

DM SAND
QSC



P0004/05A

Ecole Nationale Polytechnique d'Alger
LABORATOIRE CONSTRUCTION ET ENVIRONNEMENT

Département Hydraulique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état

Sujet :

**Contribution à l'auscultation des barrages par les
modèles statistiques et les réseaux de neurones.**

Présenté par : Melle I. DJEMAI

Proposé par : Dr A. BERMAD

Année Universitaire : 2004/2005

Remerciements

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Je remercie le bon Dieu de m'avoir donné la foi, le courage et la volonté de faire ce modeste travail.

Au terme de ce mémoire de fin d'étude, je présente tous mes sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce travail.

A mon promoteur Dr A. BERMAD, pour son aide, sa compréhension, sa disponibilité tout au long de ce travail, 7 jours sur 7, ses conseils judicieux et pour sa gentillesse.

Au Pr N. DECHEMIE, pour tout le temps qu'il m'a consacré et pour son aide et ses conseils très réfléchis.

A l'Agence Nationale des Barrages et Transfert représentée par Mme H. FERHAT, Mme H. MOUSSAOUI et Mr F. YAHYAIQUI pour leur disponibilité et leur aide.

A tout le personnel de l'Ecole Nationale Polytechnique, en particulier les enseignants du département Hydraulique.

Dédicaces

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Avant tout, à ma mère, qui sans elle je ne serai jamais arrivée à ce niveau aujourd'hui, à mon père qui ma soutenu tout le long de mes études, à mon petit frère adoré LYES, mes deux sœurs YASMINE et MERIEM pour leur soutien moral et leur aide, et à tous les membres de ma famille petits et grands.

Je tiens à remercier aussi mes amis : NESRINE, NEDJMA, MEHDI et à la personne la plus chère à mon cœur ILLYES. Sans oublier mes camarades de classe et tous ceux qui me connaissent.

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

SOMMAIRE

SOMMAIRE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Introduction générale

Chapitre I Généralités sur l'auscultation des barrages

I-1 Introduction

I-1-2 Sécurité structurale

I-1-3 La surveillance

I-1-4 Le plan en cas d'urgence

I-2 Evolution de l'auscultation des barrages

I-2-1 Relevé des mesures

I-2-2 Suivi des programmes d'auscultation

I-3 Dispositifs automatiques d'auscultation des barrages

Chapitre II Suivi des barrages

II-1 Historique

II-1-1 Conception et sécurité

II-2 Le dispositif d'auscultation

II-2-1 Raison d'être du dispositif d'auscultation

II-2-2 Conception globale du dispositif d'auscultation

II-3 Les paramètres à mesurer sur les barrages

II-3-1 Les paramètres à mesurer sur les barrages en béton

II-3-2 Les paramètres à mesurer sur les barrages en remblai

Chapitre III Dispositifs de mesures

III-1 Principe de l'instrumentation d'auscultation

III-1-2 La mesure des déplacements horizontaux

III-1-3 La mesure des déplacements verticaux

III-1-4 Les mesures de déplacement internes

III-1-5 La mesure des mouvements relatifs

III-1-6 La mesure des contraintes et déformations

III-1-7 La mesure d'inclinaisons	23
III-1-8 La mesure des fuites	24
III-1-9 Les mesures de piézométrie	25
III-1-10 Les essais destinés à évaluer la qualité du béton	27
III-2 Espacement des mesures	28
Chapitre IV Modèle statistique	29
IV-1 Introduction	29
IV-1-1 Méthode HST	30
IV-1-2 Choix des variables	30
IV-1-3 Expression analytique du modèle	31
Chapitre V Les réseaux de neurones	38
V-1 Introduction	38
V-2 Définition	38
V-3 Le neurone artificiel	39
V-3-1 Historique	39
V-3-2 Description architecturale	40
V-4 Propriété des réseaux de neurones	42
V-5 Les mécanismes d'apprentissage	42
V-6 Les différents types de réseaux de neurones	43
V-7 Procédure de développement d'un réseau de neurones	46
Chapitre VI Résultats de la modélisation	51
VI-1 Présentation du barrage de KEDDARA	51
VI-1-1 Situation géographique	51
VI-2 Présentation des données	52
VI-3 Modélisation par les réseaux de neurones	52
VI-3-1 Critères de validation	53
VI-3-2 Construction des modèles	55
VI-4 Application du modèle retenu pour le barrage de TAKSEBT	68
VI-5 Modèle HST	73
VI-5-1 Application pour le barrage de TAKSEBT	74
VI-5-2 Application pour le barrage de KEDDARA	76

Conclusion générale

78

Références bibliographiques

80

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'auscultation des barrages est une tâche essentielle pour permettre une surveillance adéquate d'un ouvrage d'accumulation. Son dispositif est donc incontournable et son étude se fait déjà au stade du projet. Il permet de suivre l'évolution des paramètres à mesurer et de détecter toute anomalie, il permet par ailleurs d'améliorer les connaissances de l'ingénieur

Vu que le sujet est traité modestement en Algérie, on s'est intéressé à la modélisation de l'auscultation des barrages par deux approches différentes :

La première basée sur l'intelligence artificielle utilisant l'imitation du fonctionnement du cerveau humain dans le domaine de la modélisation c'est ce qui communément appelé les réseaux de neurones artificiels (RNA).

La seconde approche est basée sur la statistique, le modèle pris en considération est le modèle HST (Hydrostatique-Saison-Temps), dans ce cadre là les fortes corrélations des différents paramètres rentrants dans le modèle sont prises en considération.

Ce travail est scindé en six chapitres :

Le premier traitant des généralités sur le thème étudié ;

Au niveau du second chapitre, une synthèse des différents paramètres à mesurer pour chaque type de barrage a été décrite ;

Au troisième chapitre, une présentation des différents dispositifs d'auscultation pour différents barrages a été faite.

La méthode HST a été décrite au quatrième chapitre ;

Le cinquième chapitre traite la théorie des réseaux de neurones ;

Enfin une application sur deux barrages algériens à savoir Keddara et Taksebt a été réalisée.

L'auscultation des barrages est primordiale car elle permet de détecter et/ou de prévoir à temps d'éventuelles anomalies pouvant surgir sur la structure du barrage.

Lors de l'exploitation cela permettra non seulement d'appréhender d'éventuelles situations catastrophiques et d'y faire face mais aussi de minimiser les coûts d'exploitation qui sont en général très élevés.

CHAPITRE I

Généralités sur l'auscultation des barrages

GENERALITES SUR L'AUSCULTATION DES BARRAGES

I-1 Introduction

Les ouvrages d'accumulation sont des constructions particulières qui en cas de rupture peuvent entraîner des dégâts considérables. Cela justifie les hautes exigences imposées en ce qui concerne le projet, la réalisation, l'exploitation et le contrôle de tels ouvrages.

Pour garantir un haut niveau de sécurité et pour minimiser le risque résiduel, c'est à dire d'être en mesure de détecter toute anomalie du comportement des ouvrages ainsi que de leurs fondations et de leurs environs, une approche globale de la sécurité a été développée et qui repose sur les trois piliers suivants :

- La sécurité structurale.
- La surveillance.
- Le plan en cas d'urgence.

I-1-2 La sécurité structurale

Au niveau de la sécurité structurale, cela implique une conception et une réalisation optimale des ouvrages, il est important que ces derniers soient conçus et réalisés de telle façon que leur sécurité soit garantie pour tous les cas de charges et d'exploitation prévisibles en égard à l'état des connaissances scientifiques et techniques. La vérification d'un ouvrage d'accumulation implique la prise en compte de tous les paramètres qui peuvent le solliciter. On distingue des actions permanentes comme celles du poids propre, des actions variables comme celles de la poussée de l'eau et des conditions climatiques, enfin des actions accidentelles comme les crues et les tremblements de terre. Des dispositifs constructifs sont pris pour permettre en cas de besoin, grâce à des organes de décharges (vidanges de fond), d'abaisser le niveau du plan d'eau, voire de vidanger totalement une retenue dans les meilleurs délais, et de pouvoir dans le cas échéant la maintenir vide.

