



# MODELISATION DU SOUTIEN DU PLAN D'EAU D'ARNAVILLE PAR LA RETENUE DE MADINE VIA LE RUPT DE MAD

## *Rapport de synthese*



Novembre 1998



1105, Avenue Pierre Mendès France  
BP 4001 - 30001 NIMES Cedex 5 - FRANCE  
Tél. : 04.66.87.50.00 - Fax. : 04.66.87.51.09  
Télex 490769 F - E-Mail : brl@brl.fr

# MODELISATION DU SOUTIEN DU PLAN D'EAU D'ARNAVILLE PAR LA RETENUE DE MADINE VIA LE RUPT DE MAD

## RAPPORT DE SYNTHÈSE

<b>1. OBJET DE LA PRÉSENTE NOTE.....</b>	<b>2</b>
1.1 DÉMARCHE ENTREPRISE.....	2
1.2 CHRONOLOGIE DE L'ÉTUDE.....	2
<b>2. PHASE 1.....</b>	<b>2</b>
2.1 DOCUMENTS ET DONNÉES UTILISÉS.....	2
2.2 CARACTÉRISTIQUES DE LA ZONE D'ÉTUDE.....	3
2.2.1 <i>La situation géographique</i> .....	3
2.2.2 <i>Les plans d'eau</i> .....	3
2.2.2.1 Le lac de Madine.....	3
2.2.2.2 La retenue d'Arnaville.....	4
2.2.3 <i>Climatologie</i> .....	4
2.2.4 <i>Débits</i> .....	5
2.2.5 <i>Pertes et apports sur les cours d'eau</i> .....	5
2.2.6 <i>Prélèvements</i> .....	6
2.2.7 <i>Bilans hydrologiques (synthèse)</i> .....	7
2.2.7.1 Lac de Madine.....	7
2.2.7.2 Retenue d'Arnaville et Rupt de Mad.....	8
<b>3. PHASES 2 ET 3.....</b>	<b>9</b>
3.1 MODÈLE.....	9
3.1.1 <i>Modélisation MAGRE</i> .....	9
3.1.2 <i>Modélisation adaptée au cas du Rupt de Mad</i> .....	9
3.1.2.1 Type de modélisation.....	9
3.1.2.2 Représentation du système.....	9
3.1.2.3 Éléments du modèle.....	10
3.1.3 <i>Initialisation et Calage du modèle</i> .....	11
3.2 SIMULATIONS.....	11
3.2.1 <i>Références de l'état initial</i> .....	11
3.2.1.1 Contextes climatologiques.....	11
3.2.1.2 Hydrologie.....	11
3.2.2 <i>Scénarii de simulation</i> .....	11
3.2.2.1 Destockage maximum.....	12
3.2.2.2 Besoins supplémentaires.....	12
3.2.2.3 Automatisation de processus.....	12
3.2.3 <i>Résultats de simulation</i> .....	12
3.2.3.1 Destockage de 10 Mm3 (mode offre).....	12
3.2.3.2 Demandes supplémentaires en eau (mode demande).....	13
3.2.4 <i>Déficits et problèmes en présence</i> .....	13
3.2.5 <i>Mesures compensatoires</i> .....	14
3.2.5.1 Pompage dans la Meuse.....	14
3.2.5.2 Surélévation du plan d'eau de la Madine.....	15
<b>4. ANNEXES.....</b>	<b>15</b>

# 1. Objet de la présente note

## 1.1 Démarche entreprise

Cette étude consiste en la réalisation et l'utilisation d'un modèle décrivant le fonctionnement du système hydraulique dont fait partie le Lac de Madine, dans un but de soutien du plan d'eau d'Arnaville par l'intermédiaire de la rivière Rupt de Mad.

Le présent rapport s'attache à décrire les résultats de simulation et les solutions techniques pour la gestion du système hydraulique que constitue le Rupt de Mad.

Ces résultats s'appuient sur les différentes informations et données techniques disponibles sur le sujet, ayant permis de construire, caler et faire fonctionner une modélisation. Plusieurs réunions techniques entre les différents intervenants sur l'étude ont permis de préciser et valider les actions et données utilisées dans cette modélisation. Le modèle final reproduit les actions de gestion entreprises sur un cours d'eau dont les apports naturels sont mesurés ou estimés.

## 1.2 Chronologie de l'étude

Le travail s'est déroulé selon 3 phases principales :

- \* phase 1 (données)
  - analyse des données de base (inventaire et recueil);
  - critique des informations disponibles;
  - traitement et reconstitution des données.
- \* phase 2 (modélisation)
  - mise en place et initialisation du modèle représentatif du système hydraulique en présence;
  - calage du modèle (vérification de l'adéquation de la représentation à la réalité);
  - simulations.
- \* phase 3 (analyse et exploitation des résultats)
  - affinement des choix de scénarii (options, contraintes, etc.);
  - exploitation des résultats de simulations;
  - mesures compensatoires.

# 2. Phase 1

## 2.1 Documents et données utilisés

Une recherche de fond (bibliographie) a permis de réunir un ensemble d'ouvrages susceptibles d'apporter des informations dans le cas de la présente étude. Un ensemble de données techniques a également pu être réunie sur la zone d'étude.

Il s'agit pour l'essentiel de :

- Etudes techniques sur le lac de Madine, le Rupt de Mad et son bassin versant (bureaux d'études);
- Rapports internes publics (Agence de l'Eau RM, DIREN, Parc de Lorraine, Ville de Metz);
- Travaux universitaires (INP Lorraine, ENS Géologie, ENSEEIHT);
- Documents cartographiques (géologie, hydrogéologie, topographie) de l'IGN et du BRGM ;
- Données climatiques (précipitations, insolation...);
- Données hydrologiques (débits des cours d'eau, niveaux des retenues);
- Données hydrogéologiques (sols, karsts, sources);

Données sur la gestion technique des retenues d'eau (lâchures, pompages...);

## 2.2 Caractéristiques de la zone d'étude

### 2.2.1 La situation géographique

La zone d'étude appartient au bassin versant de la Moselle. Le Rupt de Mad en est un affluent de sa rive gauche. Son propre bassin versant débute à l'ouest en Meuse (source) et s'étend principalement en Meurthe-et-Moselle, à l'est.

