



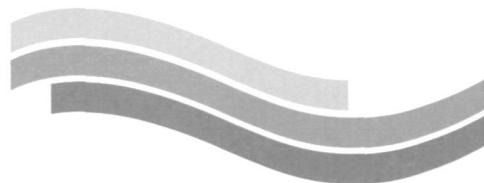
22948 RM



- 1

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

Rapport technique final



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 TECHNIQUE FINAL

1. OBJET DE LA PRÉSENTE NOTE	4
1.1 Démarche entreprise	4
1.2 Chronologie des opérations	4
2. PHASE 1	5
2.1 Liste des documents recensés	5
2.1.1 Données numériques de base	5
2.1.2 Ouvrages rassemblés	6
2.1.3 Documents cartographiques	7
2.2 Informations extraites pour l'étude	7
2.2.1 Caractéristiques naturelles de la zone d'étude	7
2.2.1.1 le bassin versant	7
2.2.1.2 les plans d'eau	8
2.2.2 Climatologie	8
2.2.3 Débits	8
2.2.4 Prélèvements	9
2.2.5 Stocks d'eau	9
2.3 Données hydrologiques	9
2.3.1 Paramètres descriptifs du fonctionnement du système	9
2.3.1.1 Pluviométrie	9
2.3.1.2 Débits	10
2.3.1.2.1 Débits réservés	10
2.3.1.2.2 Temps de transferts	11
2.3.1.2.3 Campagnes de jaugeages	11
2.3.1.2.4 Débits à Onville	11
2.3.1.3 Prélèvements	12
2.3.1.3.1 Prélèvements à Arnaville	12
2.3.1.3.2 Pertes dans le système	14
2.3.1.4 Lâchures de barrage	14
2.3.1.5 Volumes stockés (Lac de Madine)	14
2.3.1.5.1 variations du stock	15
2.3.1.5.2 pertes par fuites et infiltration	15
2.3.1.5.3 Evaporation	15
2.3.2 Reconstitution des données manquantes	16
2.3.2.1 Sorties de la retenue de la Madine	16
2.3.2.1.1 Lâchures	16
2.3.2.1.2 Evaporation	16
2.3.2.2 Entrées	16

2.3.2.2.1	sur la retenue de la Madine	16
2.3.2.2.2	sur le Rupt de Mad	17
2.3.2.3	Sorties de la retenue d'Arnaville	17
2.3.3	Apports et éléments perturbateurs	17
2.3.3.1	Sources	17
2.3.3.2	Rejets anthropiques	17
2.3.3.3	Autres	18
2.4	Relations Pluie/Débits sur le bassin versant	18
2.4.1	Relations saisonnières	18
2.4.2	Coefficients d'écoulement	19
2.4.3	Récapitulatif	21
2.5	Bilans	21
2.5.1	Lac de Madine	21
2.5.2	Retenue d'Arnaville et Rupt de Mad	22
2.5.3	Pertes et Apports entre lac de la Madine et retenue d'Arnaville	23
3.	PHASES 2 ET 3	24
3.1	Modèle	24
3.1.1	Modélisation MAGRE	24
3.1.2	Modélisation adaptée au cas du Rupt de Mad	24
3.1.2.1	Type de modélisation	24
3.1.3	Représentation du système	25
3.1.4	Initialisation	25
3.1.4.1	Paramètres	25
3.1.4.2	Éléments du modèle	25
3.1.4.2.1	Les apports	25
3.1.4.2.2	Les "sorties"	26
3.1.4.2.3	Les limites	26
3.1.4.2.4	Les liens	26
3.1.5	Initialisation et Calage du modèle	26
3.2	Simulations	27
3.2.1	Références de l'état initial	27
3.2.1.1	Contextes climatologiques	27
3.2.1.2	Hydrologie	27
3.2.2	Scenarii de simulation	28
3.2.2.1	Destockage maximum	28
3.2.2.2	Besoins supplémentaires	28
3.2.2.3	Automatisation de processus	28
3.2.3	Résultats de simulation	29
3.2.3.1	Destockage de 10 Mm ³ (mode offre)	29
3.2.3.1.1	sur chronologie réelle (1983-97)	29
3.2.3.2	Demandes supplémentaires en eau (mode demande)	29
3.2.3.2.1	Sur chronologie historique (1983-97)	29
3.2.3.2.2	sur séquence sèche	30
3.2.3.3	Synthèse des simulations avec demandes supplémentaires en eau	30
3.2.4	Déficits et problèmes en présence	30
3.2.5	Mesures compensatoires	31
3.2.5.1	Pompage dans la Meuse	31
3.2.5.2	Surélévation du plan d'eau de la Madine	32
3.2.5.3	Autres propositions	32
4.	ANNEXES	33

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, pour notamment faire face à l'accroissement des besoins en eau.

Le présent rapport s'attache à décrire les différentes étapes de l'étude et les solutions techniques retenues pour la bonne représentation et simulation de ce système hydraulique.

Trois phases principales soulignent le travail effectué, à savoir :

* 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;
- simulations.

* phase 3 (analyse et exploitation des résultats)

- affinement des choix de scénarii (options, contraintes, etc.);
- exploitation des résultats de simulations;
- mesures compensatoires.

La phase 1 représente la collecte et l'analyse des données existantes ainsi que la reconstitution des données manquantes et/ou erronées. Ces recueil, traitement et synthèse des informations constituent la base du calage du modèle hydrologique, construit en seconde phase de l'étude.

Cette phase 2 consiste en la recherche de la meilleure adéquation du modèle à la réalité (représentativité et validité des opérations) avant l'utilisation du modèle pour des simulations descriptives et des bilans sur le système hydraulique.

La dernière phase représente l'exploitation du modèle et des résultats de simulation suivant des scénarii prédéterminés, sélectionnés en fonction des situations réelles ou des évolutions possibles dans le système hydraulique. Des solutions compensatoires sont également envisagées et évaluées pour solutionner les bilans déficitaires soulignés par les simulations.

Ce rapport final reprend et complète des éléments décrits dans un précédent rapport intermédiaire et présente les résultats des simulations ainsi que leur analyse et exploitation.

1.2 Chronologie des opérations

Le recueil des données intéressant la présente étude s'est échelonné sur 4 semaines, à partir d'informations provenant de diverses sources. La totalité des données réellement exploitables n'a été réunie qu'à partir de la mi-Août 1998. Plusieurs informations complémentaires, ainsi que des correctifs à des erreurs constatées, ont été apportées jusqu'à mois d'Octobre 1998.

Le dépouillement, le tri et l'analyse des informations disponibles a constitué l'essentiel de la première phase d'étude. La phase de modélisation proprement dite s'est mise en place parallèlement à la fin de cette analyse et reconstitution de données. La critique des données a en effet souligné assez tôt certaines incidences et ordres de grandeur sur plusieurs composants hydrologiques nécessaires à l'initialisation du modèle.

La phase 2 a permis de dégager en première approximation des bilans initiaux utilisés comme base à quelques modifications du modèle (calage et initialisation). Sa représentativité étant jugée satisfaisante, les simulations ont été utilisées pour préciser les scénarii et apporter des propositions de gestion (résolution de conflits d'usage).

Ces différentes étapes ont fait l'objet de 4 réunions techniques (à la fréquence d'environ une par mois) destinées au contrôle de l'avancement de l'étude et à discussion des choix et options retenues pour le modèle et ses résultats.

2. Phase 1

2.1 Liste des documents recensés

2.1.1 Données numériques de base

fichier < **DONNEES.XLS** > (origine: DIREN Lorraine 15/07/98, issus de La Mosellane des Eaux) :

- prélèvements en eau mensuels de la ville de Metz (période 01/84-09/97) dont Q réservés;
- graphe des hauteurs et volumes d'eau du lac de La Madine (01/82-09-97);
- valeurs sur hauteurs, volumes et déficits en eau sur le lac de La Madine (01/82-09-97);

fichier < **ONVILQMJ.XLS** > (origine: DIREN Lorraine 15/07/98) :

- débits moyens journaliers du Rupt de Mad à Onville (période 08/64-12/97);

fichier < **ONVILCT.XLS** > (origine: DIREN Lorraine 15/07/98) :

- courbes de tarage pour débits du Rupt de Mad à la station d'Onville;

fichier < **ONVIL981.XLS** > (origine: DIREN Lorraine 20/08/98) :

- débits moyens journaliers, non validés, du Rupt de Mad à Onville (période 01/98-06/98);

fichier < **CLASS3.XLS** > (origine: Mosellane via Agence RM 12/08/98) :

- volumes d'eau traités à l'usine AEP < prélèvements à Arnaville (période 01/87-12/97);

fichier < **MADINE.XLS** > (origine: Mosellane via Agence RM 12/08/98) :

- volumes lâchés à La Madine pour soutien d'Arnaville (période 01/87-12/97);

fichier < **VIGNEULL.XLS et VIGNEULL.PJR** > (origine: Météo-France 04/08/98) :

- pluviométrie journalière sur BV La Madine (période 06/66-07/98);

fichier < **ESSEY.XLS et ESSEY.PJR** > (origine: Météo-France 04/08/98) :

- pluviométrie journalière sur BV Rupt de Mad (période 07/66-12/97);

fichier < **BRLETPD.DRA et BRLETPD.XLS** > (origine: Météo-France 12/08/98 et 26/08/98) :

- ETP décadaire à Metz, BV Madine+Rupt de Mad (période 01/66-12/97);
- évaporations moyennes décadaires à Nancy-Essay (établies sur la période 1971-1990).

autres disponibles :

fichiers du **catalogue des débits caractéristiques des cours d'eau du Bassin Rhin Meuse** (BRLi 09/96)

- **CATALOG3.XLS et CATALOG5.XLS** : données brutes, Q caract. et spécifiques, modules de calcul
- **CATALOT3.XLS et CATALOT5.XLS** : fichiers définitifs des débits en m³/s (juillet 1997)

2.1.2 Ouvrages rassemblés

Une recherche bibliographique a permis de réunir un ensemble d'ouvrages susceptibles d'apporter des informations dans le cas de la présente étude.

