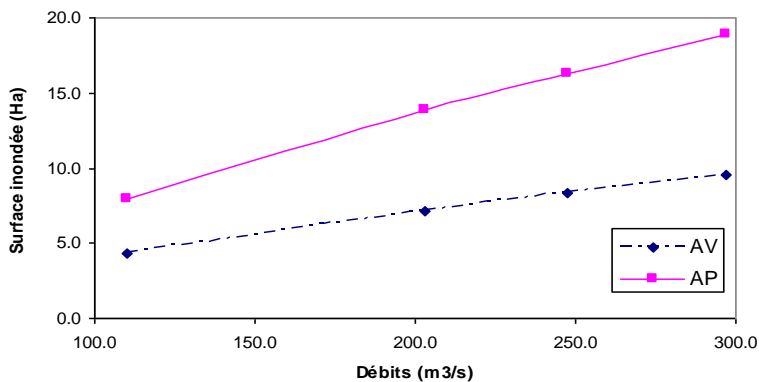


Fig. 3 Estimation des surfaces inondables (oued Bouhalloufa) : (AV) avant, (AP) après construction de l'autoroute

Il est à noter que les surfaces inondées calculées par le modèle constituent seulement l'emprise maximale des profils introduits dans le modèle, dans ce cas, Il est impératif d'introduire dans le programme des profils en travers qui encadrent toute la plaine inondable.

Dans la partie aval de l'autoroute, les surfaces inondables sont relativement moindres, et cela à cause de l'effet barrière provoqué par les remblais de l'autoroute, qui jouent le rôle de régulateur à ce niveau.

Prévision des impacts de la future autoroute sur l'hydrologie et la qualité de l'eau

La construction d'une grande autoroute en zone rurale à dominance fluviale entraîne certes des modifications hydrologiques et écologiques, l'augmentation des niveaux de certaines rivières calculés précédemment en est une preuve. Cependant, certains changements dus aux différentes infrastructures de l'autoroute sont difficilement modélisables par des modèles mathématiques et/ou hydrauliques. L'impact de ces changements doit être donc quantifié par une étude environnementale faite sur le terrain et par une analyse comparative à d'autres projets similaires qui ont engendré des problèmes.

Ainsi, les problèmes et les risques que devront affronter les ingénieurs durant la construction de l'autoroute et après, sont dans l'ordre d'importance :

Une modification de l'hydrologie de la région et une augmentation des zones inondables :

La zone du projet est drainée par un certain nombre de cours d'eau tels que les oueds et les talwegs. La modification du paysage par des travaux de déblais et de remblais peut obstruer certains ruisseaux ou talwegs ou changer leur écoulement normal. La modification de l'hydrologie peut avoir comme conséquence la privation d'eau de certaines terres agricoles, l'inondation des zones basses, l'accélération de l'écoulement dans des zones à fortes pentes, et la détérioration de la qualité de l'eau de surface en raison des transports solides. Ainsi, les enquêtes faites sur le terrain, nous ont permis de conclure à une possible extension des zones inondables dues aux remblais qui constitueront des « petits barrages » à l'écoulement de l'eau, en particulier les basses terres situées dans les vallées de l'oued Bouna-Moussa et de l'oued Bouhalloufa (section 1), et une accumulation importante des eaux au niveau de la confluence de l'oued Guergour, ce qui provoquera une extension des surfaces inondables dans cette zone. De plus, la présence d'une dizaine d'étangs sur l'axe de l'autoroute accrue considérablement la problématique des zones humides. En effet, la région Nord-Est du pays est réputée par ses nombreux étangs et mares qui constituent son paysage, la construction de l'autoroute sur ces étangs constitue une contrainte hydraulique.

Ainsi, au niveau de la section 2, quatre étangs importants doivent être supprimés, les plus importants présentent des superficies de plusieurs hectares avec des hauteurs maximales dépassant 20 m.