L'ensemble du bassin versant (BV) couvert par le Rupt de Mad totalise 384,8 km<sup>2</sup>, depuis sa limite amont jusqu'à sa confluence avec la Moselle. Le sous-bassin versant de la Madine (confluent du Rupt de Mad au Point Kilométrique Hydrologique PKH 974.53) totalise pour sa part 107,1 km<sup>2</sup>.

### 2.2.2 Les plans d'eau

#### 2.2.2.1 Le lac de Madine

Mise en place en 1972, cette retenue avait initialement une superficie de 450 hectares et un volume utile de stockage de 10 millions de mètres cubes (entre 5 et 14) à la cote NGF 224,50. Surélevé sur la période 1974-78, il atteint désormais une superficie de 1082 ha et un volume maximal stocké de 35 millions de mètres cubes, à la cote NGF 227,50 (cote de l'évacuateur réactualisée aujourd'hui à 227,89).

Cette retenue représente l'exutoire d'un bassin versant de 45 km<sup>2</sup> (atteignant 48,74 km<sup>2</sup> en sortie du lac).

Les relevés quasi-mensuels des hauteurs d'eau sur le lac de Madine permettent de suivre l'évolution du stock, principalement alimenté en hiver et au printemps). Cette fréquence des relevés limite l'observation des variations journalières du plan d'eau, donc l'analyse de sa gestion au pas de temps quotidien (simulations non vérifiables) : de fait, les fluctuations journalières sont assez mal connues (surverses lors de fortes pluies notamment).

Le bilan hydrologique montre ainsi que des surverses interviennent parfois en dehors des périodes d'étiage<sup>1</sup>. Certaines observations sur les débits mesurés à Onville les soulignent sans pouvoir en quantifier précisément l'importance et la fréquence (confirmé au niveau des simulations lors de certains épisodes pluvieux estivaux et lorsque le niveau du lac est particulièrement élevé).

La courbe spécifique liant hauteur/volume et surface de la retenue permet l'estimation de ces paramètres par la connaissance de l'un d'eux. Plusieurs phases de travaux (enrochement) ont artificiellement contribué à l'abaissement du niveau d'eau en 1986 et 1990 (marnage inférieur à 1 mètre en général).

Utilisé comme base de loisirs (sans qu'il s'agisse de son principal objectif), le plan d'eau est initialement et régulièrement sollicité pour le soutien du Rupt de Mad, par l'intermédiaire de son exutoire, la rivière de la Madine. Les lâchures provoquées ont lieu essentiellement en étiage (mai à novembre). L'importance des lâchures est régulée (débit réglé à l'aide d'une vanne) et fait l'objet d'une gestion manuelle.

Tout lâcher d'eau depuis le barrage est ainsi connu, avec une vérification des débits libérés sur un déversoir triangulaire en sortie de la retenue. Ce déversoir ne permet néanmoins aucune estimation des surverses qui, elles, empruntent un canal annexe.

*Remarques : 1- l'évaporation est équivalente aux précipitations tombant sur le lac de Madine dans l'année mais les décalages dans le temps sont marqués (variations saisonnières accentuant les pertes en étiage et les surverses le reste de l'année).*

*2- les forts volumes surversés représentent la totalité des apports du BV alimentant le lac ; Tout comme à Arnaville, bien que non mesurées, ces surverses sont largement supérieures aux lâchures provoquées (ordre de grandeur de 1 à 10).*

---

<sup>1</sup> Les simulations confirment quantitativement ces observations liées à des situations exceptionnelles.

### 2.2.2.2 La retenue d'Arnaville:

Ce plan d'eau a une superficie maximale de 25 ha et un volume utile de stockage de 335000 mètres cubes (évacuateur à la cote NGF 180.55 m). Le stock d'eau restant limité, son rôle est essentiellement celui d'un bassin de décantation sur le Rupt de Mad.

Cette retenue est située à l'exutoire d'un bassin versant totalisant ici 382 km<sup>2</sup> (y compris BV de la Madine).

Il n'existe pas de suivi de niveau ni de courbe Surface/Hauteur/Volume définie pour le plan d'eau d'Arnaville. La morphologie supposée de la retenue autorise l'utilisation d'une courbe non validée (pour un ordre de grandeur des variations). Ce plan d'eau fonctionne en trop plein quasi-permanent, avec une gestion par l'aval de régulation des débits du Rupt de Mad pour limiter les surverses (autres que le débit réservé). Le marnage du plan d'eau est faible, en pratique inférieur à 20 cm (soit une variation de stock de 50000 m<sup>3</sup>).

*Remarque: Etant donné la faible étendue de la retenue et son rôle de décanteur, l'infiltration est présumée faible et n'est pas prise en compte sur le plan d'eau d'Arnaville (une estimation sur les mêmes critères que le lac de Madine indique une infiltration de l'ordre de quelques litres/s, soit inférieure à 0,1 mm/j et en volume 5 Mm<sup>3</sup>/mois).*

### 2.2.3 Climatologie

Les stations Météo-France de Vigneulles-les-Hattonchatel (à l'ouest de la zone d'étude) et d'Essey-et-Maizerais (centre-ouest) (Météo-France) fournissent des informations continues sur la pluviométrie locale. La station météorologique de Metz, corrélée à celle de Nancy-Essay, permet quant à elle la connaissance de l'évaporation sur les plans d'eau dans la zone d'étude.

Les précipitations journalières relevées sur la période 1966 à 1997 (32 années complètes) présentent les caractères suivants :

		Moyenne (mm)	minimum (mm)	maximum (mm)
<b>Vigneulles</b>	annuel (mm)	899.80	534.60	1153.60
	mensuel (mm)	74.29	1.10	337.40
<b>Essey</b>	annuel (mm)	738.88	379.80	1002.60
	mensuel (mm)	62.02	0.60	234.80

Globalement les deux stations sont fiables, avec une pluviométrie plus forte dans la partie occidentale du bassin versant (Vigneulles). Deux tendances apparaissent sur la période d'étude : une série plutôt « sèche » (1966-1981) et une série plus « humide » (1982-1997).