I-1-3 La surveillance

Il est primordial de procéder à une surveillance régulière et stricte de l'aménagement afin de connaître et, si possible, de prévenir toute dégradation afin de le maintenir en bon état de sécurité et ainsi être apte à remplir ses fonctions. On cherche principalement à détecter les évolutions, celles-ci sont généralement très lentes, mais le risque d'une évolution rapide n'est pas totalement exclu, notamment pour les barrages en terre. Un système de surveillance, dont l'efficacité a été reconnue, est basé sur un contrôle à 4 niveaux : exploitants, ingénieurs spécialisés, experts et organisme indépendant. Les tâches prévues, qui doivent permettre une appréciation de l'état et du comportement de l'ouvrage sont les suivantes :

- Des mesures directes grâce à un dispositif d'auscultation.
- Des contrôles visuels.
- Des contrôles et essais de fonctionnement des éléments mobiles des organes de décharges (vidange de fond) et autres équipements électromécaniques (Lazzarotto, 1998).

Ces mesures sont complétées par des examens périodiques de la sécurité et par des analyses particulières (analyse d'anciens ouvrages, sécurité vis-à-vis d'événements naturels). Les contrôles visuels sont importants car ils permettent non seulement de vérifier l'état de l'ouvrage d'accumulation et de ses ouvrages annexes, mais aussi d'observer les parties visibles des fondations, et la tenue des versants de la retenue, c'est une méthode qualitative qui est fondamentale car elle intègre le maximum de paramètres. Il faut savoir qu'au niveau mondial près des 70% des événements particuliers concernant un ouvrage d'accumulation ont été mis en évidence par des contrôles visuels (voir figure I.1) (Bremen et all, 2002).

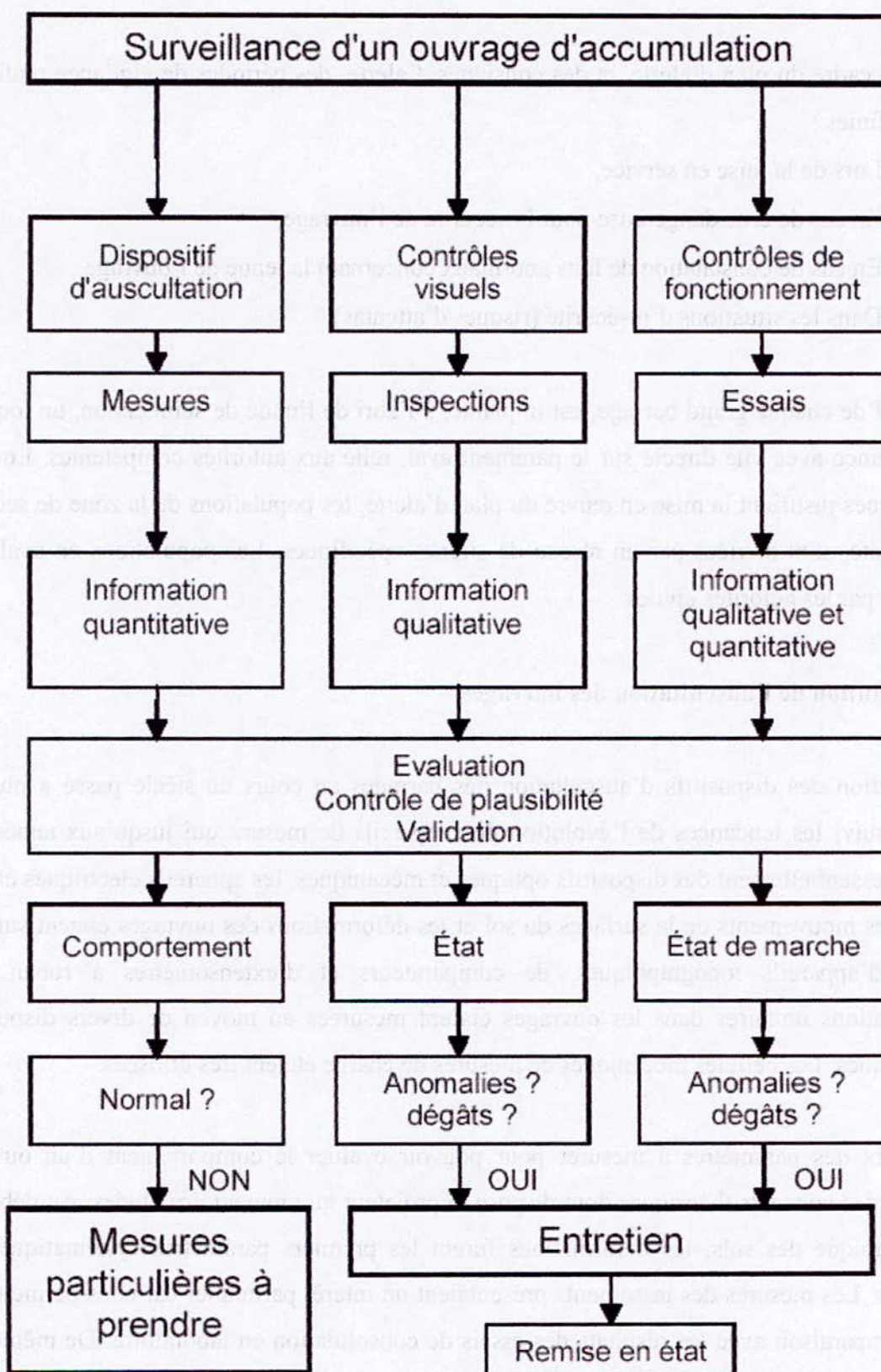


Figure I.1 : Concept global de l'organisation de la surveillance.

I-1-4 Le plan en cas d'urgence

Dans le cadre du plan d'alerte, et des consignes d'alerte, des périodes de vigilance renforcée sont définies :

- Lors de la mise en service,
- En cas de crue dangereuse pour la sécurité de l'ouvrage,
- En cas de constatation de faits anormaux concernant la tenue de l'ouvrage,
- Dans les situations d'insécurité (risques d'attentats).

A l'aval de chaque grand barrage, est implanté, à l'abri de l'onde de submersion, un local de surveillance avec vue directe sur le parement aval, relié aux autorités compétentes. Lorsque des risques justifient la mise en œuvre du plan d'alerte, les populations de la zone de sécurité immédiate, sont alertées par un réseau de sirènes spécifiques. Les populations en aval sont alertées par les autorités civiles.

I-2 Evolution de l'auscultation des barrages

L'évolution des dispositifs d'auscultation des barrages au cours du siècle passé a plus ou moins suivi les tendances de l'évolution des appareils de mesure qui jusqu'aux années 30 étaient essentiellement des dispositifs optiques et mécaniques, les appareils électriques étaient rares; les mouvements de la surfaces du sol et les déformations des ouvrages étaient suivis à l'aide d'appareils topographiques, de comparateurs et d'extensomètres à ruban. Les déformations unitaires dans les ouvrages étaient mesurées au moyen de divers dispositifs mécaniques. Les cellules mécaniques de mesures de charge étaient très utilisées.

Le choix des paramètres à mesurer pour pouvoir évaluer le comportement d'un ouvrage dépend des concepts théoriques dont dispose le projecteur au moment des études. Au début de la mécanique des sols, les déformations furent les premiers paramètres systématiquement mesurés. Les mesures des tassements présentaient un intérêt particulier car elles permettaient leur comparaison avec les résultats des essais de consolidation en laboratoire. De même, les variations de la vitesse de déformation servaient d'indicateur d'instabilité de l'ouvrage. A cette époque, les mesures in situ étaient constituées principalement d'observations à distance et du contrôle systématique des déplacements de l'ouvrage et des mouvements de la surface

du sol. Les mesures faisaient appel essentiellement aux méthodes géodésiques : mesures des niveaux, des angles horizontaux et verticaux, des distances par rapport à des repères fixes. Au début du siècle, la géodésie étant déjà une technique éprouvée et maîtrisée, les premières compagnes de mesure des déformations étaient tout à fait réussies.