Voici la liste des travaux ayant pu être consultés:

<p><i>Etude hydrologique de l'influence du Lac de la Madine sur le débit du Rupt de Mad.</i> (INP Lorraine - E.N.S. Géologie appliquée - SAFEGE, 1982) - copie de la DDAF [reçu 21/07/98]</p>
<p><i>Rupt-de-Mad (Meurthe et Moselle): Contrat de rivière 1997-2001</i> Document de l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse - PRET Agence RM n°21787 [reçu le 04/08/98]</p>
<p><i>Etude complémentaire pour le soutien du débit d'étiage sur le haut bassin versant du Rupt-de-Mad</i> (C.Chaput, rapport de stage ENSEEIHT pour le Parc naturel régional de Lorraine, 1997) PRET de la DIREN Lorraine [reçu 20/07/98]</p>
<p><i>Etude du fonctionnement du barrage d'Arnaville et du tronçon de rivière en aval du barrage.</i> (SAFEGE, Mars 1997) - PRET de la DIREN Lorraine [reçu 20/07/98]</p>
<p><i>Schéma d'aménagement et de Gestion des Milieux Naturels aquatiques du BV du Rupt de Mad</i> (AQUASCOP, oct. 1992 / Août 1993 / Juillet 1994) 5 vols. PRET de DIREN L [reçus le 27/07/98] et 1 volume - 16976.1 RM - PRET de l'Agence RM [reçu le 04/08/98]</p>
<p><i>Le Rupt-de-Mad et son Bassin Versant (Bilan de 15 années d'observations)</i> (S.R.A.E.Lorraine n°242 - INPL - ENS Géol. appl. Nancy, 1980 ?) PRET de la DIREN Lorraine Documentation [reçu 03/08/98]</p>
<p><i>Schéma d'aménagement des Eaux du Bassin du Rupt de Mad</i> (S.R.A.E.Lorraine n°1509 - Parc Naturel Régional de Lorraine - Ministère de l'Agriculture, 1982) PRET de la DIREN Lorraine Documentation [reçu 03/08/98]</p>
<p><i>Etude préalable à l'Aménagement des Hauts Bassins Versants de l'YRON et du RUPT de MAD</i> (S.R.A.E.Lorraine, pochette n° 1510 - Ministères de l'Agriculture et de l'environnement, 1985) PRET de la DIREN Lorraine Documentation [reçu 03/08/98]</p>
<p><i>Etude paysagère du Bassin Versant du Rupt de Mad. proposition d'actions</i> (Architecture Design Paysage - Parc Naturel de Lorraine, juillet 1994) PRET de l'Agence Rhin-Meuse n°18082 [reçu le 04/08/98]</p>
<p><i>Etude sur la vulnérabilité de l'AEP de la Ville de Metz (Rupt de Mad) Rapport final.</i> (SETUDE, octobre 1991) 4 vols. - PRET de l'Agence Rhin-Meuse n°17220-1/4 [reçu le 04/08/98]</p>
<p><i>extraits de l'Etude hydrologique sur le ruisseau des Aulnes (étang de Girondel).</i> (J. Morhain, S.E.M.A., nov. 1992) copie de l'Agence Rhin-Meuse [reçu le 16/07/98]</p>
<p><i>Barrage d'Arnaville : Equipements mécaniques – Fournitures E.M.H.</i> Ville de Metz - Société d'Equipement du Bassin Lorrain SEBL, 9 p. [reçu le 15/09/98]</p>
<p><i>Alimentation en eau de la Ville de Metz à partir du Rupt de Mad</i> Enquête hydraulique (mémoire technique), Ville de Metz - SEBL, Nov. 1966, 38 p. [reçu le 22/09/98]</p>

2.1.3 Documents cartographiques

Carte	Intitulé	échelle
carte topographique IGN 3313 Ouest	CHAMBLEY-BUSSIÈRES	1/25000e
carte topographique IGN 3313 Est	ARS-sur-MOSELLE	1/25000e
carte topographique IGN 3314 Ouest	THIAUCOURT-REGNIEVILLE	1/25000e
carte topographique IGN 3213 Est	VIGNEULLES-lès-Hattonchatel	1/25000e
carte topographique IGN 3214 Est	APREMONT / Lac de la Madine	1/25000e
carte géologique BRGM	n°163 (CHAMBLEY)	1/50000e

2.2 Informations extraites pour l'étude

La bibliographie existante et les résultats des travaux disponibles ont permis de vérifier la cohérence des mesures et des faits avancés. La comparaison de données issues de mêmes sources a parfois fait apparaître quelques incohérences et erreurs de transcription (confusion d'unités, même désignation d'informations pourtant distinctes, etc.).

D'autre part, ces travaux permettent de dégager les possibilités d'erreurs ou manque d'informations sur de nombreux points du système: évocation de travaux d'aménagement sur la période d'étude, mention de rejets et sources avec des débits non quantifiés, imprécision sur de possibles points noirs et sources d'erreurs.

Après analyse, les informations retenues pour l'étude sont les suivantes:

2.2.1 Caractéristiques naturelles de la zone d'étude

2.2.1.1 le bassin versant

La zone d'étude appartient au bassin de la Moselle. L'identification du bassin du Rupt de Mad s'établit de sa source à sa confluence avec la Moselle.

L'ensemble du bassin versant couvert par le Rupt de Mad totalise 384,8 km², depuis sa limite amont jusqu'à la Moselle. Le bassin versant de la Madine (confluent au PKH 974.53) totalise pour sa part 107,1 km².

Selon la codification de l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse, les secteurs concernés reprennent les codes de zones géographiques A730 à A735.

Codification et localisation des points caractéristiques du bassin versant du Rupt de Mad:

Code bassin	P.K.	Identification du point	Surface du B.V. (km ²)
Rupt de Mad			
A730	959.55	Le Rupt de Mad à l'aval du confluent du ruisseau de Ranaux (limite des zones A 730 et A 731).	103.40
A731	974.53	Le Rupt de Mad à l'amont du confluent de la Madine (limite des zones A 731, A 734 et A 733).	153.00
A734	974.53	Le Rupt de Mad à l'aval du confluent de la Madine (limite des zones A 734, A 731 et A 733).	260.10
A734	990.60	Le Rupt de Mad à l'aval du confluent du ruisseau du Soiron (limite des zones A 734 et A 735).	358.80
A735	993.04	Le Rupt de Mad à la station d'Onville.	371.50
A735	999.99	Le Rupt de Mad à l'amont du confluent de la Moselle (limite des zones A 734, A 740 et A 722).	384.80

la Madine			
A732	992.35	La Madine, de sa source au Burnenaux	60.50
A733	999.99	La Madine, entre le Burnenaux et le Rupt de Mad	107.10

2.2.1.2 les plans d'eau

Le plan d'eau de Madine:

- mis en place en 1972, avec une superficie de 450 hectares et un volume utile de stockage de 10 millions de mètres cubes (5-14) à la cote NGF 224,50.
- surélevé sur la période 1974-78, pour 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). Travaux d'enrochement (ayant nécessité un abaissement du plan d'eau inférieur au mètre) en deux phases: 1986 et 1990;
- exutoire d'un bassin versant de 45 km² (48,74 km² en sortie du lac).

La retenue d'Arnaville:

- superficie maximale de 25 ha et volume utile de stockage de 335000 mètres cubes, évacuateur à 180.55 m NGF (son rôle est essentiellement celui d'un bassin de décantation sur le Rupt de Mad) ;
- marnage faible, en pratique inférieur à 20 cm (soit une variation de stock de 50000 m³); les surélévations permises par les clapets sont de l'ordre de 1 à 2 cm.
- exutoire d'un bassin versant de 382 km² (y compris celui de la Madine).