	1966-1981	1982-1997
<b>Vigneulles</b>	849 mm/an	956 mm/an
<b>Essey</b>	656 mm/an	820 mm/an

L'analyse statistique<sup>2</sup> a également permis de déterminer sur la période d'observation 1983-97 les fréquences des années quinquennale humide (H5), normale (N), quinquennale sèche (S5) et décennale sèche (S10), afin de caractériser ces années types en simulation :

mm/an	H.5	N.	S.5	S.10
<b>Vigneulles</b>	1065.64	930.19	762.29	721.34
[année représentative]	[1986]	[1990]	[1989, 1996]	[1985]
<b>Essey</b>	919.19	825.02	708.28	679.81
[année représentative]	[1994, 1986]	[1989, 1990, 1993]	[1992, 1996]	[1985]

<sup>2</sup> Logiciel de calcul statistique HYDROSTAT (analyse de données de pluies ou débits) développé à BRL.

## 2.2.4 Débits

Une station située à Onville mesure en continu les débits du Rupt de Mad depuis 1966.

Des campagnes régulières de jaugeage sur le cours d'eau permettent également d'en vérifier ou d'en compléter les informations, (notamment en période d'étiage sur le bassin concerné): Ces campagnes de jaugeages en étiage constituent des compléments d'information à l'analyse des débits d'écoulement. Elles ont ainsi permis de dégager des profils hydrologiques caractéristiques et descriptifs des deux cours d'eau (débits spécifiques, coefficients de propagation des débits d'étiage, zones et importance de pertes, etc.).

Les débits d'étiage subissent de façon notable l'impact des lâchers de la Madine (débits participant au soutien d'étiage et du plan d'eau d'Arnaville en été), ce qui n'est pas le cas pour les débits de crue.

*Moyennes mensuelles (en m<sup>3</sup>/s) et année-type correspondante sur la période 1965-98:*

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc	moy. AN	année type (moyenne)
<b>H2</b>	4.81	5.92	4.43	3.41	2.18	1.47	0.91	0.75	0.76	1.38	1.89	4.19	<b>3.55</b>	<b>1977</b> (1.52)
<b>H5</b>	10.03	10.51	7.92	7.11	4.53	2.73	1.61	1.39	1.32	2.71	3.66	8.48	<b>4.79</b>	<b>1980</b> (4.76)
<b>H10</b>	14.71	14.17	10.71	10.43	6.63	3.76	2.16	1.93	1.76	3.86	5.16	12.24	<b>5.43</b>	<b>1970</b> (5.42)
<b>S2</b>	2.31	3.34	2.48	1.64	1.05	0.79	0.52	0.39	0.43	0.70	0.98	2.07	<b>2.31</b>	<b>1974</b> (2.30)
<b>S5</b>	1.94	2.91	2.16	1.37	0.88	0.68	0.45	0.34	0.38	0.60	0.83	1.75	<b>2.01</b>	<b>1991</b> (2.03)
<b>S10</b>	1.55	2.44	1.81	1.10	0.71	0.57	0.38	0.28	0.32	0.49	0.68	1.41	<b>1.64</b>	<b>1972</b> (1.73)

Moyenne interannuelle sur la période 1965-97 (33 années): **3.52 m<sup>3</sup>/s.**

Réglementairement, les plans d'eau de la Madine et d'Arnaville sont tenus de maintenir un débit minimum à leur exutoire. Ces débits réservés sont respectivement de 24 litres par seconde (86,4 m<sup>3</sup>/h ou 756.864 m<sup>3</sup>/an) pour la Madine et de 85 l/s (306 m<sup>3</sup>/h ou 2.680.560 m<sup>3</sup>/an) pour le Rupt de Mad.

En pratique les débits réservés (Qr) sont variables mais supérieurs aux valeurs indicatives, à de rares exceptions sur la période d'observation. A titre d'exemple, il s'échelonne entre 20 l/s et 100 l/s pour la Madine et une quasi constante de 100 l/s pour le Rupt de Mad.

Les temps de transfert<sup>3</sup> de la Madine à Arnaville varient sensiblement selon l'importance des débits, tout en étant supérieure à 35 h. De St Baussant à Arnaville (distants de 36 kilomètres), les vitesses de transfert fluctuent entre 0,4 et 1,7 km/h. La réaction du plan d'eau d'Arnaville à la modification des débits lâchés à la Madine se fait donc avec une inertie moyenne de l'ordre de 2 jours et un abattement fonction de l'hydraulicité.

Bien qu'il n'existe aucune relation franche entre les précipitations et les écoulements engendrés, le coefficient d'écoulement moyen sur l'année est de 0,34, soit une lame d'eau ruisselée de 265 mm environ pour 780 mm précipités (moyenne 1966-97 sur le bassin).

## 2.2.5 Pertes et apports sur les cours d'eau

La nature des sols et sous-sols suffit en elle-même à justifier l'existence de pertes et sources sur les portions perméables (fissures, karst) du bassin versant. Les eaux s'écoulent sur des formations perméables dans la partie amont de la deuxième moitié du bassin versant (pas de constitution possible de réserves) et traversent un réseau karstique à partir de Thiaucourt (circulations souterraines et pertes en rivière).

Les relations nappe-rivière apparaissent fortes, notamment à travers l'analyse des relations pluie-débit. D'un point de vue hydrogéologique, les circulations souterraines sont identifiables (notamment par les relevés

<sup>3</sup> En principe, temps mis par une goutte tombée au point le plus éloigné du bassin pour atteindre son exutoire.

hydrogéologiques du bassin versant voisin du Terroin). Ces caractéristiques hydrogéologiques accentuent les étiages en période sèche.

Des zones de pertes apparaissent localement sur la rivière, spécialement sur le tronçon Richecourt-Euvezin (aval): entre Richecourt et Maizerais, ces pertes ont été estimées à 15% des écoulements (une mesure à l'aval d'Euvezin donne 20 litres/seconde<sup>4</sup>). Dans le détail, ces relations sont certainement plus complexes, avec des pertes pouvant représenter une part non négligeable des écoulements en période d'étiage, et en moindre proportion sur le reste de l'année (tout comme le comportement saisonnier des sources d'ailleurs).

La nature du sous-sol favorise également l'émergence de sources de trop-plein dans le bassin versant amont, à l'origine du Rupt de Mad, mais sous très faibles débits (entre 4 et 6 l/s). Quelques sources de déversement existent dans les secteurs de Lahayville et Maizerais. Une évaluation sommaire laisse supposer leur rôle saisonnier, avec un tarissement ou une baisse de débit en été, de l'ordre de quelques dizaines de litres.