Une augmentation de l'érosion et des transports solides : En phase de construction, les zones de déblais sont dégarnies de végétation et sont fortement sujettes à l'érosion. En outre, les surfaces de remblais nouvellement établies sont stériles et exposées aux éléments de dégradation naturelle. Sans aucune forme de couverture pour protéger le sol vulnérable, des matières meubles peuvent facilement être érodées par la pluie, les cours d'eau, le vent et le mouvement des véhicules et de l'équipement de construction. Ceci, provoquera donc une augmentation des débits solides de certains cours d'eau, en particulier les terrains accidentés de la région de Ain el Assel, ce qui entraînera à leur tour une perte de terres importantes.

Une diminution de la perméabilité des sols par des constructions urbaines : L'emprise de l'autoroute construite par du bitume diminue sensiblement l'infiltration de l'eau dans les sols, et favorise la formation des flaques d'eau. Il est prévu que des zones d'accumulation se forment autour des voies de l'autoroute. La construction de nouveaux hôtels, parkings, centres d'entretien et résidences accroît considérablement l'imperméabilité des bassins versants, et provoquent un mauvais drainage. On estime que près de 5% de terres seront occupées par des nouvelles constructions sur l'axe de l'autoroute 10 ans après son ouverture, ce qui contribuera à une augmentation de risques d'inondation par saturation des sols.

Un impact négatif sur la qualité de l'eau : La mobilisation et le transport de polluants par les eaux de ruissellement, sur les surfaces imperméables routières ou urbaines, d'une part, et le devenir de ces polluants lorsque des eaux pluviales contaminées s'infiltrent dans le sol d'autre part, doivent faire l'objet d'une étude approfondie.

Parmi les polluants les plus nocifs les éléments traces métalliques tels que le plomb, le zinc et le chrome (*Pagotto, 1999*), qui avec une concentration significative, sont toxiques pour les humains et la faune. Un niveau de pollution des sols à proximité des chaussées (< 25m) est donc à prévoir, à cause de la solubilisation du plomb et du zinc contenus dans le sol (*Delmas-Gadras, 2001*). De plus, l'accroissement de la circulation automobile à proximité du milieu humide pourrait engendrer un apport accru de mercure dans cet écosystème, cette augmentation représente une menace supplémentaire pour la faune du milieu humide.

Les matières en suspension (MES) avec ses charges organiques et inorganiques toxiques peuvent nuire à l'environnement aquatique. Les calculs effectués (*SETRA, 2006*) assumant une circulation de 20000 véhicules en TMJA, et un pic de 35000 véhicules, indiquerait que les

effluents engendrés par les véhicules s'ils ne sont pas traités, risquent d'atteindre ou de dépasser les valeurs-seuils des eaux polluées établies par l'ANRH pour la classification de la qualité des rivières, ce qui pourrait détériorer la qualité des eaux de certaines rivières en particulier la Seybouse, qui collecte déjà les rejets polluants des sites industriels tels que l'usine sidérurgique d'El hadjar.

Un impact négatif des carrières et des constructions temporaires : Les carrières représentent un élément essentiel des projets de route, en fournissant les matériaux nécessaires pour la construction, tels que des agrégats et des matières de remblais. Le dégagement de poussières dues aux carrières en phase de construction est l'un des risques associés à la construction de routes, le terrassement de la future autoroute nécessite des quantités de remblais importantes qui auront pour conséquence l'inondation importante de certains hameaux et villages situés dans ces zones.

Un impact négatif sur l'environnement, la faune et la flore : La dégradation du paysage naturel en particulier en phase de construction est la première incidence négative d'un tel projet, les forêts défrichées, les pistes créées, les déchets dus aux équipements et diverses installations contribuent largement à la détérioration de l'environnement naturel autour de l'autoroute.

L'ouverture des zones de déblais et de remblais provoque une suppression de la végétation (herbes, arbres) le long de l'emprise de l'autoroute, de plus l'obstruction de certains cours d'eau peut priver certaines espèces végétales d'irrigation. Pour ce qui est de l'environnement physique, on prévoit à ce que la qualité de l'air dans la zone du couloir de l'autoroute, soit affectée après croissance du trafic par les émissions des véhicules.