Toutefois, les déformations mesurées ne sauraient à elles seules définir le comportement d'un ouvrage. L'introduction en mécanique des sols et en mécanique des roches, de la notion de contrainte effective a fait que l'on a délaissé les mesures de déformation au profit des mesures de pression interstitielle et de pression totale. Cette période a vu le développement d'un grand nombre de différents capteurs de pression interstitielle et de pression totale. Par la suite, des études théoriques et des études en laboratoire sur la relation entre la pression interstitielle et la déformation unitaire dans le sol ont conduit à la mesure des déformations unitaires in situ. La phase finale de cette évolution ayant abouti à la situation actuelle a résulté de l'introduction de puissants ordinateurs dans les années 60. Cette évolution associée aux techniques de calcul numérique, a permis de faire des prévisions analytiques sophistiquées du comportement des ouvrages. Mais la modélisation numérique n'a pas diminué l'importance des mesures in situ, au contraire les mesures in situ permettent de valider ces prévisions analytiques, et c'est là que réside la promesse de réels progrès dans le domaine de la géotechnique (Hanna, 1985).

I-2-1 Relevé des mesures

Parmi les progrès dans le domaine des appareils d'auscultation qu'a connu le 20ème siècle, ceux relatifs aux dispositifs de lecture sont les plus spectaculaires et les plus souhaités, il s'agit d'une évolution par étapes.

Au début, la lecture des appareils électriques était une tâche difficile et coûteuse. Toute la chaîne était analogique, les relevés consistaient à tourner des boutons pour accorder des circuits, à actionner des interrupteurs pour faire des réglages, et ainsi de suite, après ces manipulations, la valeur était lue sur un compteur analogique ou sur un cadran gradué, et notée manuellement. La lecture des capteurs à corde vibrante était une opération particulièrement délicate, car le signal de sortie était une fréquence transitoire. Les postes de mesure n'étaient pas très portables. Ils étaient généralement de grandes dimensions et fonctionnaient habituellement sur courant alternatif. Parfois, des enregistrements graphiques ou analogiques sur bande étaient effectués, mais de tels dispositifs automatiques n'étaient pas d'un usage courant.

Les convertisseurs analogiques numériques sont apparus à la fin des années 50, ce qui a permis de relever les valeurs mesurées directement sous forme digitale dans la génération suivante d'appareils de lecture. Les premiers appareils étaient souvent encombrants. La miniaturisation des composants électroniques, l'apparition des écrans à cristaux liquides, des diodes électroluminescentes et des microprocesseurs dans les années 70 ont eu un profond impact sur la conception des postes de mesure, qui devenaient moins encombrants, utilisaient moins d'énergie et étaient plus simples à utiliser. Des lectures manuelles ou automatiques étaient possibles, et les données pouvaient être traitées, imprimées et stockées. En ce début de 21^{ème} siècle, la collecte et l'enregistrement des données, qui dans le passé étaient difficiles, coûteuses et délicates sont devenus des tâches plus faciles à exécuter (Dibiagio, 2000).

I-2-2 Suivi des programmes d'auscultation

Les deux principaux problèmes concernent, d'une part, le traitement et la présentation des relevés, et d'autre part, l'analyse des données et l'établissement de rapports. Au début, le traitement des données était manuel, d'abord à l'aide de règles à calcul, puis au moyen de calculateurs à main. Les résultats étaient présentés sous forme de tableaux et graphiques établis à la main. Le délai séparant le relevé des mesures et la présentation des résultats était souvent trop long. Mais heureusement ce problème n'existe pratiquement plus, compte tenu de l'introduction d'ordinateurs et de logiciels spéciaux. Par contre, le deuxième problème est encore d'actualité, l'effort d'analyse et d'interprétation est fréquemment trop faible, et sans commune mesure avec les informations contenues dans les données.

Dans bien des cas, au cours des années, des techniques ont été développées, mais ces données et leur contenu en informations technique n'ont pas été bien exploités à leur juste valeur. Ce n'est pas un problème d'appareil, mais il survient lorsque trop peu d'attention est accordée aux activités d'interprétation et de présentation des résultats lors de l'établissement du projet. La seule solution est d'affecter les moyens nécessaires à l'exploitation efficace des données (Dibiagio, 2000).

I-3 Dispositifs automatiques d'auscultation des barrages

Des améliorations considérables ont été réalisées dans le matériel et la méthodologie au cours des dernières décennies. Il en résulte que nous disposons maintenant d'un grand nombre

d'appareils éprouvés et robustes, bien adaptés aux applications courantes lorsqu'ils sont convenablement installés, protégés et exploités. La recherche de dispositifs automatiques d'auscultation a débuté dans les années 70 lorsque les ordinateurs ont allégé la tâche fastidieuse de traitement et de présentation des données. Ensuite, les progrès rapides en électronique et en informatique, associés à la baisse des coûts et à l'extension de l'utilisation des capteurs électriques, ont suscité un intérêt considérable pour les dispositifs automatiques d'auscultation des barrages.

Si bien qu'aujourd'hui, de plus en plus de maître d'ouvrage auscultent les barrages au moyen de ces dispositifs automatiques.

Les programmes d'auscultation des barrages sont généralement très différents des applications des appareils de mesure en géotechnique, par leur durée. De nombreux barrages sont auscultés en permanence pendant plusieurs décennies. Par conséquent, les barrages ont servi de banc d'essai pour la stabilité et la fiabilité à long terme des appareils. Ils ont permis d'établir une documentation excellente sur le comportement et la fiabilité à long terme des appareils de mesure.

Les dispositifs automatiques d'auscultation sont un outil puissant qui, convenablement mis en œuvre, apportent une contribution inestimable à la capacité de projeter, construire et exploiter en toute sécurité les barrages de tous types. Ces dispositifs associent du matériel et des méthodologies venant des domaines de la métrologie et de l'informatique, pour former une chaîne de mesure. Celle-ci sert à quantifier et à transformer les informations physiques, de façon automatique, pour en faire une présentation facilitant leur analyse et leur interprétation. Les deux domaines cités, métrologie et informatique, sont très dynamiques et évoluent très vite, sans signe de ralentissement dans le proche avenir. On peut s'attendre à assister à une évolution continue et importante dans la conception, le fonctionnement et l'utilisation des systèmes automatiques d'auscultation des barrages (Dibiagio, 2000).

CHAPITRE II

Suivi des barrages

SUIVI DES BARRAGES

II-1 Historique

Le premier barrage connu a été construit en Egypte, vers 4000 AV JC, pour faire dévier le Nil afin de créer un site pour la ville de Memphis. De nombreux barrages en terre ont été bâtis durant l'Antiquité notamment par les Babyloniens pour former des systèmes d'irrigation élaborés, qui ont permis de rendre fertiles des régions jusque là improductive et d'alimenter en eau d'importantes populations.

Par la suite, l'homme a eu l'idée d'utiliser l'énergie des cours d'eau pour faire tourner des moulins. En raison des ravages provoqués par les inondations périodiques, peu de barrages vieux de plus d'un siècle sont encore en fonction.

Aujourd'hui, il existe dans le monde plus de 35000 barrages d'une hauteur supérieure à 15 m, et plus de 1500 grands barrages sont en construction (Encarta, 2004).

II-1-1 Conception et sécurité

Sous l'effort de l'eau, le barrage se déforme, se déplace et pousse les montagnes qui bordent la rivière. A force de bouger le barrage peut finir par s'écrouler. Chaque année se produit en moyenne un accident de barrage dans le monde avec parfois des milliers de morts.

En plus de la pression de l'eau, il existe plusieurs phénomènes pouvant dégrader, voire détruire un barrage qu'ils soient d'origine technologique (défaut de conception, de construction ou de matériaux), d'origine naturelle (crue exceptionnelle, inondation, mouvement de terre et séisme), ou d'origine humaine (erreur d'exploitation, de surveillance et d'entretien, malveillance, sabotage, attentat).

Les conséquences d'une rupture de barrage étant très graves, ces édifices doivent être conçus minutieusement avec d'importantes marges de sécurité, puis surveillés en permanence pendant et après leur réalisation.

La conception d'un barrage doit tenir compte des caractéristiques hydrologiques, topographiques et géologiques du milieu où il sera construit.

II-2 Le dispositif d'auscultation

Le dispositif d'auscultation est un système de mesures judicieusement conçu permettant de juger, par le suivi de paramètres représentatifs, le comportement du barrage et de ses fondations en regard des charges qui les sollicitent. Il doit aussi être en mesure de livrer des informations relatives au milieu environnant.

Le dispositif d'auscultation a entre autres les objectifs suivants:

- exécuter des contrôles pendant la construction et le premier remplissage ;
- exécuter des contrôles pendant l'exploitation ;
- disposer de renseignements complémentaires en cas d'anomalie de comportement ;
- compléter et améliorer les connaissances de l'ingénieur (recherches techniques ou scientifiques).