Des aménagements constants et nécessaires sur le Rupt de Mad et son bassin versant (notamment entre 1960 et 1980) ont certainement modifié les conditions de ruissellement et l'écoulement de la rivière, gênant en cela les analyses des débits et les bilans hydrologiques sur la période incluant ces événements. Ainsi, des curages excessifs dans la partie calcaire semblent ainsi avoir aggravé les pertes en rivière en aval de Richecourt, tandis que la mise en place de seuils dans la partie amont du Rupt de Mad a, dans le même temps, ralentit les vitesses d'écoulement de la rivière (favorisant les pertes par infiltration).

Les nombreux étangs présents dans la partie amont du bassin, s'ils jouent un rôle tampon lors des fortes pluies, peuvent également aggraver l'étiage en période sèche car n'étant pas soumis à l'obligation d'un débit réservé. Les vidanges simultanées<sup>5</sup> de ces étangs (ou surverses en périodes humides), semblent se traduire par une augmentation " artificielle " des débits du cours d'eau.

## 2.2.6 Prélèvements

La Mosellane des Eaux prélève sur la retenue d'Arnaville une partie des eaux destinées à l'alimentation de la Ville de Metz.

Sur la période 1987 à 1998, les volumes journaliers d'eau brute prélevée sur ce site (y compris les pertes pour production d'eau) présentent des fluctuations saisonnières et annuelles assez importantes.

Les pertes d'eau en production (en moyenne égales à 5% des volumes AEP sortant de la station) fluctuent de façon saisonnière, suivant l'adaptation du traitement en périodes de turbidité des eaux ou de développement algal dans l'eau brute (variation classique).

D'après les bilans mensuels de la Mosellane des Eaux sur la période 1991-97, elles contribuent à majorer le prélèvement par rapport à la production d'eau potable dans les proportions suivantes:

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc	AN
Coef. de pertes (%)	4.7	6.2	4.4	5.0	4.3	4.9	6.4	6.2	5.5	5.7	7.0	4.9	5.43
Soit en volume moyen (x10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	55.5	66.5	49.1	56.3	48.4	56.6	73.4	68.6	66.0	73.3	85.9	58.4	754

Le prélèvement **journalier** moyen total est de 38000 m<sup>3</sup>. Il oscille entre un minimum de 16215 m<sup>3</sup> (676 m<sup>3</sup>/h) et un maximum de 59228 m<sup>3</sup> (2468 m<sup>3</sup>/h).

Les fluctuations annuelles et saisonnières des prélèvements d'eau brute sont les suivantes :

<sup>4</sup> d'après étude Aquascop 1993.

<sup>5</sup> Vidange aux mois d'octobre et novembre, sans aucune précision sur les volumes mis en jeu.

## Analyse annuelle

Volume annuel prélevé en milliers de m <sup>3</sup>	Années
13 270.66	1987
15 026.01	1988
14 623.29	1989
13 929.41	1990
<b>15 445.35</b>	(maxi) 1991
14 432.69	1992
12 860.33	1993
12 785.23	1994
<b>12 256.46</b>	1995 (mini)
14 569.32	1996
13 489.31	1997
<b>13 880.73</b>	moyenne (écart-type= 1024)

## Analyse mensuelle

(fluctuations mensuelles des volumes prélevés, en milliers de mètres cubes)

x10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	Moyenne	Min	Max	Ecart-type
<b>Janvier</b>	1 180.46	973.07	1 377.87	128.09
<b>Février</b>	1 072.06	924.18	1 213.61	90.39
<b>Mars</b>	1 116.81	1 004.57	1 311.14	97.12
<b>Avril</b>	<b>1 071.71</b>	966.03	1 227.59	84.76
<b>Mai</b>	1 125.20	971.58	1 228.40	95.85
<b>Juin</b>	1 155.48	969.29	1 347.28	132.75
<b>Juillet</b>	1 147.28	1 001.49	1 348.24	115.80
<b>Août</b>	1 106.20	<b>886.98</b>	1 343.07	139.96
<b>Septembre</b>	1 200.84	975.60	1 482.97	157.75
<b>Octobre</b>	<b>1 286.28</b>	1 058.43	<b>1 599.73</b>	178.95
<b>Novembre</b>	1 226.77	1 008.83	1 527.05	135.41
<b>Décembre</b>	1 191.65	1 005.62	1 408.07	127.72

Prélèvement mensuel moyen: 1 157 Mm<sup>3</sup>

### 2.2.7 Bilans hydrologiques (synthèse)

#### 2.2.7.1 Lac de Madine

$$P + R = E + i + Q_r + Q_{\text{soutien}} + \text{surverse} + \Delta V$$

P - Pluie connue à Vigneulles (valeurs journalières sur la période 1966-98)

appliquée à une surface moyenne du lac de 920 Ha (superficie moyenne sur la période 1982-97)

R - Ruissellement

estimé par le coefficient d'écoulement déterminé mensuellement à partir de la corrélation « Pluie à Vigneulles - Débit à Onville » hors étiage (mois de décembre à avril) et à partir des profils hydrologiques en étiage (mois de mai à novembre).

E - Evaporation

estimée par application aux valeurs d'ETP (j / 66-98) d'un coefficient décadaire (défini à partir des moyennes 1971-1990 de l'ETP Penman et de l'évaporation à Nancy-Essay);  
appliquée à la surface du lac, estimée par la relation Hauteur/Surface (courbe).

#### i - infiltration

estimée sur des bases pédologiques, par les paramètres du sol et sous-sol: la perméabilité des matériaux recouvrant le fond du lac (argiles fines et limons). Alliée à une hauteur de charge variable, elle situe l'infiltration moyenne à moins de 10 l/s.