2.2.2 Climatologie

a) Les stations de Vigneulles-les-Hattonchatel et d'Essey-et-Maizerais (Météo-France) ont été sélectionnées de par leur position géographique et pour la continuité des enregistrements qu'elles proposent sur la plus longue période possible. Les pluviométries journalières qui y sont mesurées sont considérées comme respectivement représentatives des bassins versants de la Madine et du Rupt-de-Mad, pour la période commune 1966 à 1997 (32 années).

b) La station météorologique de Metz (Météo-France) est la station la plus proche de la zone d'étude en ce qui concerne les enregistrements de l'évaporation décadaire. Les données traduisent une ETP Penman, calculée sur plusieurs mesures quotidiennes de 5 paramètres climatiques (températures mini et maxi, température du point de rosée, vent et insolation).

Ces ETP sont complètes sur la période 1966 à 1998, à l'exception de la 2ème décennie de novembre 1969 (reconstituée). Elles peuvent être traduites en évaporation sur plan d'eau grâce à la corrélation régionale saisonnière effectuée sur des mesures d'évaporation d'eau libre de la station Nancy-Essay (moyennes décennales reliant l'ETP à l'évaporation sur la période 1971-1990).

2.2.3 Débits

a) débits caractéristiques issus des campagnes en période d'étiage sur le bassin concerné:

- la Madine: du 11/07/79, 18/07/79 et 09/10/79 (3 séries respectives de 7, 4 et 2 points de jaugeage);
- le Rupt de Mad: du 10/09/79, 18/09/79 et 01/12/1979 (3 séries de 15, 13 et 12 points mesurés).

b) profils hydrologiques issus des campagnes sur la Madine et du Rupt de Mad (bruts et lissés) et débits mensuels d'étiages fréquentiels (F1/2, F1/5 et F1/10) associés.

c) débits moyens journaliers à la station d'Onville :

- période 1966-1997 (validés);
- période 01/1998 à 07/1998 (non validés);
- profil des débits naturels.

La corrélation des débits à Onville par rapport à Hauconcourt laisse apparaître l'influence de la retenue d'eau de la Madine à partir de l'année 1973.

- d) débits mensuels minimaux annuels (QMNA) à Onville, sur la période 1971-1990 ;
et courbe de calage des débits du Rupt de Mad sur la station d'Onville.
- e) débits journaliers à Nonsart, sur la période 1978-1990;
et courbe de tarage sur le déversoir semi-triangular.

2.2.4 Prélèvements

- a) volumes journaliers prélevés sur le plan d'eau d'Arnaville, par la Mosellane des Eaux, excluant les pertes en production d'eau (et les débits réservés), sur la période 01/1987 à 06/1998 (11 ans et 6 mois).
- b) "pertes" pour production d'eau (volumes s'ajoutant aux prélèvements sur plan d'eau d'Arnaville), au pas de temps mensuel pour les années 1996 et 1997, en annuel pour les années 1991 à 1995.
- c) "lachûres" sur la Madine en vue du soutien du plan d'eau d'Arnaville: débits sur la période 1987-1997.

Rq: Les surverses des retenues de Madine et d'Arnaville, sans mesures directes, restent inconnues. Largement supérieures aux lachûres (avec un ordre de grandeur de 1 à 10), elles seront déduites d'après les bilans hydrologiques.

2.2.5 Stocks d'eau

- a) hauteurs d'eau sur le lac de Madine en relevés mensuels sur les périodes 1974-1979 et en relevés quasi-mensuels de 01/1982 à 09/1997.
- b) relations SHV du plan d'eau de Madine: courbes Volume= f(S,H) et Surface= f(V,H). (Courbe sujette à discussion)
- c) pas de suivi de niveau ni de courbe SHV 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).

2.3 Données hydrologiques

2.3.1 Paramètres descriptifs du fonctionnement du système

2.3.1.1 Pluviométrie

Le poste pluviométrique Météo-France de Vigneulles-les-Hattonchatel, en limite du bassin versant de la Madine, caractérisera les précipitations sur son bassin versant, ainsi que celles du haut bassin versant du Rupt de Mad. La station d'Essey-et-Maizerais représentera, quant à elle, les précipitations du bas bassin versant du Rupt de Mad.

Les précipitations journalières relevées sur la période 1966 à 1997 présentent les caractères suivants :

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

La corrélation entre les deux stations (double cumul) laisse apparaître des modifications dans les enregistrements de la station d'Essey, attribuables à un changement de position du pluviomètre, à partir de la fin de l'année 1981. Globalement les deux stations semblent fiables, avec une pluviométrie plus forte dans la partie occidentale du bassin versant (Vigneulles).

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

La série chronologique sur la période concernée est complète pour la station de Vigneulles. Quelques données manquantes pour celle d'Essey ont été reconstituées par rapport à cette dernière.

La reconstitution des données manquantes¹ a été faite au pas de temps mensuel et au pas de temps journalier par des coefficients issus du double cumul (1966-97):

mensuel	Essey = 0,7585 x Vigneulles	R ² =0.998	06/66 à 10/81
	Essey = 0,8306 x Vigneulles	R ² =0.994	01/82 à 12/97
journalier	Essey = 0,75 x Vigneulles	R ² > 0.99	06/66 à 06/72
	Essey = 0,77 x Vigneulles	R ² > 0.99	07/72 à 12/97

L'analyse statistique (par le logiciel Hydrostat²) a également permis de déterminer la chronique à tester (S.5, S.5, N., H.5, S.10, S.5, N.) à partir de la période d'observation 1983-1997 :

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

Séquence « sèche » retenue dans les simulations : S5, S5, N, H5, S10, S5, N
soit 1996, 1996, 1990, 1986, 1985, 1996, 1990

2.3.1.2 Débits

2.3.1.2.1 Débits réservés

a) Le débit réservé imposé par décret en sortie du barrage de Madine est de 24 l/s (soit 2074 m³/j, 756 864 m³/an ou 63072 m³ en moyenne mensuelle). En pratique le débit réservé (Q_r) est variable et supérieur à cette valeur indicative, à de rares exceptions sur la période d'observation.

Le débit réservé est régulé à l'aide d'une vanne spécifique, indépendante de la vanne de vidange (lâchers). La vérification du débit s'effectue sur un déversoir triangulaire à la sortie de la retenue. Ce déversoir sert également à la mesure des volumes lâchés depuis le plan d'eau mais ne permet aucune estimation des surverses qui, elles, empruntent un canal annexe.

Les variations constatées depuis 1987 sont importantes, fluctuant entre 19 l/s (Mars 1993) et 110 l/s (débit lié à une fuite décelée en Décembre 1997 sur la vanne de vidange).

Dans le détail et hors périodes de lâchers, ces débits se répartissent comme suit (débits mensuels exprimés en litres par seconde):

¹ A noter : l'excellente corrélation observée (coefficient de corrélation supérieur à 99%).

² HYDROSTAT : logiciel de calcul statistique (analyse de données de pluies ou débits) développé à BRL.

(l/s)	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
1987	56	56	56	42	42	42	42	-	30	30	24	24
1988	-	-	-	69	-	-	-	-	-	-	-	-
1989	30	20	19	25	25	-	-	-	-	-	-	-
1990	42	42	33	33	-	-	-	-	-	-	28	39
1991	27	27	25	20	-	-	-	-	-	-	-	36
1992	36	32	22	25	25	-	-	-	-	-	-	25
1993	25	28	25	42	-	-	-	-	-	-	44	44
1994	25	25	25	55	55	61	-	-	-	36	36	38
1995	25	25	-	25	-	-	-	-	-	-	-	-
1996	25	25	25	25	-	-	-	-	-	-	-	25
1997	25	25	25	25	25	25	25	-	-	-	-	110

b) Le débit réservé en sortie de la retenue d'Arnaville est théoriquement de 60 l/s (soit 5184 m³/j, 157 680 m³ en moyenne mensuelle ou 1900 Mm³/an). Traditionnellement et par accord avec les riverains, ce débit réservé est également supérieur à la valeur imposée : vérifié à l'aide d'un débitmètre à charge constante³, il est de l'ordre de 100 l/s.

Si l'on fait abstraction des variations de la hauteur de charge des plans d'eau (marnage plus important du lac de Madine), les débits réservés sur la Madine et sur le Rupt de Mad seront considérés comme stables dans le temps dans les simulations.

2.3.1.2.2 Temps de transferts

Les temps de transfert de la Madine à Arnaville varient sensiblement selon l'importance des débits, tout en étant supérieurs 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. La prise en compte de ces temps de transferts est une condition essentielle si l'on désire une gestion de la rivière et des plans d'eau au pas de temps journalier.

2.3.1.2.3 Campagnes de jaugeages

Les rares campagnes de jaugeages entreprises sur le Rupt de Mad et la Madine en période d'étiage constituent les seuls compléments d'information à l'analyse des débits d'écoulement. Les profils hydrologiques lissés des deux cours d'eau ont pu en être dégagés.

Quatre points de jaugeages sur la Madine et 12 sur le Rupt de Mad autorisent l'estimation des débits spécifiques et coefficients de propagation des débits d'étiage. Ces informations renseignent sur les zones de pertes et sur leur importance (prélèvements à Arnaville compris).