Il est primordial d'apporter un soin particulier au choix des instruments de mesure et à leur mise en place afin de garantir une excellente fiabilité des mesures et une interprétation correcte des résultats.

II-2-1 Raison d'être du dispositif d'auscultation

C'est un des éléments-clés permettant d'assurer une surveillance adéquate d'un barrage et d'en garantir la sécurité. Ce système est incontournable et son étude se fait déjà au stade du projet. Son but est de pouvoir suivre à long terme le comportement de l'ouvrage, de ses fondations et de ses environs en garantissent une détection rapide de tout comportement anormal.

II-2-2 Conception globale du dispositif d'auscultation

Celui-ci doit être conçu de telle façon qu'il soit possible de mesurer les charges telles que la poussée hydrostatique, ou la température qui sollicite l'ouvrage et aussi les différents paramètres qui caractérisent le comportement d'un ouvrage de retenue. Il doit être adapté aux particularités et à l'importance du barrage. Bien que l'ouvrage de retenue et ses fondations constituent un ensemble, il doit aussi permettre de distinguer clairement le comportement de l'ouvrage de retenue, de celui de ses fondations, et de ses environs. En outre, un dispositif d'auscultation n'est pas un système figé. En effet, il est bon d'examiner périodiquement s'il

satisfait toujours aux exigences et aux besoins; si nécessaire, il est complété, adapté, voire modernisé.

II-3 Les paramètres à mesurer sur les barrages

Le tableau II.1 donne les principaux paramètres qui doivent être relevés pour les barrages en béton et en remblai, ainsi qu'en fondation. Dans le cas d'un système de mesures permanentes, les informations qui figurent dans le tableau (II.2) sont utiles pour conduire une analyse à distance du comportement. Il n'est pas indispensable de prévoir la saisie automatique de tous les points de mesure (Bremen et all, 2002).

Tableau II.1 : Les paramètres significatifs pour le contrôle du barrage.

BARRAGE EN BÉTON	BARRAGE EN REMBLAI	FONDATEMENTS
Déformations de la structure	Déformations du corps de la digue	Déformations Mouvement des appuis
Mouvements particuliers (fissures, joints)	Mouvements particuliers (liaisons avec une structure béton)	Mouvements particuliers (fissures, diaclases)
Température dans le corps du barrage	Température dans le corps de la digue pour la détection de percolation (éventuel)	Température dans la fondation pour la détection de percolation (éventuel)
Sous-pressions (au contact béton-fondation)	Pressions interstitielles dans le corps du barrage en remblai et niveau piézométrique	Pressions interstitielles Sous-pressions au contact béton-fondation et dans le rocher Niveau piézométrique
Débits de fuites et de drainage, infiltration	Débits de fuites et de drainage	Débits de fuites, de drainage, résurgences
Chimisme des eaux de percolation Turbidité (éventuelle)	Chimisme des eaux de percolation Turbidité	Chimisme des eaux de percolation Turbidité

Tableau II.2 : Les paramètres pouvant faire l'objet d'une mesure continue.

POUR TOUS LES OUVRAGES	POUR LES BARRAGES EN BETON	POUR LES BARRAGES EN REMBLAI
Niveau du plan d'eau	Déformations caractéristiques (par exemple, déformation totale dans une section)	Débits de percolation et de drainage caractéristiques (par exemple, débit total)
Conditions météorologiques (précipitations)	Température du béton	Pressions interstitielles
	Débits de fuite et de drainage en des points particuliers	Turbidité des eaux de percolation

II-3-1 Les paramètres à mesurer sur les barrages en béton

1) Déformation de la structure

Le but est de connaître les déformations horizontales et verticales de la structure. Selon la configuration du barrage (avec ou sans galeries et/ou puits), les points de mesure sont situés, à différents niveaux, à l'intérieur du barrage, ou fixés sur son parement aval. Si possible, les lignes de mesure sont prolongées dans le rocher, pour connaître entre autres le déplacement au niveau de la fondation.

En ce qui concerne les déformations radiales et tangentielles, elles peuvent être déterminées par des mesures de pendules directs et/ou inversés le long de lignes verticales, et par la mesure de polygones le long de lignes horizontales. Le nivellement permet de connaître les mouvements verticaux (tassement ou soulèvement) de l'ouvrage. Dans le cas de l'installation d'un nouveau pendule inversé, les techniques actuelles de forage permettent de garantir leur verticalité.

2) Déplacements du barrage et de sa fondation

Les effets de la charge d'eau, de la température, du retrait du béton, de son fluage sous contrainte, de l'adaptation des fondations, se traduisent par des déplacements de l'ouvrage. La

fondation doit être d'autant plus surveillée que les études faites avant construction décrivent rarement l'intégralité des caractéristiques du massif.

3) Débit de fuite à travers le barrage et sa fondation

En ce qui concerne les débits d'infiltration, ils peuvent varier en fonction du niveau de la retenue, et aussi être influencés par les conditions atmosphériques, ou la fonte des neiges. On cherche à effectuer des mesures de débits partiels en déterminant des zones de provenance. Ce procédé permet, en cas d'anomalie, de localiser la zone critique, et de faciliter la recherche des causes.

On mesure également les débits provenant de drainages ou de galeries de drainage.

Une diminution du débit peut indiquer un colmatage des drains.

La détermination du débit peut être volumétrique, s'effectuer au moyen d'un déversoir, d'un venturi ou par la mesure du flux dans un tube.

Ils constituent un outil de 1^{er} ordre facile à mettre en œuvre, permettant d'évaluer la qualité de la barrière hydraulique mais aussi la stabilité de la structure.

4) Sous pressions dans les fondations

Le relevé des sous-pressions est important, car celles-ci ont une incidence marquée sur la stabilité des barrages-poids et des appuis des barrages-voûtes. Les sous-pressions, qui concernent en priorité le comportement de la fondation, sont mesurées au niveau du contact béton-rocher et à différentes profondeurs dans la fondation.

Elles sont dues à la percolation de l'eau à travers le barrage et les fondations. Elles constituent un critère de stabilité notable.

5) Déformations particulières

Les barrages en béton ne sont pas exempts de fissures. Si, parfois, le relevé visuel des fissures et leur report sur plan sont suffisants, il est indiqué de suivre le mouvement des lèvres de certaines fissures particulières. Du moins, il est possible de placer des témoins (en ciment) à cheval sur la fissure, toutefois ce procédé ne représente pas une solution optimale.

En outre, des repères sont aussi mis en place pour la mesure des mouvements des joints de la structure.

6) Températures

Durant la phase de construction, il s'agit de suivre l'évolution de la température du béton pendant sa phase d'hydratation, et de durcissement. Ensuite, en cours d'exploitation, il est utile de suivre les variations des températures afin de déterminer leurs incidences sur les déformations. Les thermomètres sont placés directement dans la masse lors du bétonnage. Ils sont implantés à plusieurs niveaux et répartis sur l'épaisseur du mur. Les thermomètres situés près de la surface sont fortement influencés par les conditions extérieures locales (températures de l'air et de l'eau).

II-3-2 Les paramètres à mesurer sur les barrages en remblai

1) Déplacements verticaux et horizontaux dans les parements

L'amplitude des déplacements est nettement plus importante que sur les barrages en béton et permet de déterminer les conditions de stabilité du barrage (les masques amonts doivent être particulièrement surveillés de ce point de vue).