Qr - débit réservé connu (?)

pris à 24 l/s, avec les variations saisonnières connues (j / 75-80)

Qsoutien - lâchures connues (j/87-96)

surverse - inconnue (cote du déversoir = 227.89)

$\Delta V$  - variation du volume du lac inconnu

estimé par une fonction polynômiale de la hauteur (une erreur de 1 cm signifie 80 000 mètres cubes), mais la cote n'est relevée qu'une fois par mois environ

#### Ordre de grandeur des éléments du bilan sur le lac de Madine:

<i>en Milliers de m<sup>3</sup>/mois</i>	<b>min</b>	<b>moyenne</b>	<b>max</b>
<b>Apports P</b>	10	680	3 100
<b>Apports R</b>	59	2 987	18 790
<b>Pertes E</b>	26	600	1 760
<b>Pertes Qr + Qsoutien</b>	58	370	1 770

#### Estimation des pertes et apports sur le lac de Madine :

Précipitations : environ 8.000.000 m<sup>3</sup> d'eau (890 mm ou 21900 m<sup>3</sup>/j) précipité sur le plan d'eau ;

Evaporation : environ 7.500.000 m<sup>3</sup> d'eau (835 mm ou 19000 m<sup>3</sup>/j) directement évaporée ;

Surverses : approximativement 12.000.000 m<sup>3</sup> (1335 mm ou 32900 m<sup>3</sup>/j) en année moyenne ;

Infiltration : estimée à 300.000 m<sup>3</sup> sur l'année (33 mm ou 850 m<sup>3</sup>/j)

#### 2.2.7.2 Retenue d'Arnaville et Rupt de Mad

$$Q + P + R = E + AEP + Qr_2 + surverse + \Delta V$$

Q - débit à Onville connu (j/64-97)

P - pluie à Essey connue (j/66-98) appliquée à la surface de la retenue, en moyenne de 20 Ha

R - ruissellement entre Onville et Arnaville, ainsi qu'apports par sources et rejets anthropiques inconnus

E - évaporation inconnue, estimée comme sur le lac de La Madine (sur 20 Ha)

AEP - Prélèvements connus, estimés par application aux données de volumes d'eau traitée (j/97-97) d'un coefficient mensuel (défini par rapport aux moyennes mensuelles 1996 et 1997) pour les pertes.

Qr<sub>2</sub> - débit réservé connu (100 l/s)

surverse - inconnue (jusqu'à 200 l/s environ)

$\Delta V$  - inconnu, pas de courbe hauteur-volume (variation de niveau < 20 cm en pratique)

#### Ordre de grandeur des éléments du bilan sur la retenue d'Arnaville

<i>en Milliers de m<sup>3</sup>/mois</i>	<b>min</b>	<b>moyenne</b>	<b>max</b>
<b>Apports Q</b>	1 400	8 800	52 600
<b>Apports P</b>	0,12	13,7	51,6
<b>Pertes E</b>	0,92	13,4	32,4
<b>Prélèvements</b>	880	1160	1600
<b>Pertes Qr<sub>2</sub></b>		260	

## 3. Phases 2 et 3

### 3.1 Modèle

#### 3.1.1 Modélisation MAGRE

Le modèle présenté repose sur l'utilisation d'un outil d'aide à la décision en matière de gestion et d'aménagement des eaux, développé au sein de BRL Ingénierie: le logiciel MAGRE.

Les fonctionnalités de cet outil sont multiples:

- au niveau du diagnostic (ressources, infrastructures hydrauliques et besoins);
- au niveau de la gestion (optimisation de la gestion de la ressource et des infrastructures, ainsi que sur la décision dans la mise en oeuvre d'une politique de sécurisation);
- au niveau prospectif (outil d'aménagement dynamique).

La modélisation repose sur une représentation systémique intégrant les infrastructures et les ressources hydriques concernées. Un ensemble de modules, représentant les équipements, les confluences ou les interventions anthropiques, est relié par des liens, symbolisant les flux échangés dans le système.

#### 3.1.2 Modélisation adaptée au cas du Rupt de Mad

La représentation du modèle tient compte des interventions humaines et des caractéristiques physiques du système hydraulique que constitue le Rupt-de-Mad.

##### 3.1.2.1 Type de modélisation

L'utilisation d'une modélisation hybride, de type « boîte noire », avec des apports du Rupt de Mad générés par un comportement reproductible, permet d'intégrer l'ensemble des pertes et apports diffus sans qu'il soit nécessaire d'en connaître, ni la localisation, ni l'importance. Ce principe autorise une bonne représentation du fonctionnement du système hydraulique sur les points clés (Lac de Madine, retenue d'Arnaville, station de jaugeage d'Onville), véritables sujets de l'étude.

C'est en ce sens qu'a été retenue cette dernière solution, après comparaison des résultats et des limites imposées par les différents types de modélisation (modélisations descriptive ou type « boîte noire »).

##### 3.1.2.2 Représentation du système

Les apports naturels (ruissellement et sources) constituent les entrées du système sur les cours d'eau de la Madine et du Rupt de Mad. Les sorties sont, quant à elles, identifiées comme les pompages (AEP Metz), les pertes par infiltration et par évaporation, ainsi que la confluence du Rupt de Mad avec la Moselle (borne du système hydraulique).

Les liens unissant ces modules symbolisent le cheminement de l'eau, sous toutes ses formes: conduite, canal, rivière, flux d'évaporation.

Le système hydraulique du Rupt de Mad avec ses ouvrages est représenté dans le modèle comme un ensemble de 16 nœuds (modules) et 2 types de connections (liens).

Dans le détail (voir schéma ci-joint):

5 modules symbolisent les apports dans le système hydraulique :

- apports par ruissellements et écoulements divers ;
- apports directs par précipitation sur les plans d'eau ;

3 modules symbolisent les pertes:

- prélèvements sur retenue d'eau;
- prélèvements naturels par évaporation sur lac et plan d'eau;

- 2 modules représentent le besoin de débit réservé sur les cours d'eau ;
- 2 modules caractérisent les plans d'eau (gestion d'un stock d'eau en aval d'un barrage) ;
- 2 modules de jonction permettent la connexion de flux et autorisent tout bilan intermédiaire ;
- 2 modules marquent les limites du système (bornes de sorties);
- 1 jonction (bleue) représente les flux d'eau à surface libre (eau liquide) ;
- 1 jonction (verte) souligne les flux d'eau en canalisation ou évaporés.

Il est possible de connaître en chaque nœud (module) les flux transités (en entrée et en sortie) et de connaître les pénuries (défaillances) ou pleine satisfaction des besoins exprimés ou calculés. Le comportement des ouvrages (niveau des plans d'eau, volumes) est également connu à travers ces informations en cours ou après simulation.

Des résultats sous forme graphique ou sous forme de tableaux autorisent la consultation des informations et leur comparaison.