2.3.1.2.4 Débits à Onville

La mesure quotidienne des débits du Rupt de Mad s'établit sur la station d'Onville, unique poste disposant d'enregistrements depuis 1965. Ces valeurs de débits moyens journaliers sont cohérentes avec les informations issues des travaux antérieurs.

³ La variation de niveau sur le plan d'eau d'Arnaville est en général de l'ordre de 5 cm.

Les correctifs annuels des enregistrements reposent sur une courbe de tarage du poste relativement fiable. Toutefois, on observe une forte dispersion des mesures pour les faibles hauteurs d'eau (faibles débits, inférieurs à 5 m³/s), et des fluctuations interannuelles supérieures à 25% : le calage et la validation fréquente des données reste donc plus que nécessaire.

Quelques débits "exceptionnels", au vu des débits antérieurs et postérieurs, paraissent douteux (la mesure du 12/05/1970 est néanmoins confirmée comme un évènement ayant touché tous les proches bassins).

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).

Moyennes mensuelles (en m³/s) et année-type correspondante sur la période 1965-98⁴:

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc	moy. AN	année type (moyenne)
H2	4.81	5.92	4.43	3.41	2.18	1.47	0.91	0.75	0.76	1.38	1.89	4.19	3.55	1977 (3.52)
H5	10.03	10.51	7.92	7.11	4.53	2.73	1.61	1.39	1.32	2.71	3.66	8.48	4.79	1980 (4.76)
H10	14.71	14.17	10.71	10.43	6.63	3.76	2.16	1.93	1.76	3.86	5.16	12.24	5.43	1970 (5.42)
S2	2.31	3.34	2.48	1.64	1.05	0.79	0.52	0.39	0.43	0.70	0.98	2.07	2.31	1974 (2.30)
S5	1.94	2.91	2.16	1.37	0.88	0.68	0.45	0.34	0.38	0.60	0.83	1.75	2.01	1991 (2.03)
S10	1.55	2.44	1.81	1.10	0.71	0.57	0.38	0.28	0.32	0.49	0.68	1.41	1.64	1972 (1.73)

Moyenne interannuelle sur la période 1965-97 (33 années): **3.52 m³/s.**

2.3.1.3 Prélèvements

2.3.1.3.1 Prélèvements à Arnaville

L'analyse des prélèvements quotidiens pour la production d'eau pour la ville de Metz (Mosellane des Eaux) s'inscrit sur la période 1983 à 1997.

Le volume **journalier** moyen prélevé sur le plan d'eau d'Arnaville est de 38000 m³, oscillant entre 16215 m³ et un maximum de 59228 m³.

Les fluctuations saisonnières et annuelles sur les volumes d'eau produits sont importantes.

Analyse annuelle

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

⁴ L'ensemble des informations liées à la gestion de l'eau sur le Rupt de Mad (lâchers de barrage, débits réservés, etc.) n'étant pas disponible sur une aussi longue période, ce sont parfois d'autres années (fournissant la totalité des données nécessaires), à peine moins représentatives, qui ont été retenues pour simuler les S5, S10, N, H5.

Analyse mensuelle

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

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

Prélèvement mensuel moyen: 1 157 Mm³

Ces productions donnent lieu à des volumes prélevés supérieurs en valeur. Les pertes d'eau en production (en moyenne égales à 5% des volumes AEP sortant de la station) sont décrites par un coefficient saisonnier, suivant l'adaptation du traitement en périodes de turbidité des eaux ou de développement algal dans l'eau brute (variation classique).

Voici la répartition moyenne des pertes (exprimées en % de la production totale) d'après les bilans mensuels de la Mosellane des Eaux sur la période 1991-97:

	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 ³ m ³)	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

A la comparaison des volumes totaux prélevés par rapport aux débits entrants (en première approximation ceux mesurés à Onville), il apparaît des jours où le débit réservé⁵ (en théorie) en sortie d'Arnaville ne serait respecté sans une baisse de niveau de la retenue (avec prélèvement en eau pour l'AEP de la ville de Metz).

Sur les bases des débits entrants pris comme étant ceux mesurés à Onville, le déficit maximal observé sur cette même période est supérieur à 13000 mètres cubes par jour. Cette baisse potentielle du niveau du plan d'eau représente 4 % de la capacité totale de la réserve (en un jour). En l'absence de soutien du Rupt de Mad par des lâchures en amont, cette baisse serait sensiblement supérieure. Le soutien du plan d'eau d'Arnaville par celui de la Madine est donc justifié.

En termes quantitatifs, une simulation du niveau du plan d'eau d'Arnaville fait apparaître une baisse supérieure à celles réellement observées au cours de la période citée, si le débit réservé est tenu à 100 l/s. Les déficits sur plusieurs jours cumulent en effet des baisses de niveau supérieures aux 20 cm de marnage recherché sur la retenue.

Pour qu'un tel niveau ait pu être maintenu, il est nécessaire d'envisager des apports importants (hors apports du cours d'eau) entre le point de mesure des débits à Onville et l'ouvrage de retenue (distants de 1.5 km et

⁵ Qr de 60 litres par seconde fixés par décret en aval d'Arnaville pour le Rupt de Mad.

drainant moins de 5 km. Des sources ou rejets anthropiques sur le tronçon immédiatement en aval de la station d'Onville, sont susceptibles de fournir cet appoint, au moins en période d'étiage (i.e. au moment des baisses significatives du niveau de la retenue). Outre l'agglomération de Bayonville, un ensemble de sources localisées en rive gauche du Rupt de Mad peuvent en être à l'origine. Cela reste à vérifier pour préciser les apports réels.

2.3.1.3.2 Pertes dans le système

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 pertes affectant les lâchures et débits naturels entre la Madine et Arnaville devraient s'exprimer à l'examen des profils hydrologiques établis après les rares campagnes de jaugeages. Or, le faible nombre de points de jaugeage ne peut réellement représenter les relations existantes sur certains tronçons de la rivière: la fluctuation des valeurs de débit spécifiques souligne la présence d'apports et pertes non pris en compte lors du choix des points de mesures.

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

Localement apparaissent des zones de pertes en rivière, spécialement sur le tronçon Richecourt-Euvezin (aval): entre Richecourt et Maizerais, ces pertes ont été estimées à 15% des écoulements. Une perte localisée entre l'amont et l'aval d'Euvezin a été mesurée à 20 litres/seconde⁶. L'estimation des pertes de lâchures repose donc sur ces dernières hypothèses: à savoir, la prise en compte de pertes localisées présumées constantes.

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).

2.3.1.4 Lâchures de barrage

Les données fournies par la Mosellane des Eaux sont **journalières** pour chaque lâcher de janvier 1987 à décembre 1997. Ces valeurs comprennent le débit réservé.

Des valeurs journalières de débit au déversoir couvrent la période 1975-1980. Il s'agit de hauteurs moyennes journalières (période 1975 à 1977) traduites en débits grâce à la courbe de tarage définie pour les déversoirs semi-triangulaires (relation $Q=1,42 h^{5/2}$), ainsi que des valeurs de débits journaliers (1978 à 1980). Ces informations soulignent un débit réservé globalement supérieur à 36 l/s sur toute la période: une différence de 12 l/s signifierait par rapport au débit théorique une erreur potentielle de 31000 m³/mois négligés.

2.3.1.5 Volumes stockés (Lac de Madine)

L'estimation du volume d'eau stocké sur le lac de Madine est établie par un relevé quasi-mensuel des hauteurs d'eau. La courbe HSV établie pour cette retenue est le seul moyen de déduire les volumes stockés ainsi que la superficie en eau.

⁶ d'après étude Aquascop 1993.

2.3.1.5.1 variations du stock

La principale inconnue réside dans les variations de volumes à un pas inférieur au mois, notamment pour les relier aux débits mesurés en sortie du plan d'eau (débits réservés et lâchés).

Le niveau du lac est effectué à date variable, environ une fois par mois (dont seulement 7 mesures pour l'année 1990). Cette faible fréquence limite l'observation des variations journalières du plan d'eau, donc l'analyse de sa gestion au pas de temps quotidien (simulations non vérifiables).

La relation établie entre la hauteur mesurée mensuellement (avec une précision arrondie au demi-décimètre la plupart du temps) et le volume stocké dans le plan d'eau est potentiellement une source d'erreur importante. De plus, l'erreur sur les volumes est accentuée par la grande superficie de la retenue:

- Une rapide analyse en différents tronçons de la courbe HSV⁷ établie laisse apparaître que la relation linéaire⁸ n'est pas la plus adaptée pour décrire les volumes stockés pour les bas et hauts niveaux du lac. L'idée d'une traduction des hauteurs d'eau en volumes par une relation mathématique est donc rejetée au profit d'une lecture directe sur la courbe dans le modèle.
- La mesure de hauteur repose sur un examen visuel d'un niveau fluctuant (échelle non protégée des vagues et mouvements du lac). Elle conduit à une valeur moyenne, d'une précision relative, arrondie à 5 centimètres près à la retranscription. Une telle approximation engendre une erreur systématique de 30 l/s sur 800 ha (correspondant à un volume de 500000 m³ sur le plan d'eau).