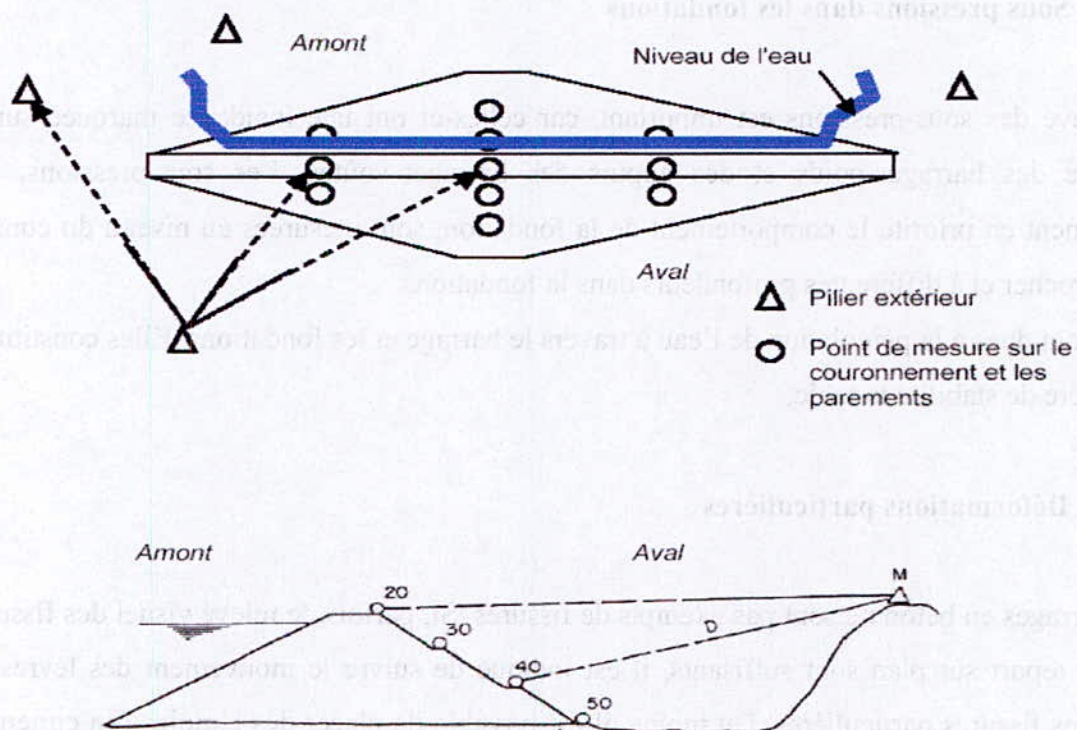


Figure II.1 : Mesure de déformations verticales et horizontales à partir de points de mesures situés sur le parement.

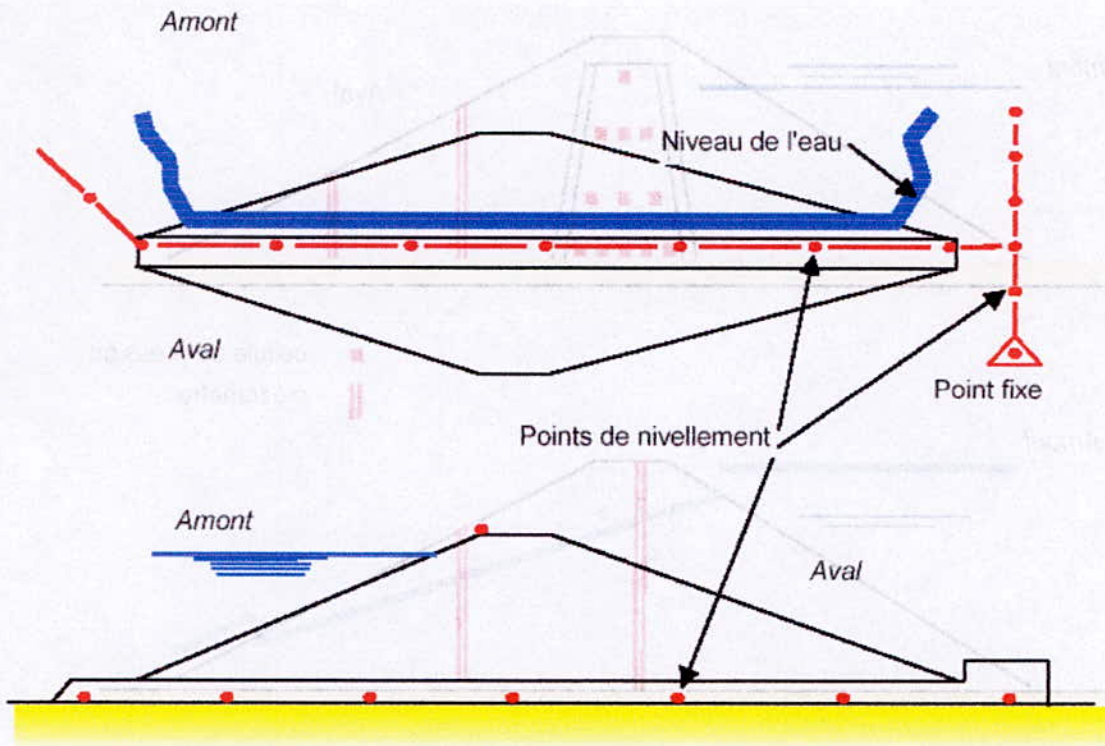


Figure II.2 : Mesure des déformations verticales (tassements) au niveau du couronnement et dans une galerie sous digue.

2) Pressions hydrauliques internes

Les digues sont le siège d'écoulement permanents, car constituées de matériaux plus ou moins perméables, générateurs de contraintes (pressions d'écoulement), et d'effets dynamiques (érosion interne), et chimiques (dissolution).

Les infiltrations à travers un barrage en remblai peuvent entraîner des particules de matériau et conduire par érosion interne à la création de canaux qui peuvent progressivement s'agrandir. Ce phénomène d'érosion est connu sous le nom du phénomène de renard et doit être analysé. Par ailleurs, il faut vérifier si, sous l'effet des pressions d'infiltration (sous pressions), il n'existe pas un risque de soulèvement de parties de l'ouvrage.

Les pressions interstitielles peuvent varier avec le temps, la perméabilité, la charge hydrostatique et les conditions de drainage.

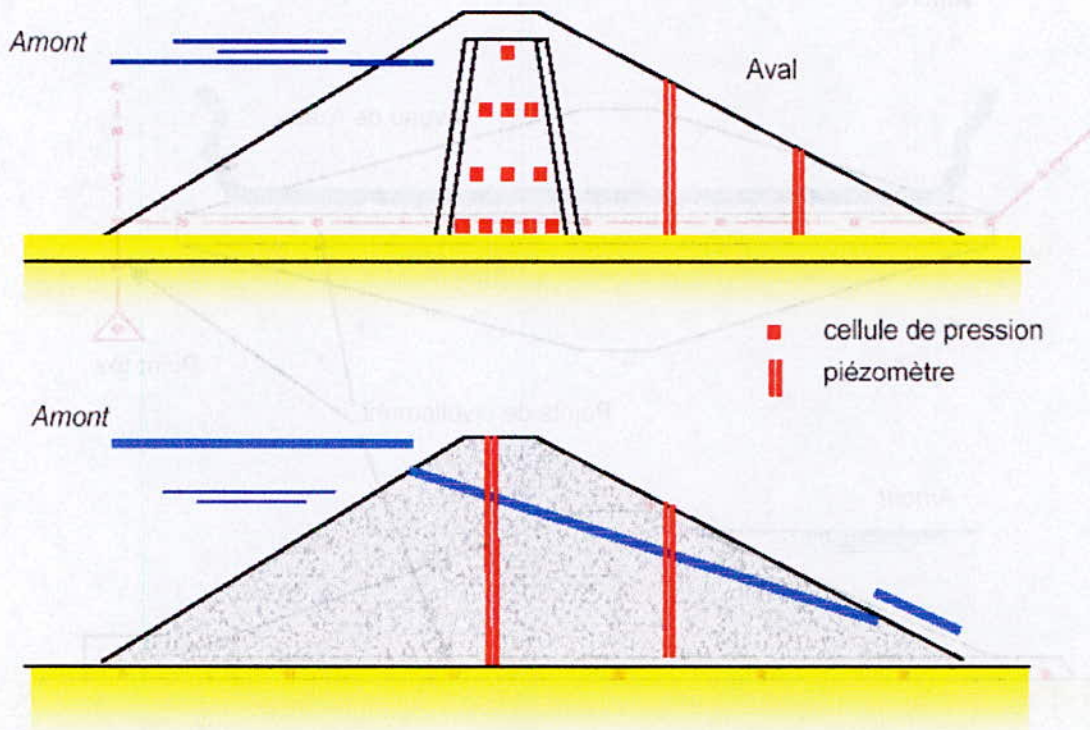


Figure II.3 : Mesure des pressions interstitielles et du niveau piézométrique.