### 3.1.2.3 *Eléments du modèle*

Les différents modules (nœuds) décrivent les interventions sur le bilan hydrique du système:

#### 3.1.2.3.1 Les apports

Plusieurs modules descriptifs des apports naturels sont identifiés, par leur type, leur localisation ou leurs caractéristiques locales:

- les apports par les écoulements sur le haut bassin versant de la Madine, participant à l'alimentation du lac;
- les apports naturels issus
  - des écoulements alimentant la rivière Madine sur la partie aval du barrage;
  - des écoulements du haut bassin versant du Rupt de Mad, jusqu'à la confluence avec la Madine;
  - des apports par ruissellement sur la partie basse de ce même bassin versant depuis cette dernière jonction et jusqu'à la retenue d'Arnaville (Onville);
- les apports par des sources (et rejets anthropiques) intervenant sur le Rupt de Mad (Onville à Arnaville);
- les apports directs par les précipitations sur les plans d'eau (essentiels sur Madine, moindres à Arnaville).

#### 3.1.2.3.2 Les "sorties"

Les modules décrivant les pertes du système soulignent à la fois les prises d'eau et les pertes naturelles:

- l'évaporation sur les plans d'eau (essentiels sur Madine, moindres à Arnaville);
- la prise pour production d'eau potable sur le plan d'eau d'Arnaville.

#### 3.1.2.3.3 Les limites

Le système est limité en amont par les apports naturels, tandis qu'à l'aval il prend fin avec la confluence avec la Moselle et l'adduction d'eau pour la ville de Metz:

- la confluence Moselle marque la fin du système (Rupt de Mad);
- le flux extrait du Rupt de Mad pour production d'eau potable limite les pertes sèches du système.

#### 3.1.2.3.4 Les liens

Les relations entre les modules traduisent les flux échangés. Parmi ces liens s'immiscent:

- le débit réservé 1, en sortie du lac de Madine, qui traduit le flux régulier imposé en sortie de l'ouvrage;
- le débit réservé 2, en sortie du plan d'eau d'Arnaville, qui souligne celui imposé à l'aval de la retenue.

### **3.1.3 Initialisation et Calage du modèle**

Le modèle s'alimente à partir des données disponibles et des paramètres définis pour représenter et reproduire au mieux les phénomènes intervenant dans le bilan. Tous les tests de calage et la base des simulations reposent sur une situation moyenne connue ou fixée par les contraintes et connaissances actuelles sur le système réel et sa gestion.

La phase d'initialisation ayant permis d'apprécier le poids des différents paramètres et la sensibilité du modèle, il a été établi une représentation et un fonctionnement donnés (bien que facilement modulables).

Le calage du modèle repose sur une situation moyenne couvrant la période 1983 à 1997, donc en phase d'exploitation des retenues de la Madine et d'Arnaville. En raison du mode de gestion actuel du stock d'eau de la Madine, ce calage s'est appuyé sur les lâchures historiques depuis le lac de Madine pour caractériser l'écoulement du Rupt de Mad à Onville et les volumes d'eau transitant à Arnaville.

La simulation du système hydraulique du Rupt de Mad permet une gestion « en offre » et « en demande », dans laquelle, le lac de Madine est

- soit destocké par des lâchers définis (mode offre) pour évaluer les disponibilités en eau à l'aval par rapport au volumes lâchés;
- sollicité par une demande depuis l'aval (mode demande), lorsque le niveau d'eau se révèle insuffisant sur la retenue d'Arnaville.

En raison de la fréquence des observations et des possibles erreurs liées à l'insuffisance ou à la précision des mesures, la simulation au pas de temps mensuel est à l'heure actuelle l'alternative la plus adaptée. Néanmoins la plus grande partie des opérations de simulation s'opère au pas de temps journalier, ce qui autorise ponctuellement des analyses plus fines en simulation.

## **3.2 Simulations**

### **3.2.1 Références de l'état initial**

Les contextes définis pour les simulations sont les suivants :

#### **3.2.1.1 Contextes climatologiques**

- situation moyenne caractérisant la chronique des 15 dernières années d'observation (1983-97) ;
- séquence caractérisant une situation de sécheresse « grave » : S5, S5, N, H5, S10, S5, N (en simulation il s'agit de la série des années 1996, 1996, 1990, 1986, 1985, 1996 et 1990) ;

#### **3.2.1.2 Hydrologie**

Les flux d'eau gérés par intervention humaine sont jugés comme relativement constants dans les simulations : ils reposent sur :

- les valeurs moyennes des 3 dernières années de prélèvement en eau brute (retenue d'Arnaville) ;
- les débits réservés actuels (théorique ou défini par défaut) pour la Madine et le Rupt de Mad.

L'hydraulicité du Rupt de Mad est celle établie sur les 15 dernières années (1983-1997).

La retenue du lac de Madine est supposée pleine au départ.

### **3.2.2 Scenarii de simulation**

Différents cas de simulation sont destinés à quantifier les disponibilités en eau et/ou les pénuries accusées dans le cas d'un volume de destockage maximum (droit d'eau) sur le Lac de Madine ou dans le cas d'une augmentation des prélèvements pour satisfaire de nouveaux besoins en eau potable.

Les contextes climatologiques sont ceux exprimés par, d'une part les observations historiques, d'autre part un cas de sécheresse grave pouvant exposer le système à de plus grandes pénuries d'eau.

### **3.2.2.1 Destockage maximum**

L'objectif est ici de tester différents volumes de prélèvement à Arnaville pour atteindre un plafond annuel de 10 Millions de mètres cubes lâchés à la Madine (droit d'eau). La simulation vise à quantifier les disponibilités supplémentaires en eau potable que cette limite autorise, dans le cadre des contextes climatologiques définis.

Dans le cas présent, les volumes prélevés sont calculés en proportion des volumes moyens actuellement prélevés pour atteindre un total de 10 Millions de mètres cubes d'eau destockés en demande à la Madine. Il s'agit d'une gestion du système en « offre ».

### **3.2.2.2 Besoins supplémentaires**

L'objectif est ici de tester la faisabilité d'un prélèvement supplémentaire de 22000 m<sup>3</sup>/j pour le bassin ferrifère entre juillet et novembre et de 15000 m<sup>3</sup>/j (en plus) pour les besoins de la Ville de Metz en permanence pour la satisfaction de la totalité des besoins.

Aucune limitation à 10 Mm<sup>3</sup> annuels n'est imposée dans ce cas et la simulation permet d'observer le comportement du plan d'eau à cette sollicitation.

### **3.2.2.3 Automatisation de processus**

Comparaison de consommation entre la gestion manuelle actuelle et gestion automatisée des ouvrages. Les simulations au pas de temps mensuel doivent permettre d'infirmer ou d'améliorer le mode de gestion des lâchés depuis la Madine en fonction des niveaux d'eau observés en aval, sur la retenue d'Arnaville.