D'autre part, les surverses du plan d'eau ne sont pas mesurées au niveau du déversoir semi-triangulaire (base de la mesure des débits réservés et de soutien d'Arnaville). Ces surverses sont loin d'être négligeables puisqu'elles représentent la majeure partie des écoulements hors étiage, supérieures en première approximation à 12 millions de mètres cubes annuels.

Le mode de gestion des stocks d'eau à la Madine impose une certaine approximation dans les débits lâchés avant stabilisation: en effet, l'ouverture de la vanne est effectuée sur constat de déficit à Arnaville (niveau < 180.50 NGF), avec un débit ajusté selon l'indication du déversoir du chenal aval. Ces ouvertures se font par paliers de 500 à 800 m³/h à plusieurs jours d'intervalle jusqu'à obtention du niveau 180.50 à Arnaville et sans déversement du seuil...

2.3.1.5.2 pertes par fuites et infiltration

La collecte des fuites d'eau par un réseau de drains, ainsi que des mesures piézométriques sur les digues, permettent de considérer les pertes frontales d'eau de la retenue comme nulles ou très faibles.

Par contre, aucune étude n'ayant été faite sur la mesure des pertes du plan d'eau par infiltration de fond, il faut se baser sur une estimation de ces volumes par des méthodes directes (perméabilité du substrat, hauteurs de charge, surfaces, etc.) ou indirectes (bilan hydrologique) pour la prise en compte de ces volumes.

Une limite maximale de cette infiltration, avec une perméabilité du fond⁹ évaluée à 10⁻⁸ m/s, peut ainsi s'élever à près de 100 l/s sur l'ensemble du plan d'eau, soit environ 4 fois le débit réservé en sortie du lac, et près de 3 millions de mètres cubes sur l'année. Cette valeur reste une estimation supérieure théorique, loin d'être atteinte: la perméabilité décroît en effet très vite avec l'envasement et le tassement de fond. Compte-tenu de l'expérience acquise sur des plans d'eau équivalents, dans des conditions hydrogéologiques et pédologiques analogues, cette infiltration sur la Madine est estimée inférieure à 100 m³/j par mètre de charge sur l'ensemble du lac (moins de 850 m³/j, soit une lame d'eau de 0.1 mm, ou 310 000 m³/an).

2.3.1.5.3 Evaporation

⁷ lecture graphique (courbe) à 400000 m³ (V) et 10 ha (S)...

⁸ relation linéaire: $V = f(H) = 8.57143 \cdot h - 1918.43$

⁹ sol de sédiments fins et limons, valeur de perméabilité limite d'une roche dite "imperméable".

Les évaporations issues des enregistrements de Météo-France (Metz et Nancy) permettent la mesure des volumes soustraits au plan d'eau de la Madine et, dans une moindre mesure car moins étendu, de celui d'Arnaville. L'évaporation est calculée par les données climatiques générant une ETP Penman sur Metz. Cette évapotranspiration est traduite en évaporation journalière par sa relation avec l'évaporation sur plan d'eau fournie pour Nancy.

Les pertes par évaporation des plans d'eau ont été évaluées quotidiennement sur la période 1966-1998, en tenant compte des variations de superficie du plan d'eau.

Le bilan annuel sur le lac de Madine fait ressortir une évaporation moyenne importante, avec plus de 7 millions de mètres cubes, soit 19000 m³/j ou une lame d'eau de 2,3 mm/j. L'ordre de grandeur peut être considéré analogue sur la retenue d'Arnaville, bien que comparativement très inférieur en volume.

L'évaporation est équivalente aux précipitations tombant sur le lac de Madine: le bilan annuel P-E sur ce **seul** plan d'eau est donc à peu près nul, bien que les différences saisonnières soient marquées. Sa prise en compte est donc nécessaire pour une gestion du stock d'eau incluant des décalages dans le temps des volumes disponibles.

2.3.2 Reconstitution des données manquantes

Remarque: la reconstitution des données repose sur l'absence de surverses pendant les périodes d'étiage (périodes de soutien du Rupt de Mad par la Madine).

2.3.2.1 Sorties de la retenue de la Madine

2.3.2.1.1 Lâchures

Les pertes des lâchures entre la Madine et Arnaville ne peuvent pas s'estimer à partir des données de jaugeage pendant les périodes d'étiage, par la relation reliant ces pertes aux débits jaugés (instantanés) car les débits lâchés sont inconnus et les points de jaugeages insuffisamment descriptifs. Ces pertes sont donc appréhendées comme une constante sur la période d'étiage. Cependant, elles seront sujettes à variation selon la sévérité des étiages.

Le bilan hydrologique montre que des surverses interviennent parfois en dehors des périodes d'étiage¹⁰. Certaines observations sur les débits mesurés à Onville les soulignent sans pouvoir en quantifier précisément l'importance et la fréquence. Ceci est confirmé au niveau des simulations lors de certains épisodes pluvieux estivaux et lorsque le niveau du lac est particulièrement élevé. Leur connaissance aurait permis de mieux caler les apports d'hiver à partir de la variation du stock dans la retenue.

2.3.2.1.2 Evaporation

Les valeurs manquantes de la 2^{ème} décade de novembre 1969 sont interpolées comme des valeurs moyennes entre les 1^{ère} et 3^{ème} décade du même mois. Cette valeur (0,35 mm/j) est cohérente avec celles des autres 2^{èmes} décades de novembre (moyenne de 0,40).

2.3.2.2 Entrées

2.3.2.2.1 sur la retenue de la Madine

a) Plusieurs possibilités ont été expérimentées dans le calcul des apports naturels sur le lac de Madine:

- une estimation grossière est possible à partir du coefficient de ruissellement exprimé à partir des bilans hydrologiques (relation pluie/débit sur les périodes "hivernales") sur le bassin versant concerné;

¹⁰ Les simulations confirment quantitativement ces observations liées à des situations exceptionnelles.

- le bilan sur le lac (variation niveau du lac à partir des volumes lâchés, évaporés et infiltrés) permet de confirmer ces apports naturels;
- la reconstitution des débits naturels de la Madine à partir des profils hydrologiques permet également d'obtenir des résultats identiques.

b) Les entrées d'eau sur le lac même sont connues par la connaissance des précipitations sur un impluvium de coefficient de ruissellement égal à 1, sur une superficie de plan d'eau variable et connue à tout instant. Il s'agit donc d'un volume d'eau directement proportionnel aux précipitations sur le lieu même.

2.3.2.2 sur le Rupt de Mad

Les débits naturels du Rupt de Mad en étiage peuvent également être complétés ou vérifiés à partir des profils hydrologiques; les débits de la rivière sur le reste de l'année étant approchés à partir des relations pluie-débit qui peuvent être soulignées de manière saisonnière.

2.3.2.3 Sorties de la retenue d'Arnaville

Les sorties de la retenues d'Arnaville se partagent entre débit réservé et surverses. Ces dernières sont empiriquement limitées, le marnage du plan d'eau restant faible et maintenu en théorie sous les 20 cm. Les variations du plan d'eau étant inconnues, la totalité du débit sortant est connue par la comparaison des entrées aux volumes extraits pour l'AEP, connaissant le débit réservé.

2.3.3 Apports et éléments perturbateurs

2.3.3.1 Sources

Il n'existe aucun suivi des nombreuses sources pouvant donner lieu à écoulement le long du Rupt de Mad. La nature du sous-sol favorise 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.

Le cas évoqué des entrées sur la retenue d'Arnaville permet indirectement une estimation des apports possibles immédiatement en aval d'Onville: Si on estime que le maintien de la côte du plan d'eau au dessus des 20 cm de baisse "admissible" a été respecté sur la période d'observation, le débit total apporté par ces apports supplémentaires doit être au maximum de 70 l/s. Cette limite satisfait, sur la période d'étude, une baisse cumulée du niveau d'eau de 39 cm en situation la plus critique (Octobre 1989). On peut supposer que cette contrainte n'est dépassée qu'exceptionnellement, pour justifier de tels apports supplémentaires...

2.3.3.2 Rejets anthropiques

L'influence des lâchures depuis le lac de Madine est essentielle en période d'étiage; elle est moins marquée en période de pluies.

La retenue d'Arnaville influence le régime aval du Rupt de Mad, assurant un débit réservé supérieur en théorie à 60 l/s. En pratique ce débit est supérieur à 100 l/s en sortie du plan d'eau.

Il faut tenir compte des rejets possibles au passage des zones habitées, le long de la rivière. En effet, l'ensemble des communes implantées sur le bassin reposent sur un assainissement autonome: les volumes rejetés dans le Rupt de Mad peuvent donc être non négligeables. Leur importance relative dans le bilan global sur le bassin n'apparaît que si ces apports ont une origine externe au bassin hydrographique: l'origine de ces apports reste à définir.