3) Débits de percolation

Ils posent les mêmes problèmes que pour les barrages en béton, mais ne peuvent être connus qu'à partir de la pente moyenne de la nappe dans la digue, et du coefficient de perméabilité de la fondation (Lazzarotto, 2000).

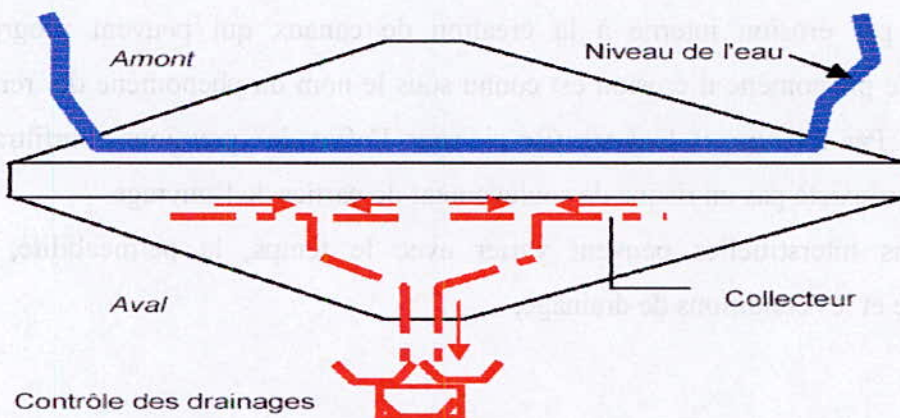


Figure II.4 : Représentation schématique de la collecte des eaux de percolation et de la mesure des débits partiels et total.

CHAPITRE III

Dispositifs de mesures

DISPOSITIFS DE MESURES

III-1 Principe de l'instrumentation d'auscultation

Tout d'abord, l'étendu du dispositif prend en compte la différence entre les ouvrages neufs et les ouvrages en exploitation. Les ouvrages neufs sont particulièrement surveillés lors de leur première mise en eau : il s'agit en effet de recueillir un maximum d'informations sur les comportements mécaniques et hydrauliques du barrage afin de les comparer aux calculs et de détecter ainsi tout comportement anormal. On utilise dans ce cas là un dispositif comprenant un grand nombre d'appareils, éventuellement très sophistiqués, mais dont la durée de vie est assez courte.

Dans le cas des barrages qui ont franchi ce stade avec succès, on se contente d'appareils simplifiés dont le fonctionnement doit rester correct sur plusieurs dizaines d'années et dont l'entretien et l'accessibilité est facile. Ce dispositif est étendu et adapté aux problèmes que l'on peut rencontrer.

Le dispositif est également adapté en fonction du type de problèmes que l'on est susceptible de rencontrer dans les barrages. Par exemple, pour un barrage poids, l'expérience montre que les mouvements sont trop faibles pour permettre l'utilisation de la topographie optique.

Le dispositif doit être de bonne qualité, facile et rapide d'utilisation afin d'obtenir des mesures de bonne qualité et compatibles avec la vitesse du phénomènes étudié. Il faut préciser que la télémessure prend une place grandissante dans l'auscultation.

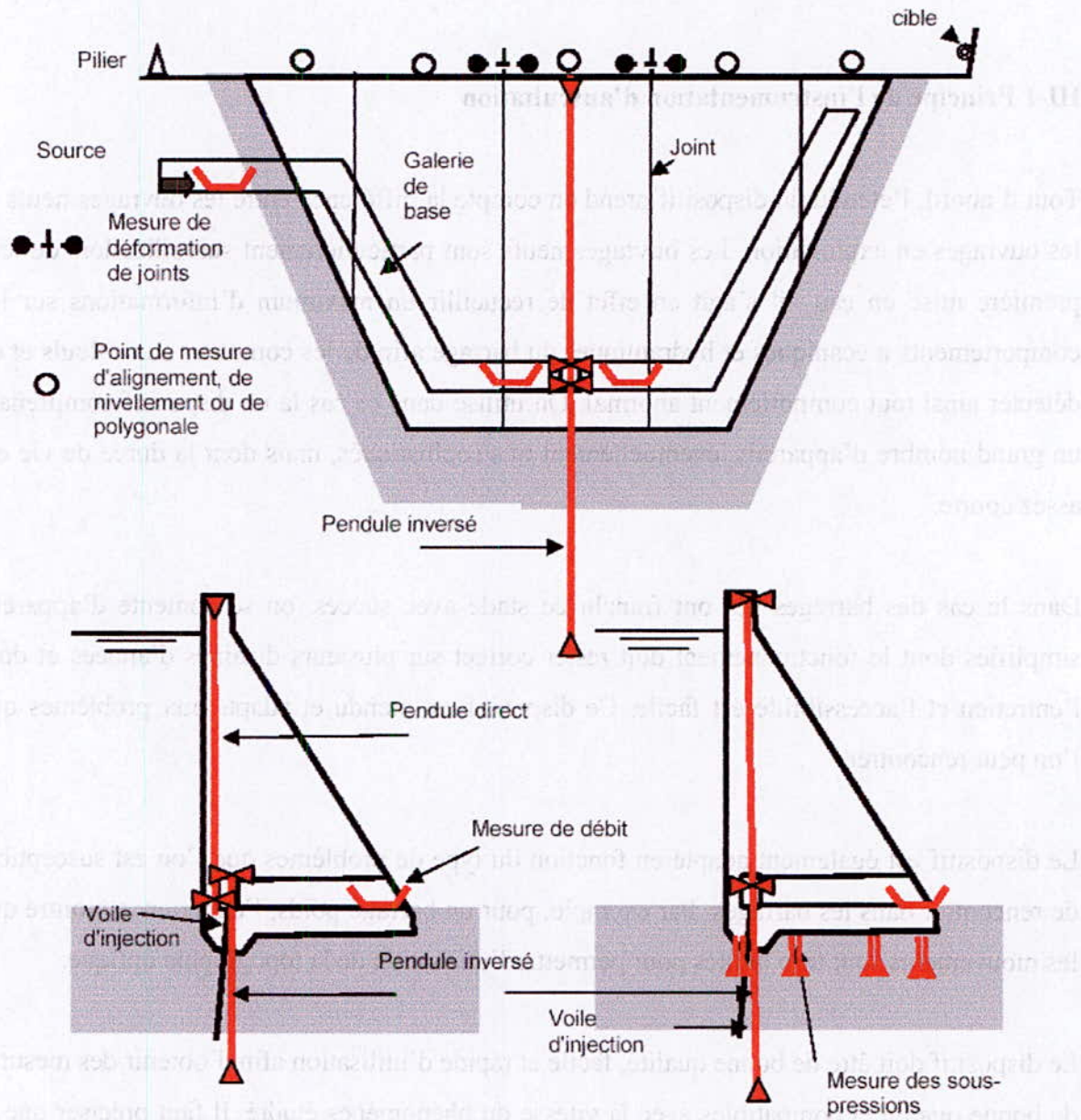


Figure III.1 : Représentation schématique d'un dispositif d'auscultation minimal.

III-1-2 La mesure des déplacements horizontaux

- **La topographie**

Le principe est de déterminer à l'aide de visées horizontales entre des points fixes (piliers) de coordonnées connues, et des points mobiles matérialisés par des cocardes dont les coordonnées peuvent ensuite être calculées. Les visées sont effectuées depuis les piliers (plots en béton normalisés fondés si possible sur le rocher) avec des théodolites.

Les systèmes optiques ont pour principal inconvénient de nécessiter l'intervention de spécialistes, les relevés ne sont donc pas fréquents (2 fois par an) et donnent des résultats peu denses (handicap pour l'exploitation statistique). De plus, la méthode ayant une précision de 2 à 5 millimètres, on se trouve à l'amplitude maximum du phénomène recherché, les dispositifs de planimétrie sont peu à peu éliminés des ouvrages en béton. Il faut quand même préciser que l'entretien du dispositif est minimum.

- **Le traitement des mesures**

Il s'effectue soit manuellement, soit à l'aide de l'informatique. La méthode manuelle n'est désormais plus utilisée vu l'existence dans le commerce de logiciels adaptés à la planimétrie. Du fait de la grande quantité de mesures par rapport au nombre de points à déterminer, on procède à une méthode de compensation des erreurs angulaires par moindres carrés qui donne finalement la position la plus probable du point de visé ainsi que l'incertitude sur sa mesure (Lazzarotto, 2000).