Dans l'état actuel des simulations et par rapport au pas de temps simulé (mois), il n'apparaît pas d'amélioration sensible en gestion automatisé de l'ouvrage par rapport à la gestion manuelle actuelle.

## **3.2.3 Résultats de simulation**

### **3.2.3.1 Destockage de 10 Mm<sup>3</sup> (mode offre)**

#### **3.2.3.1.1 sur chronologie réelle (1983-97)**

Apports naturels du bassin versant de la Madine à la retenue (1) :

- minimum : 9.136 Mm<sup>3</sup> (1996)
- maximum : 21.821 Mm<sup>3</sup> (1995)
- moyenne : 15.643 Mm<sup>3</sup>

Pluies sur lac de Madine : 6.324 Mm<sup>3</sup> à 10.383 Mm<sup>3</sup> (moyenne = 8.390 Mm<sup>3</sup>)

Evaporation sur lac de Madine : 6.498 Mm<sup>3</sup> à 8.090 Mm<sup>3</sup> (moyenne = 7.319 Mm<sup>3</sup>)

Apports naturels du bassin versant du Rupt de Mad (« Boîte noire », apports hors BV Lac de Madine (1))

- minimum : 48.613 Mm<sup>3</sup> (1996)
- maximum : 167.878 Mm<sup>3</sup> (1983)
- moyenne : 99.271 Mm<sup>3</sup>

Apports naturels totaux à Onville:

- minimum : 64.394 Mm<sup>3</sup> (1996)
- maximum : 195.609 Mm<sup>3</sup> (1983)
- moyenne : 117.455 Mm<sup>3</sup>

Pluies sur retenue d'Arnaville : 0.121 Mm3 à 0.201 Mm3 (moyenne = 0.165 Mm3)  
Evaporation sur retenue d'Arnaville : 0.152 Mm3 à 0.170 Mm3 (moyenne = 0.159 Mm3)  
Demande exprimée à Arnaville : 12.256 Mm3 à 15.445 Mm3 (moyenne = 13.887 Mm3)

#### **Selon l'application des lâchers :**

*Simulation avec destockage sur l'année sans contrainte de niveau sur lac de Madine : **CHRONO B***

Volumes écrêtés à Arnaville : 49.398 Mm3 à 180.929 Mm3 (moyenne = 10.287 Mm3)

*Simulation avec destockage de mai à novembre sans contrainte de niveau sur lac de Madine : **SIM A1***

Volumes écrêtés à Arnaville : 37.148 Mm3 à 166.661 Mm3 (moyenne = 89.112 Mm3)

*Simulation avec destockage de mai à novembre avec contrainte de niveau sur lac de Madine : **SIM B1***

Volumes écrêtés à Arnaville : 37.148 Mm3 à 166.661 Mm3 (moyenne = 89.112 Mm3)

### **3.2.3.2 Demandes supplémentaires en eau (mode demande)**

#### **3.2.3.2.1 Sur chronologie historique (1983-97)**

Simulations CHRONO3 (sans contrainte) et CHRONO4 (avec contrainte de niveau sur lac de Madine)

#### **3.2.3.2.2 sur séquence sèche**

Simulations A2 (sans contrainte) et B2 (avec contrainte de niveau sur lac de Madine)

Apports naturels du bassin versant de la Madine à la retenue (1) :

- minimum : 11.776 Mm3
- maximum : 18.692 Mm3
- moyenne : 14.032 Mm3

Pluies sur lac de Madine : 6.443 Mm3 à 9.547 Mm3 (moyenne = 7.937 Mm3)

Evaporation sur lac de Madine : 6.852 Mm3 à 7.322 Mm3 (moyenne = 7.104 Mm3)

Apports naturels du bassin versant du Rupt de Mad (« Boîte noire », apports hors BV Lac de Madine (1))

- minimum : 55.066 Mm3
- maximum : 127.850 Mm3
- moyenne : 74.424 Mm3

Apports naturels totaux à Onville: 69.262 Mm3 à 143.232 Mm3 (moyenne = 86.677 Mm3)

Pluies sur retenue d'Arnaville : 0.136 Mm3 à 0.201 Mm3 (moyenne = 0.158 Mm3)

Evaporation sur retenue d'Arnaville : 0.151 Mm3 à 0.159 Mm3 (moyenne = 0.154 Mm3)

Demande exprimée à Arnaville : 22.928 sur l'année

Volumes écrêtés à Arnaville : 45.535 Mm3 à 119.563 Mm3 (moyenne : 62.965 Mm3)

### **3.2.4 Déficiets et problèmes en présence**

Les pénuries d'eau à Arnaville représente le manque d'eau imposé par le faible niveau de la retenue, cette dernière ne pouvant être gérée comme un stock important. Un niveau minimum impose donc un éventuel arrêt des pompages, traduit dans les simulations comme une pénurie par rapport au besoin réel exprimé.

Dans les simulations entreprises, ces pénuries apparaissent avec les contraintes imposées à la Madine, soit d'un volume destocké maximum, soit d'une limite inférieure du niveau du lac à ne point dépasser.

Les résultats permettent d'observer des pénuries oscillant entre 0 et 1,8 Mm<sup>3</sup>/mois, avec des pénuries annuelles maximales de 3,1 Mm<sup>3</sup> (soit 8478 m<sup>3</sup> par jour).

Les mois d'étiage sont les plus touchés, notamment août et surtout septembre (car contemporains des contraintes imposées à la Madine en simulation).

Les graphes en Annexe permettent d'avoir une idée de la répartition de ces pénuries dans le temps et leur importance : simulations B1 (série chronologique de « sécheresse » hypothétique) et B2 (séquence historique avec nouvelles conditions de prélèvements supplémentaires) en particulier.

### 3.2.5 Mesures compensatoires

#### 3.2.5.1 Pompage dans la Meuse

Le cas d'un pompage dans la proche Meuse est une alternative à la satisfaction d'une double contrainte :

- suppléer au manque d'eau du lac de Madine en cas de sollicitation importante;
- utiliser une eau brute de qualité suffisante pour son traitement de potabilisation en aval.

La Meuse est distante de quelques kilomètres à peine du lac de Madine et sa qualité est comparativement supérieure à celle de la Moselle, pourtant plus proche du lieu de traitement pour l'AEP de Metz.