Peuvent être considérés comme apports "externes" au système (bassin):

- alimentation des populations à partir de sources dont l'eau provient d'un bassin hydrogéologique extérieur ou à partir de forages profonds (eau soustraite à la surface);
- amenée d'eau par conduite (adduction d'eau produite hors-bassin).

2.3.3.3 *Autres*

Des aménagements constants 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.

Des curages excessifs dans la partie calcaire semblent ainsi avoir aggravé les pertes en rivière en aval de Richecourt. La mise en place de seuils dans la partie amont du Rupt de Mad a, dans le même temps, ralenti les vitesses d'écoulement de la rivière (pouvant encore favoriser 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 simultanées¹¹ de ces étangs (ou surverses en périodes humides), semblent se traduire par une augmentation " artificielle " des débits du cours d'eau.

2.4 *Relations Pluie/Débits sur le bassin versant*

Il n'existe a priori aucune corrélation franche entre les débits mesurés à Onville et la pluviométrie locale. Pour cette raison ont été utilisées et comparées deux méthodes d'utilisation des données pour le fonctionnement du modèle en simulation :

- l'une s'inspire des coefficients de ruissellement tirés des relations approximatives Pluies/Débits sur l'ensemble du bassin versant du Rupt de Mad (BV de la Madine inclus) ; toutes les relations reposent sur une comparaison des précipitations aux débits mesurés à l'unique station d'Onville.
- l'autre méthode ne retient que ces coefficients dans la partie haute du bassin versant, soit le BV de la Madine seul. Celle-ci, la plus précise, intègre ces apports naturels calculés (apports alimentant le lac de Madine) aux apports issus du reste du bassin versant, selon un module de type boîte noire¹².

L'absence de réelle adéquation des résultats de simulation à la réalité avec l'emploi des coefficients de ruissellement généralisé sur tout le BV restant un problème insoluble, le modèle s'inspire de la deuxième solution. Deux versions du modèle existent donc : l'une repose sur cet essai de modélisation descriptive des phénomènes, l'autre sur un fonctionnement mixte (retenu pour finaliser toutes les simulations).

Voici ci-après le détail des valeurs des analyses ayant abouti aux meilleurs résultats dans le cadre de l'utilisation des relations pluies/débits. Dans tous les cas, les coefficients estimés sur le haut BV de la Madine restent utilisés dans le modèle (apports alimentant le lac).

Ces valeurs sont communiquées à titre indicatif, leur exploitation n'ayant pas abouti aux meilleurs résultats en simulation...

2.4.1 *Relations saisonnières*

¹¹ Vidange aux mois d'octobre et novembre, sans aucune précision sur les volumes mis en jeu.

¹² La modélisation du type « boîte noire » reproduit un comportement sans entrer dans le détail descriptif des phénomènes de transformation des données d'entrée en données de sortie. Le module de « calcul » (boîte noire) fournit des données en sortie figées en fonction des données en entrée. Dans le cas présent, il s'agira de fournir les débits ruisselés sur les ¾ du BV, par reproduction des débits ruisselés lors de situations déjà observées.

Dans le détail, il peut se dégager une relation saisonnière un peu plus nette qu'en annuel avec des débits sensiblement corrélés aux précipitations sur les mois de Décembre à Avril (hors étiage). Le reste de l'année, les débits d'étiage (Juillet à Septembre) ne montrent aucune influence des précipitations estivales, avec un faible écoulement indépendant des volumes précipités sauf exception (pluies exceptionnelles). Hors étiage, le débit augmente avec la pluie, alors qu'en étiage, le volume écoulé reste autour d'une valeur mensuelle quelle que soit la pluviométrie.

Les relations pluies-débits sur les mois d'automne et de la fin du printemps sont plus ambiguës dans leur interprétation : l'influence des lâchures (barrage et étangs) et les relations fluctuantes entre rivière et sous-sol peuvent en être la cause.

Les corrélations pluie/débit mensuelles apportent une précision supérieure aux corrélations saisonnières: les coefficients mensuels ont donc été préférés aux coefficients saisonniers.

2.4.2 Coefficients d'écoulement

Hors étiage

Les lâchures depuis le lac de Madine se faisant essentiellement de mai à novembre, il n'est pas nécessaire de travailler avec un débit naturel si l'on estime négligeable le rôle du remplissage des retenues. Toutefois les débits réservés doivent être connus, d'autant plus s'ils ne sont pas constants dans le temps.

Cette option ne peut donc réellement s'appliquer qu'avec des surverses quasi-permanentes (sur des retenues pleines), et non en période de remplissage comme après certaines années sèches ou lors des années de mise en eau. Le traitement des données dans ces conditions permet pourtant de s'affranchir de la complète connaissance des volumes lâchés (parfois inconnus dans les premières années), ainsi que celle des conditions présentes avant la mise en place du barrage.

Quelques rares mois jugés exceptionnels ont été écartés (mesures faussant la corrélation).

Finalement, les coefficients d'écoulement suivants peuvent être retenus :

décembre :	0,52	
janvier :	0,63	0,70 (avec tout l'échantillon)
février :	0,89	0,73 (avec tout l'échantillon)
mars :	0,69	
avril :	0,68	

Les résultats obtenus avec des débits naturels (observés de 75-80 et 87-97¹³) sont les suivants :

décembre :	0,42
janvier :	0,72
février :	0,75
mars :	0,68
avril :	0,59

Sur la même période d'observation, avec des débits influencés, les coefficients obtenus sont :

décembre :	0,42
janvier :	0,73
février :	0,67
mars :	0,70
avril :	0,61

En étiage

Les débits pris en compte sont les débits « naturels », c'est-à-dire les débits à Onville auxquels ont été retranchés les volumes lâchés (le débit réservé est conservé car composant la quasi-totalité des écoulements

¹³ Les volumes lâchés à la Madine sont inconnus sur la période 1981-87, ne permettant aucune déduction pour connaître précisément les débits naturels (débits totaux auxquels on retranche les lâchers).

durant cette période). Ceci réduit la période d'observation à 1975-80 (données des débits à Nonsard) et 1987-97 (données des volumes lâchés). Les pluies sont celles mesurées à Essey., au centre du BV.

Les coefficients d'écoulement suivants sont retenus:

mai :	0,27
juin :	0,12
juillet :	0,07
août :	0,05
septembre :	0,06
octobre :	0,12
novembre :	0,18

Utilisation des profils hydrologiques

Les profils hydrologiques établis en période d'étiage (07 et 10/1979) donnent les informations suivantes:

Madine

Surface du B.V. en km ²	Débits mensuels d'étiage (l/s)		
	F1/2	F1/5	F1/10
13.00	29.5	18.8	15
60.50	75.9	48.5	38.6
99.00	124.2	79.3	63.1
107.10	150.3	95.9	76.4

Les profils hydrologiques, toujours relevés pendant de Septembre à Décembre 1979, renseignent de façon équivalente sur les débits d'étiage du Rupt de Mad.

Rupt de Mad

Surface du B.V. en km ²	Débits mensuels d'étiage			milliers de m ³ /mois		
	l/s					
	F1/2	F1/5	F1/10	F1/2	F1/5	F1/10
53.10	5.2	3.4	2.7	13.48	8.81	7.00
103.40	24.4	15.8	12.6	63.24	40.95	32.66
140.00	49.2	31.9	25.5	127.53	82.68	66.10
142.50	70.2	45.5	36.4	181.96	117.94	94.35
153.00	79.5	51.6	41.2	206.06	133.75	106.79
260.10	201.3	130.6	104.2	521.77	338.52	270.09
265.00	208	134.9	107.7	539.14	349.66	279.16
285.60	329	213.4	170.4	852.77	553.13	441.68
358.80	501.7	325.4	259.7	1300.41	843.44	673.14
371.50	535	347	277	1386.72	899.42	717.98
374.00	541.7	351.3	280.5	1404.09	910.57	727.06
384.80	486.1	315.3	251.7	1259.97	817.26	652.41

Les coefficients d'écoulement sont obtenus à partir des débits naturels en chaque point. L'ensemble du bassin versant étudié (384,80 km²) est découpé en 3 sous-bassins, caractérisés par leurs conditions climatiques (précipitations) et pédologiques :

- le BV de la Madine : précipitations prises à Vigneulles, surface de 107,10 km²
- le haut BV du Rupt de Mad : précipitations prises à Vigneulles, surface de 153,00 km²
- le bas BV du Rupt de Mad : précipitations prises à Essey, surface de 124,70 km²

Une moyenne pondérée par la surface drainée par chacun des points a été calculée pour les trois sous-bassins.

Rappel: les périodes d'analyse sont celles où la totalité des volumes lâchés et des débits mesurés sont connus. La reconstitution des séries manquantes, basées sur les mêmes données initiales, n'apporte pas de grandes modifications à ces estimations.