- **La distancemétrie optique**

Il s'agit de déterminer une distance à partir du temps de parcours des ondes infrarouges émises par un émetteur-récepteur (placé sur un pilier) sur un réflecteur (placé sur le point dont on cherche la position). L'appareil émet en fait deux rayons infrarouges de longueurs d'ondes différentes dont la mesure de déphasage permet d'obtenir la distance.

III-1-3 La mesure des déplacements verticaux

- **Le nivellement géodésique**

Le principe est exactement le même que celui de la topographie et permet de mesurer des points inaccessibles avec la méthode du nivellement optique direct.



Figure III.2 : Le nivellement.

- **Le nivellement optique direct**

Il consiste à utiliser l'horizontale d'un niveau optique pour mesurer sur une règle graduée la dénivellation entre deux points. Les niveaux optiques sont de grande précision et désormais électroniques. Ils sont disposés entre les règles fabriquées en INVAR placées sur des repères fixes ou mobiles « crapauds ». Les portées sont de vingt mètres, et se font le long de cheminements linéaires ou en boucle. La précision de la méthode est excellente ; environ 1 mm pour 200 m de cheminement. En plus, le traitement des données est très facile.

Cette méthode est particulièrement adaptée aux digues en terre, de même que pour la topographie, les mesures nécessitent des spécialistes et ne peuvent donc être réalisées que deux fois par an.

III-1-4 Les mesures de déplacements internes

Elles permettent de découvrir des déplacements dans la masse des structures, elles sont mesurées à partir de tassomètres, de pendules et aussi par des méthodes utilisant des fils.

- **Les tassomètres**

Ces dispositifs présentent quelques inconvénients ; d'une part leur inaccessibilité empêche toute réparation, ils doivent par conséquent être très robustes car ils supportent des charges considérables, et d'autre part, leur mise en place ne doit pas constituer un risque des points de vue électrique et hydraulique ; enfin, la transmission hydraulique de l'information est une source d'erreur. Mais même si leur durée de vie est limitée, leur intérêt est grand lors de la consolidation du remblai.

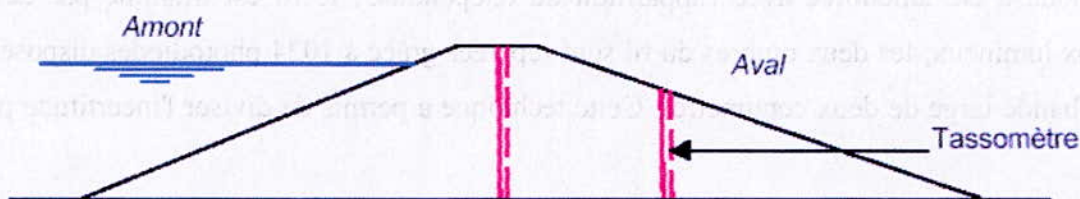


Figure III.3 : Mesure des tassements d'un barrage en remblai par tassomètres.

- **Les tassomètres du type téléniveaux électriques**

Le principe de ce système est celui des vases communicants ; l'altitude d'un capteur est déterminée à l'aide d'une mire située à l'extérieur du remblai. Après remplissage des tubes et débordement, l'altitude relative est lue sur la mire. Des déplacements absolus peuvent être réalisés si la mire est raccordée à un repère de nivellement direct.

- **Les pendules**

Le principe du pendule est de mesurer le déplacement horizontal relatif de deux points superposés, grâce à un fil ancré d'un côté et libre de l'autre.

Il existe deux sortes de pendules : les pendules directs (ancrés par leur extrémité supérieure), et les pendules inverses (ancrés par leur extrémité inférieure, la partie supérieure étant fixée à un flotteur). On combine en général ces deux types de pendules sur les mêmes verticales pour obtenir les déformations sur toute la hauteur du barrage.

Le pendule est installé dans un tube à l'abri de l'air (et des perturbations du vent), d'un diamètre d'au moins 60 mm, qui doit absorber la quantité maximale de mouvements prévus, ce tube doit être parfaitement vertical. Les données des pendules sont obtenues grâce à des tables de lecture disposées le plus près possible de l'extrémité attachée au flotteur; ces tables permettent à un opérateur de donner la position exacte du fil sur un plan horizontal grâce à deux viseurs croisés, posés sur des réglottes ; la lecture des réglottes donne deux valeurs qu'il faut poser sur une abaque qui va donner le déplacement relatif de l'ouvrage au niveau de la table par rapport à l'extrémité ancrée (Bremen et all, 2002).

La méthode a été améliorée avec l'apparition du télépendule, le fil est illuminé par deux faisceaux lumineux; les deux ombres du fil sont repérées grâce à 1024 photodiodes disposées sur une bande large de deux centimètres. Cette technique a permis de diviser l'incertitude par dix.

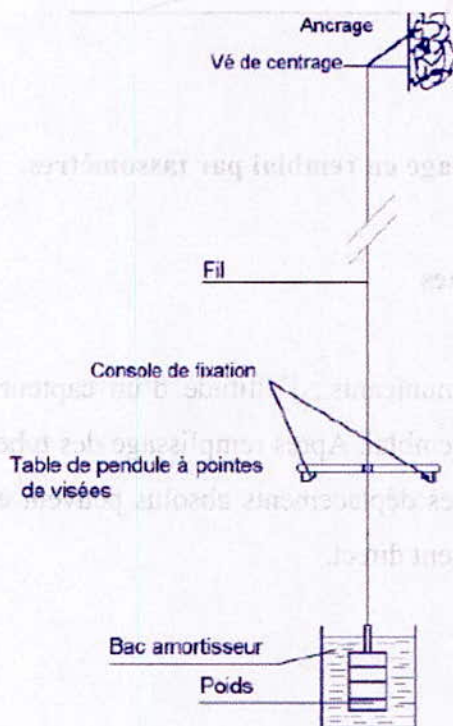


Figure III.4 : Le pendule directe.

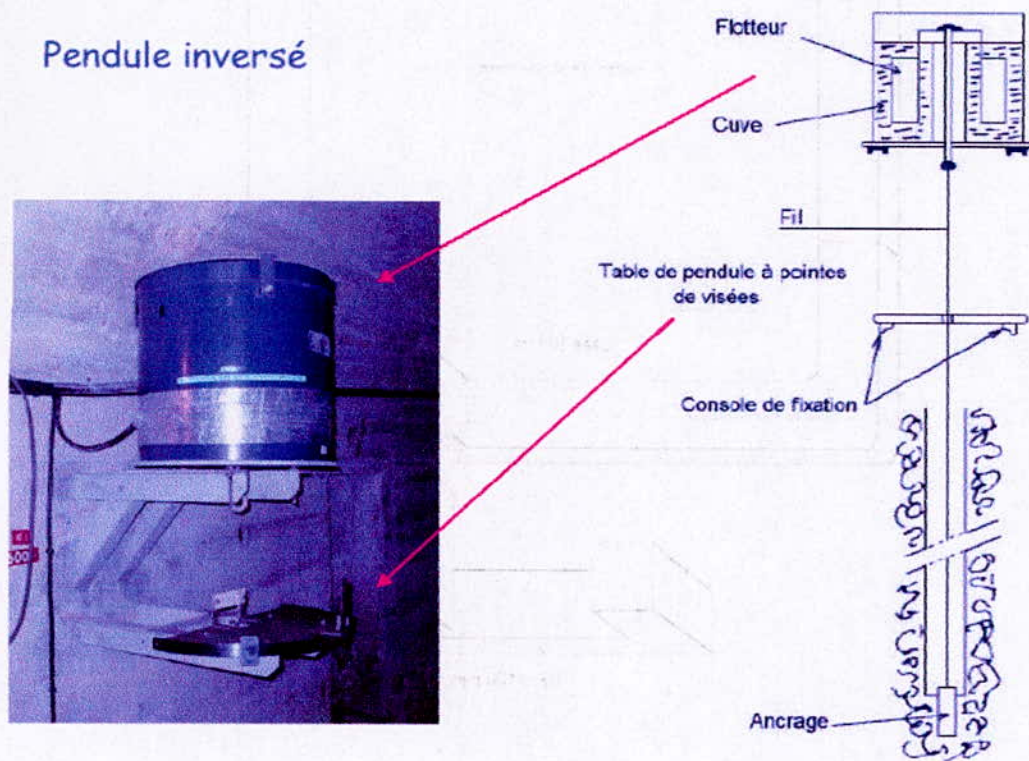


Figure III.5 : Le pendule inversé.