Après réalisation du projet, l'établissement de l'autoroute a pour conséquence la création d'une « barrière » artificielle qui limite la libre circulation de la faune. Des espèces animales, tel que le cerf de Barbarie (*Cervus elaphus barbarus*) qui est un animal de migration a besoin de se déplacer pour se nourrir, de se reproduire et de s'échapper en cas de danger (feu de forêts et chasse), ce qui facilitera son isolement et son abattage. La future autoroute sera considérée comme une « barrière écologique » qui gênera considérablement la circulation et le mode de vie de plusieurs espèces animales protégées par le conservatoire naturel d'El kala tel que le Lynx Caracal (*Felis Caracal*) ou encore l'hyène rayée (*Hyaena Hyaena*). La petite faune est aussi susceptible d'être gênée par l'autoroute, pour exemple les différentes espèces de lièvre qui exigent un grand territoire pour se déplacer.

FACE A CETTE SITUATION QUELLES SOLUTIONS A METTRE EN PLACE ?

La construction d'une autoroute d'une telle ampleur dans la région humide d'El Kala, nécessite sensiblement de prendre des mesures pour contrer tout risque hydrologique ou environnemental. Malheureusement les travaux de construction ont déjà commencé, néanmoins des normes de construction respectant l'environnement et des mesures préventives doivent être prises en compte telles que :

- Une mise en place d'ouvrages hydrauliques permettant une meilleure circulation des cours d'eaux : les ouvrages hydrauliques (buses et dalots) seront dimensionnés pour une période de retour de 100 ans, en plus d'une hauteur d'eau du débit de projet qui sera égale à 80% pour laisser transiter les débris et corps flottants. De plus, il est impératif d'aménager les talus de certains cours d'eau qui présentent des fortes pentes, pour éviter leur obstruction, et un éventuel risque d'inondation. Une protection en enrochements doit être établie pour lutter contre l'inondation de l'autoroute provoquée par certains cours d'eau, en particulier les oueds El kebir, Bouhalloufa et Bouna Moussa.

- Une végétalisation sur l'axe de l'autoroute et un reboisement des zones affectées par les déblais et le terrassement des sols : ces plantations en particulier des arbres permettront un meilleur stockage des écoulements d'eau en cas de crues et une lutte contre l'érosion des sols, en particulier les zones accidentées;

- Un laminage des crues et une régularisation plus rationnelle des eaux des barrages situés en amont, ce qui évitera le débordement des oueds et donc une meilleure protection de l'autoroute et des ponts, en particulier des eaux provenant du barrage de Cheffia. Un aménagement des bassins versants et une correction torrentielle doivent être envisagés pour lutter contre les charriages de certains oueds en période hivernale;

- Au niveau des principaux oueds, doivent être installés des bassins de traitement des eaux et de déshuilage, qui vont permettre de stocker des charges polluantes, et d'éviter une pollution de ces cours d'eau. Un suivi sur l'évolution du taux des polluants dans les eaux superficielles est nécessaire ;

- L'aménagement de passages souterrains pour faciliter le passage d'animaux, ce qui permettra une meilleure préservation de la faune.

CONCLUSION

La future autoroute Est-Ouest qui sera construite en Algérie, sera d'une grande importance économique et ouvrira des perspectives socio-économiques considérables, et des moyens importants ont été prévus pour sa construction.

Dans cet article, une réflexion a été centrée autour de l'incidence hydrologique et environnementale d'un tel projet pour les sections 1 et 2 à l'Est du pays. Ainsi, au-delà de la complexité hydraulique des rivières, et de certaines limitations des programmes utilisés, le développement de modèles et les progrès réalisés en matière de capacité informatique font de la modélisation hydraulique d'une rivière un outil de plus en plus intéressant, en particulier dans le domaine de l'analyse et de la gestion du risque d'inondations. Les résultats de modélisation de certaines rivières se trouvant dans la zone du projet de la future autoroute indiquent clairement une montée des niveaux d'eau après construction de l'autoroute, et une extension des zones inondables.

De plus, même si cette autoroute serait mieux assainie avec prise en compte d'un débit de projet centenaire, d'une hauteur de projet égale à 80% de la hauteur interne pour les ouvrages hydrauliques, de constructions des ponts au-dessus des principaux oueds, d'installation des bassins traitement et de déshuilage, la modification du milieu naturel et un éventuel « déséquilibre » écologique représentent les risques potentiels importants pour la réserve naturelle d'El Kala. En effet, il est toujours à prévoir une dégradation du milieu par rapport à son état initial. Cette dégradation s'articule autour d'une augmentation des niveaux de crues, une extension des zones inondables et une pollution des rivières.