	Bas BV Rupt de Mad	Haut BV Rupt de Mad	BV Madine
mai	0.27	0.10	0.28
juin	0.13	0.05	0.14
juillet	0.09	0.03	0.10
août	0.06	0.03	0.09
septembre	0.04	0.02	0.05
octobre	0.10	0.03	0.08
novembre	0.17	0.05	0.14
	Pluie à Essey 1975-80 et 1988-97	Pluie à Vigneulles 1975-80 et 1988-96	

2.4.3 Récapitulatif

La valeur moyenne résultante conduit à un coefficient écoulement de 0,34 sur l'année

Cette valeur est tout à fait cohérente avec les estimations des précédentes études (déficit de 525 mm à Onville pour une pluviométrie de 827 mm, soit un écoulement de 302 mm, ou un coefficient de 0,36).

Dans le détail, les coefficients susceptibles d'être retenus sont donc les suivants:

Coefficients d'écoulement période d'observation		Bas BV Rupt de Mad	Haut BV Rupt de Mad	BV Madine
1966-97	janvier	0.70		
	février	0.73		
	mars	0.69		
	avril	0.68		
1975-80 et 1988-97 (à partir des profils hydrologiques)	mai	0.27	0.10	0.28
	juin	0.13	0.05	0.14
	juillet	0.09	0.03	0.10
	août	0.06	0.03	0.09
	septembre	0.04	0.02	0.05
	octobre	0.10	0.03	0.08
	novembre	0.17	0.05	0.14
1966-97	décembre	0.52		

NB : Les valeurs concernant la Madine (en gras) sont les seules ayant été utilisées en simulation.

2.5 Bilans

2.5.1 Lac de Madine

$$P + R = E + i + Qr + Qsoutien + surverse + \Delta V$$

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 inconnu

il est estimé par le coefficient d'écoulement déterminé mensuellement à partir de la corrélation Pluie à Essey - 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 inconnue

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).
(une erreur de 7 ha avec une évaporation de 2 mm/j, engendre une erreur de 4 350 m³/mois.)

i - infiltration inconnue

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 mais les données de débits à Nonsard (j / 75-80) montrent qu'il est souvent supérieur à 36 l/s (12 l/s = 31 Mm³/mois). Outre cette sous-estimation présumée, sa valeur fut initialement plus proche de 45 l/s lors de la mise en eau du barrage.

Qsoutien - lâchures connues (j/87-96)

surverse - inconnue (cote du déversoir = 227.89)

ΔV - 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 m³/mois</i>	min	moyenne	max
Apports P	10	700	3 100
Apports R	59	2 987	18 790
Pertes E	26	630	1 760
Pertes Qr + Qsoutien	58	370	1 770

2.5.2 Retenue d'Arnaville et Rupt de Mad

Volumes restitués au Rupt de Mad depuis Arnaville:

$$Q + P + R = E + AEP + Qr2 + surverse + \Delta V$$

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) afin d'intégrer les pertes d'usine

Qr2 - débit réservé connu (100 l/s)

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

ΔV - 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 m³/mois</i>	min	moyenne	max
Apports Q	1 400	8 800	52 600
Apports P	0,12	13,7	51,6
Pertes E	0,92	13,4	32,4
Prélèvements	880	1160	1600
Pertes Qr2		260	

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 Mm³/mois).

2.5.3 Pertes et Apports entre lac de la Madine et retenue d'Arnaville

Pour les débits d'étiage, des coefficients de propagation sont estimés à partir des profils hydrologiques déduits des trois campagnes de jaugeages. Ces informations permettent de localiser d'éventuelles pertes ou apports entre les points de jaugeage, par modification des pentes des profils hydrologiques. Malheureusement, la complexité des relations entre la rivière et le sous-sol karstique laisse présumer l'insuffisance de ces points pour préciser ces relations. D'autre part, bien qu'observées et parfois localisées, les pertes de la rivière ne sont pas quantifiées.

Les pertes et apports seront considérés comme constants en étiages (au quotidien), mais ces débits seront variables selon la gravité de l'étiage. Dans cette optique ont été estimées des pertes plutôt fortes en étiage important et moins importantes lorsque le niveau des nappes est présumé haut (années humides). A l'inverse, le débit des sources est considéré comme plus fort en fin de saison humide, et progressivement faible avec la sévérité de l'étiage.

Le faible nombre de points d'observation et l'absence de réelles mesures de ces pertes et sources ne permettent aucune précision sur leur rôle le long du tronçon entre les retenues. Il subsiste une interrogation en ce qui concerne l'origine ou la destination de ces échanges entre la rivière et son sous-sol.

Les observations faites sur le bilan de la retenue d'Arnaville laissent supposer que des apports par des sources ne sont pas mesurés au niveau de la station d'Onville. L'origine de ces apports peut être:

- des pertes directement en amont de la station (débits soustraits à la mesure et remis dans le bilan),
- des pertes sur la rivière de la Madine ou partie aval du Rupt de Mad (résurgences, idem),
- des exurgences d'eau d'infiltration sur le bassin versant (accroissement des apports naturels),
- des eaux issues d'infiltration sur le lac de Madine (comptabilisées, sans apparaître, sur le lac),
- des apports exogènes au bassin versant du Rupt de Mad (gain pur pour le bilan du BV).

La solution retenue pour le bilan sur Arnaville est celle de pertes diffuses, non comptabilisées mais faisant partie des pertes sur le bassin versant, et ressortant comme résurgences après la station d'Onville.

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

Une tentative de calculs des éléments du bilan (apports et pertes) sur l'ensemble du système a été menée, sans succès en raison de l'absence de relations évidentes entre les différentes variables hydrologiques (cf « relation pluie/débit). Il a donc été retenue une méthode basée sur l'exploitation des données connues sur la série historique, faisant l'hypothèse que les débits lâchés en plus à la Madine arrivaient **intégralement** ç Arnaville.

Il est également supposé que le fonctionnement du système « pertes/résurgences » n'est pas affecté par un accroissement des volumes lâchés depuis le barrage. Cette hypothèse semble tout à fait plausible en raison des valeurs estimées des pertes, dans la proportion relativement faible de la superficie (et donc la part dans le bilan) du bassin contrôlée par la retenue de la Madine. Cette hypothèse pourrait être vérifiée par l'installation d'un réseau de mesures.

L'utilisation d'une telle modélisation hybride, 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. Ainsi, en termes d'apports sur l'ensemble du bassin :

- les apports naturels du bassin versant de la Madine ont été déduits du bilan effectué à partir des données disponibles sur la retenue.
- les apports naturels du Rupt de Mad, hors bassin versant du barrage de Madine ont été déduits de la différence entre les débits mesurés à Onville et lâchés à la Madine.
- entre Onville et Arnaville, les apports naturels ont été déduits du bilan sur la retenue d'Arnaville.

3.1.3 Représentation du système

La représentation du système étudié tient compte des interventions humaines et des caractéristiques physiques du système hydraulique du Rupt-de-Mad.

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 et de ses ouvrages hydrauliques 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 plan d'eau;
- prélèvements naturels par évaporation sur plan d'eau libre;

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 connection 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.

3.1.4 Initialisation

3.1.4.1 Paramètres

La mise en place du modèle adapté repose sur l'analyse de sensibilité des différents paramètres et leviers de régulation des flux en jeu.

L'indisponibilité de certaines données limite cette phase d'initialisation et nécessite l'utilisation de paramètres estimés sans véritable vérification possible.

Les données manquantes au sein de séries continues (pluviométrie, évaporation) ont pu facilement être reconstituées, avec une corrélation autorisant leur pleine utilisation ($R^2 > 0.99$).

La plus grande incertitude concerne les variations des niveaux des plans d'eau, en raison de l'importance des surfaces et volumes mis en jeu au vu de la précision et de la fréquence des observations (Lac de Madine et, dans une moindre mesure la retenue d'Arnaville, par l'absence totale de suivi).

3.1.4.2 Eléments du modèle

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

3.1.4.2.1 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).

3.1.4.2.2 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.

3.1.4.2.3 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.

3.1.4.2.4 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.

3.1.5 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 peut permettre l'exploitation plus fine des résultats de simulation.

Améliorations possibles dans la modélisation :

Un ensemble de modifications des modes de prélèvement des données ou l'augmentation de la fréquence et du nombre d'observations permettrait d'éclaircir ou affiner certains aspects de la modélisation. Par exemple :

- mesures des débits de sources et pertes le long du Rupt de Mad : parfois localisés, rarement quantifiés, les échanges entre nappes (karst et nappe alluviale) et rivières sont méconnues. Quelques jaugeages en étiage ou en hautes eaux permettraient de mieux cerner dans le temps et l'espace ces éléments importants du bilan hydrique, notamment lorsqu'ils ont lieu entre deux points-clés du système (ex : entre Onville et la retenue d'Arnaville, entre sortie du lac de Madine et Onville...)
- connaissance de l'infiltration directe et diffuse sur les plans d'eau : les pertes des plans d'eau, même si elles paraissent négligeables, participent de fait au bilan hydrique ; leur meilleure connaissance permettrait d'en vérifier l'incidence en étiage et en l'absence de recharge des stocks d'eau.
- meilleure précision dans la mesure de :
 - 1- *niveau du lac de Madine* : l'échelle de mesure n'apportant qu'une précision relative à cause des mouvements du plan d'eau et du mode de lecture et retranscription de la mesure, il est aisé d'améliorer la précision sur cette hauteur d'eau par de simples améliorations de l'échelle (protection contre la houle). Une plus grande fréquence d'observation ou un enregistrement en continu seraient également d'une grande utilité pour affiner les simulations à un pas de temps inférieur.
 - 2- *débits mesurés des cours d'eau* : la forte dispersion des mesures de faibles débits à la station débitmétrique d'Onville demande une vérification régulière par jaugeage afin de caler et corriger les enregistrements continus.
- amélioration de la connaissance de l'hydrologie des cours d'eau : puisqu'il semble exister d'autres stations débitmétriques le long de la Madine et du Rupt de Mad, il serait judicieux d'envisager leur utilisation pour contrôle ou amélioration des mesures actuelles (ex : en sortie du lac de Madine).