Deux solutions techniques s'offrent à cette alternative de pompage dans la Meuse :

- 1- un prélèvement au plus proche du lac de Madine, puis une remontée des eaux jusqu'à un point haut (pompage et stockage) et un cheminement gravitaire de l'eau jusqu'au plan d'eau (en fonction de la géographie et topographie locales);
- 2- un prélèvement au plus proche du lac et un cheminement des eaux au plus direct sous faible pression, grâce à des accélérateurs le long du tracé.

La solution 1 nécessite un investissement initial plus lourd et des coûts de fonctionnement (essentiellement énergétiques) plus faibles, tandis que la seconde solution permet un faible investissement initial mais un fonctionnement plus coûteux. Le coût initial est essentiellement lié à la longueur de conduites, de loin le poste le plus important.

Le lieu de prélèvement d'eau est identique pour les deux solutions : il se situerait immédiatement en amont de la commune de St Mihiel (distante d'un douzaine de kms à l'est), en rive gauche de la Meuse, en un lieu où topographie et berges se prêtent à l'implantation d'une prise d'eau en rivière (stabilité, accès, etc.).

Le facteur initial du dimensionnement (et donc du coût) des projets est le débit de transit nécessaire. Avec une augmentation prévisible des prélèvements, les simulations entreprises laissent apparaître des déficits en eau maximaux à Arnaville de :

2 322 741 m<sup>3</sup>/an sur la base d'une séquence hypothétique « sèche » (SIM B2),  
soit 6.364 m<sup>3</sup>/j en moyenne sur l'année,  
avec une pénurie maximale de 1 740 990 m<sup>3</sup> au mois d'août ;

et 3 094 333 m<sup>3</sup>/an sur la base d'une série chronologique historique (SIM B1)  
soit 84778 m<sup>3</sup>/j en moyenne sur l'année,  
avec une pénurie maximale de 1 842 111 m<sup>3</sup> au mois de septembre 1991 ;

Le dimensionnement des conduites repose donc sur un débit maximal d'eau transitée de 61400 m<sup>3</sup>/j (09/91), soit 711 litres par seconde. Une conduite de diamètre minimal 600 mm s'impose pour un tel débit, et une conduite de diamètre 700 mm permettrait un débit plus « confortable » de 800 l/s,

Dans le détail des coûts estimatifs pour une telle configuration :

Conduite acier 700 mm sur 15 kms (posée) :	65 MF (cas 1)
ou 12 kms (posée) :	52 MF + accélérateurs : 6 MF (cas 2)
Station de pompage :	6 MF
Prise d'eau :	1 MF

Réservoir de régulation :	1 MF
Coûts de fonctionnement :	environ 0,8 MF/an (cas 1) ou supérieurs à 1 MF (cas 2)

On peut donc estimer le coût global d'un tel projet à plus de 70 MF, auquel il convient d'ajouter environ 7 MF en étude.

Pour optimiser cet investissement à but unique, il peut être envisagée une utilisation supplémentaire de la conduite d'amenée pour la desserte des communes rurales traversées.

L'hypothèse décrite ci-avant repose sur la nécessité d'un débit de pointe maximal, qui impose un gros diamètre de conduite pour une utilisation saisonnière de ce système. Il est pourtant possible d'envisager l'utilisation d'une conduite de diamètre inférieur avec un flux d'eau plus régulier sur l'année : un débit régulé sur la saison d'étiage pour apporter la même quantité d'eau sur l'année (env. 200 l/s de juin à novembre) permet d'utiliser une conduite de diamètre 500 mm, abaissant le coût final de 25 MF environ (40 MF au lieu de 65 MF).

Sur le même principe, un couplage de cette amenée d'eau avec un réservoir (d'une capacité inférieure à 2 Mm<sup>3</sup>) permettrait de répartir au mieux et de réguler de plus faibles débits en continu sur l'année : un débit constant de 100 l/s constituerait alors l'appoint nécessaire à gérer au niveau de ce réservoir intermédiaire.

### Problèmes techniques

Outre la difficulté du tracé (pente contraire et constante) se pose le problème du débit qu'il est possible de soustraire à la Meuse au lieu de prélèvement. Ce droit d'eau, volume d'eau qu'il est possible de soustraire à la rivière, est en effet très faible au regard du besoin exprimé :

Besoin de pompage : entre 200 l/s (flux continu 6 mois de l'année) et 700 l/s (1 mois de pointe) ;

Débit de la Meuse à St Mihiel: Module : 29,5 m<sup>3</sup>/s et un débit moyen d'étiage de 3560 l/s ;

L'observation de ces faibles débits indique, sans autre critique, la quasi-impossibilité de prélever les débits nécessaires pour rester en deçà d'une valeur de 350 l/s (limite admissible représentant 10% du débit d'étiage moyen). La faisabilité d'une telle solution reste également attachée au prélèvement réel (inférieur à la limite ici définie) fixé après consultation des différentes parties concernées par ce projet.

### **3.2.5.2 Surélévation du plan d'eau de la Madine**

La surélévation du lac de Madine (cote de la surverse et non les digues) peut être une solution astucieuse pour accroître le stock d'eau disponible et donc pallier les manques d'eau temporaires. Techniquement, cette solution impose de vérifier la bonne tenue des digues ou leur éventuelle élévation devant l'augmentation de la charge d'eau, mais une légère surélévation permet d'atteindre un surplus de l'ordre de 4 millions de mètres cubes pour 20 cm (et 8 Mm<sup>3</sup> pour 40 cm).

Deux simulations ont été effectuées pour en vérifier les résultats :

Une hausse du niveau de surverse permet d'atténuer les pénuries et leur fréquence. Une hausse de 20 cm fait tomber ces pénuries de 2,3 Mm<sup>3</sup> à 0,5 Mm<sup>3</sup> par an (mois de septembre), tandis qu'une hausse de 40 cm les fait disparaître sur la même période.

De plus, les volumes écrêtés à Arnville baissent légèrement (signe d'une sensible amélioration de l'usage de l'eau), passant de 62.965 Mm<sup>3</sup> en moyenne sur l'année (cf. 3.2.3.2.1) à 62.777 Mm<sup>3</sup>.

Cette hypothèse reste suspendue à l'analyse technique de faisabilité de la rehausse et ses incidences sur le milieu mais apporte cependant une solution a priori « accessible » et économiquement plus intéressante qu'une amenée d'eau depuis la Meuse.

## **4. Annexes**