Un suivi technique et scientifique s'impose donc pour contrer tout risque hydrologique en en phase de construction, et après mise en service de l'autoroute pour préserver le parc naturel d'El Kala qui assure un rôle biologique important en Afrique du Nord.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bradley J.N. (1978). Hydraulic of Bridge Waterway, (FHWA).
- Casas A., Benito G., Thorndycraft V.R., Rico M., (2006). The topographic data source of digital terrain models as a key element in the accuracy of hydraulic flood modelling. *Earth Surface Processes and Landforms*, Volume 31, Issue 4, Pages: 444-456.
- CETMEF (2001). Hydraulique des cours d'eau : la théorie et sa mise en pratique.

- DELMAS-GADRAS C. (2001). Influence des conditions physico-chimiques sur la mobilité du plomb et du zinc dans un sol et un sédiment routier. Thèse de Doctorat, Univ. Pau, France, 192 p.
- Derradji F., Kherici N., Romea M., Caruba C., (2004). Aptitude des eaux de la vallée de la Seybouse à l'irrigation. Sécheresse, John Libbey Eurotext, 4 (15) 353-360.
- Federal Highway Administration (FHWA) (2002). Hydraulic design, series N°2: Highway hydrology, second edition, US department of transport, USA, 420 p.
- Gaud B. (1979). Synthèse des connaissances et recherche de modélisation. Etude hydrogéologique du système aquifère Annaba-Bouteldja. Annaba : Agence nationale des ressources hydriques (ANRH) Algérie; 140 p.
- Geoffroy J. (2007). Modélisation des paramètres morphogènes du cours d'eau inférieur de la Bruche (Bas-Rhin) et analyse de sensibilité du modèle HEC-RAS à la qualité des données topographiques. Thèse d'ingénieur, ENGEES, Strasbourg, France, 86 p.
- Guide du drainage routier (2006). Guide technique du drainage routier. SETRA, France, 2006, 95 p.
- HEC (Hydrologic Engineering Center) (1997). *HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual*. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA. <http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras>
- Horrit M., Bates P. (2002). Evaluation of one-dimensional and two-dimensional numerical models for predicting river flood inundation. *J. of Hydrology* 268, 87–99.
- MATP : Ministère Algérien des Travaux Publics (2006) : Rapport technique et socio-économique de la future autoroute Est-Ouest. (<http://www.MTP.gouv.dz>).
- Normann J.M., Houghtalen R.J., Johnston W.J. (1985). Hydraulic design of highway culvert, *Hydraulic Design Series N°5*, Federal Highway Administration (FHWA). 85-15.
- Pagotto C. (1999). Etude sur l'émission et le transfert dans les eaux et les sols des éléments traces métalliques et des hydrocarbures en domaine routier. Thèse de Doctorat, Univ. Poitiers, France, 300 p.
- RAMSAR (2003). Fiche descriptive sur les zones humides : Réserve intégrale du lac Tonga d'El Kala, Direction Générale des Forêts (Algérie), 10 p.
- RAR (1982). Recommandation pour l'Assainissement Routier. LCPC-SETRA, PARIS, France, 65p.

- Roux H. (2004). Estimation des paramètres en hydraulique fluviale, à partir de données caractéristiques de l'imagerie aérienne. Thèse de Doctorat, INP. Grenoble, France, 300 p.
- Soil Conservation Service (1972). Chapter 9, Hydrologic Soil Cover Complex, SCS National Engineering Handbook, US Department of Agriculture, Washington DC. USA.
- Soil Conservation Service (1986). Urban hydrology for small watershed. Technical release N°55, US Department of Agriculture, Washington DC. USA.
- U.S. Army Corps of Engineers (2004). HEC-RAS river analysis system, version 4.0 Beta. U.S.A.C.E. Hydrologic Engineering Center, <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras>.