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 des années 1996, 1996, 1990, 1986, 1985, 1996 et 1990 choisies sur l'analyse de la série historique) ;

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) ou sur une série fictive sèche (7 années), comparativement à l'existant.

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.

Les simulations sont effectuées avec ou sans contraintes :

- une contrainte absolue (constante) concerne la baisse de niveau à Arnaville, qui ne doit pas dépasser 20 cm (en raison d'une instabilité éventuelle des berges et du risque sur les infrastructures longeant le plan d'eau) ;
- des débits réservés imposés sur les cours d'eau en sortie des retenues (Rupt de Mad et la Madine) ;
- une contrainte (modulable) sur la baisse maximale de niveau du lac de Madine, qui ne peut descendre en deçà de 60 cm en période estivale (Juin à Septembre), sous peine de gêner les utilisations de loisirs ;
- des contraintes de niveaux maximums des plans d'eau, imposés par leur morphologie, ainsi que des contraintes techniques sur les lâchers et les pompages, par les capacités des matériels.

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 ce cas, 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 ».

Les simulations sont alors destinées à estimer les volumes d'eau potentiellement disponibles et utilisables à Arnaville avec un prélèvement à la Madine équivalent au droit d'eau maximum autorisé.

3.2.2.2 Besoins supplémentaires

L'objectif est ici de tester la faisabilité d'un prélèvement supplémentaire de 22000 m³/j pour le bassin ferrifère entre juillet et novembre et de 15000 m³/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 Mm³ 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'améliorer le mode de gestion des lâchés depuis la Madine en fonction des niveaux d'eau observés en aval, sur la retenue d'Arnaville.

Cette adéquation entre gestion automatique et manuelle est vérifiée par la comparaison entre une situation « naturelle », sans aucun lâcher, et sur les pénuries accusées en conséquence à l'aval, dans les conditions définies (exemple : SIM1, sur données historiques). De même, la « bonne » gestion du système apparaît-elle

avec l'examen des volumes surversés à Arnaville, qui doivent être les plus faibles possibles tout en n'occasionnant aucune pénurie de prélèvement.

Dans l'état actuel des simulations et par rapport au pas de temps simulé (mois), il n'apparaît pas d'amélioration sensible en gestion automatisée des ouvrages par rapport à la gestion manuelle actuelle. Les volumes de surverses dans les deux cas sont sensiblement équivalents., tandis que les pénuries accusées à Arnaville en l'absence de lâchers depuis la Madine sont d'un même ordre de grandeur que les lâchers effectifs.

3.2.3 Résultats de simulation

3.2.3.1 Destockage de 10 Mm³ (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 Mm³ (1996)
- maximum : 21.821 Mm³ (1995)
- moyenne : 15.643 Mm³

Pluies sur lac de Madine : 6.324 Mm³ à 10.383 Mm³ (moyenne = 8.390 Mm³)

Evaporation sur lac de Madine : 6.498 Mm³ à 8.090 Mm³ (moyenne = 7.319 Mm³)

Apports naturels du bassin versant du Rupt de Mad (apports hors BV Lac de Madine (1))

- minimum : 48.613 Mm³ (1996)
- maximum : 167.878 Mm³ (1983)
- moyenne : 99.271 Mm³

Apports naturels totaux à Onville:

- minimum : 64.394 Mm³ (1996)
- maximum : 195.609 Mm³ (1983)
- moyenne : 117.455 Mm³

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 déversés 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 déversés 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 déversés à Arnaville : 37.148 Mm³ à 166.661 Mm³ (moyenne = 89.112 Mm³)

3.2.3.2 Demandes supplémentaires en eau (mode demande)

Les caractéristiques des apports naturels sur les plans d'eau et BV sont identiques aux précédentes. Seuls varient les apports résultant de la gestion anthropique au niveau des plans d'eau.

3.2.3.2.1 Sur chronologie historique (1983-97)

Simulations CHRONO3 (sans contrainte), identique à SIM A1, et CHRONO4 (avec contrainte de niveau sur lac de Madine), identique à SIM B1.

3.2.3.2 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 (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 déversés à Arnaville : 45.535 Mm³ à 119.563 Mm³ (moyenne : 62.965 Mm³)

3.2.3.3 Synthèse des simulations avec demandes supplémentaires en eau

(selon séquence historique 1983-97 et selon sécheresse durable) :

Simulations	Série chronologique	Contrainte de niveau	Pénuries maxi. à Arnaville (an)	Pénuries maxi. à Arnaville (mois)	Niveau mini. du lac de Madine
A1 (=Chrono3)	Historique	Sans	0	0	226.64 (-126 cm)
B1 (=Chrono4)	Historique	Avec	3 094 333 m ³	1 942 160 m ³	227.08 (-82 cm)
A2	Sécheresse	Sans	0	0	226.87 (-103 cm)
B2	Sécheresse	Avec	2 322 741 m ³	1 740 990 m ³	227.10 (-80 cm)
B2sur1 (+20 cm)	Sécheresse	Avec	503 093 m ³	503 093 m ³	227.24 (-66/-86)
B2sur2 (+40 cm)	Sécheresse	Avec	0	0	227.40 (-50/-90)

3.2.4 Déficits 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 pompes, 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 Mm³/mois, avec des pénuries annuelles maximales de 3,1 Mm³ (soit 8478 m³ 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.

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 Mm³) 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 m³/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 Mm³ 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 Mm³ à 0,5 Mm³ par an (mois de septembre), tandis qu'une hausse de 40 cm fait disparaître sur la même période.

De plus, les volumes déversés à Arnaville baissent légèrement (signe d'une sensible amélioration de l'usage de l'eau), passant de 62.965 Mm³ en moyenne sur l'année (cf. 3.2.3.2.1) à 62.777 Mm³.

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.

3.2.5.3 Autres propositions

Outre les mesures évoquées, il peut être intéressant de songer à capter les sources situées à l'ouest de la Madine, pour peu que ces sources ne participent pas déjà naturellement à la recharge du lac, ce qui ne ferait qu'apporter une ressource déjà disponible. En l'occurrence, les sources potentiellement intéressantes sont localisées à l'extérieur du BV, donc au-delà la frontière orographique avec les rivières et ruisseaux alimentant la Meuse (sous-bassins versants)...

Autre possibilité, la gestion globale de l'ensemble des étangs dispersés en nombre sur le bassin versant de la Madine et sur le haut BV du Rupt de Mad. Sans nécessairement accroître les volumes d'eau disponibles, les multiples stocks d'eau constitués par ces étangs pourraient participer au soutien du lac et surtout des cours d'eau au cours des périodes critiques. Cette gestion est soumise au bon vouloir des propriétaires de ces étangs privés...

4. Annexes

Liste et descriptif des simulations.

Précision relative des données et solutions proposées.

Situation géographique et communes du bassin versant du Rupt de Mad.

Limites orographiques et cours d'eau du bassin versant.

Bilans hydrologiques sur les plans d'eau et le Rupt de Mad.

Apports et pertes sur le lac de Madine.

Prélèvements et surverses sur la retenues d'Arnaville, lâchures à la Madine.

Modélisation

Représentation du système hydraulique du Rupt de Mad et données attachées.

Représentation systémique dans la modélisation.

Niveau historique du lac de Madine et calage de la modélisation.

Résultats de simulations

Niveaux du lac de Madine avec prélèvements supplémentaires, sur données historiques (1983-97).

Disponibilités en eau à Arnaville avec destockage de 10 Mm3 (Madine), sur données historiques (1983-97).

Détail des pénuries mensuelles accusées à Arnaville avec contrainte de niveau sur lac de Madine (1983-97).

Niveaux du lac de Madine selon différentes simulations en mode « offre » et « demande », sur sécheresse.

Niveaux du lac de madine en demande et situation avec relèvement de la surverse du plan d'eau, sécheresse.

Apports et pénuries sur le plan d'eau d'Arnaville selon ces différentes simulations sur séquence sèche.

Pénuries mensuelles accusées à Arnaville avec contrainte de niveau sur lac de Madine, en sécheresse.