III-1-5 La mesure des mouvements relatifs

- Les fissuromètres

Ces appareils sont simples et robustes et permettent d'obtenir une précision intéressante du 1/10 de mm. Ils peuvent désormais mesurer des déplacements en un ou trois dimensions, et peuvent être télémessurables et immergeables.

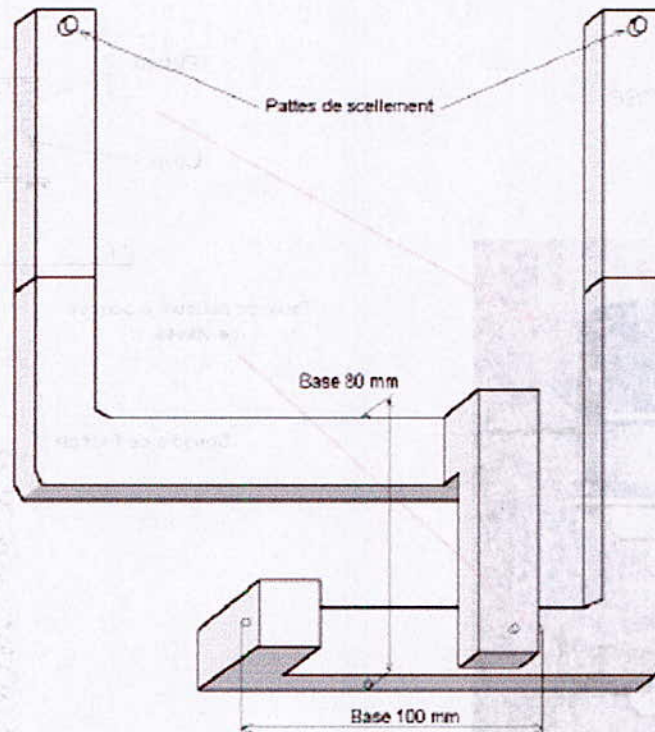


Figure III.6 : Le vinchon.

III-1-6 La mesure des contraintes et des déformations

- **La mesure des contraintes**

Les mesures étant extrêmement délicates, seules des cellules de pression totale sont disposées dans les remblais au moment de leur construction.

- **La mesure des déformations : extensomètres à cordes vibrantes**

Il s'agit simplement d'une corde à piano tendue entre deux flasques solidaires du béton qui, en se déformant, fait varier la tension de la corde. Deux bobines placées au voisinage de la corde la font respectivement vibrer, et enregistre la fréquence de vibration de laquelle on obtient la déformation.

Les extensomètres sont disposés par trois, pour obtenir les déformations du plan et par six pour obtenir celles de l'espace.

III-1-7 La mesure d'inclinaisons

Les mesures d'inclinaisons sont en général utilisées dans la surveillance des glissements de terrain.

- **Les inclinomètres fixes**

Il s'agit de détecter l'inductance d'un pendule plongé dans un bain d'huile à l'aide de deux bobines; le signal recueilli est du même genre que celui du CLINOFOR.

- **Les sondes inclinométriques en forage**

Dans une sonde, deux capteurs sont disposés de manière à mesurer simultanément les inclinaisons dans deux directions perpendiculaires; chaque capteur est équipé d'un servo-accélérateur dont la précision est de 10^{-5} radians. La sonde est descendue dans un tube rainuré solidaire du terrain.

III-1-8 La mesure des fuites

En fonction du débit, et des contraintes géométriques autour des résurgences, on connaît toute une gamme de capacités jaugées, et de déversoirs qui figurent dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.1 : La mesure des fuites.

Pour des débits de 0 à 10 m ³ /s	Capacités jaugées	- éprouvettes - capacités normalisées portables
Pour des débits supérieurs	Déversoirs	- déversoirs triangulaires et rectangulaires

- **L'intérêt des mesures de fuites et de pressions hydrauliques**

L'eau soumet le barrage à son action permanente et agressive : érosion, sous-pressions, dissolutions. Elle profite des faiblesses de l'ouvrage pour s'écouler. Les évolutions des grandeurs hydrauliques sont donc le signe d'une nouvelle faiblesse du barrage.

- Principe

Avec un appareil à capacité standard, on recueille de l'eau en un temps déterminé à la sortie d'une fuite, le débit de l'écoulement des eaux est déduit à partir du volume récupéré (Lazarotto, 2000).

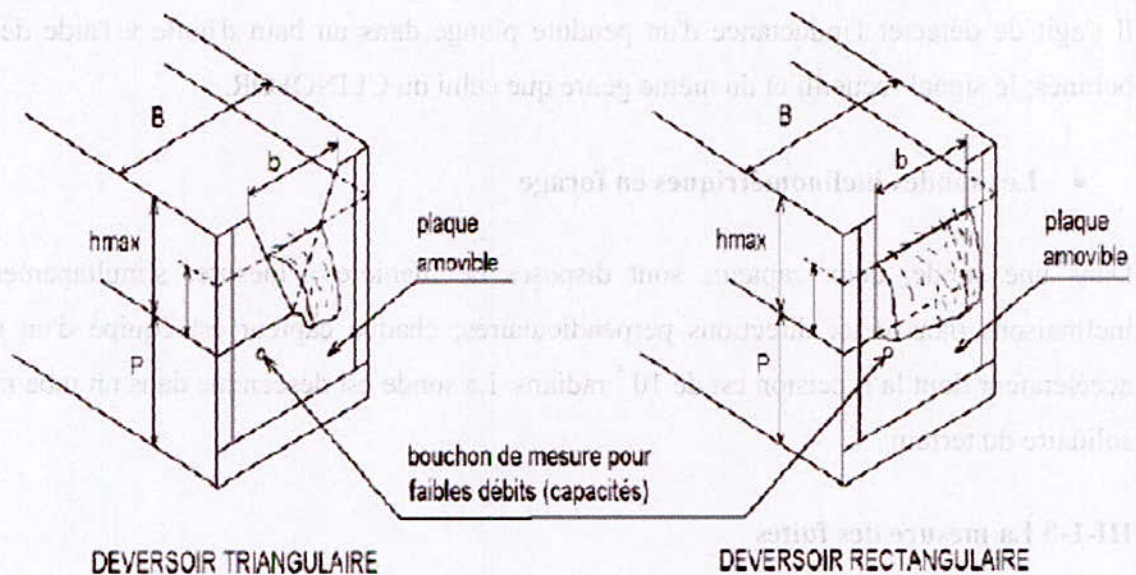


Figure III.7 : Les déversoirs triangulaire et rectangulaire.

III-1-9 Les mesures de piézométrie

Il s'agit de mesurer en un point quelconque la pression d'eau. Dans le cas des ouvrages en béton, les mesures se font par l'intermédiaire de forages : les piézomètres; pour les ouvrages en terre, les tubages verticaux étant prohibés en raison des tassements, on utilise des chambres de mesure noyées dans le remblai : les cellules de pression interstitielle qui sont en liaison avec l'extérieur grâce à des câbles électriques ou à des canalisations hydrauliques. Les résultats sont donnés en mètres d'eau au dessus du niveau de la mer.

- Les piézomètres

Il s'agit d'un forage tubé, crépiné au niveau des circulations d'eau que l'on veut caractériser et dont l'environnement immédiat doit être assez perméable pour que le temps de réponse du piézomètre soit compatible avec les vitesses de variation des sous pressions. Le type de piézomètre installé est ensuite fonction de la cote du niveau piézométrique (surface libre). Si

la surface libre est en dessous du niveau du tube, on installera des piézomètres mécaniques, à cloche, ou électriques, dont la précision atteint le centimètre.

Si le puit est faiblement artésien (la surface libre dépasse légèrement le sommet du puit), on utilise des tubes rallongés à lecture directe ou bien des manomètres.

Si la surface libre est tantôt inférieure, tantôt supérieure au niveau du puit, on installera une tête de puit équipée de vannes qui permettra de combiner les deux méthodes précédentes (c'est ce qui est recommandée pour tous les piézomètres).

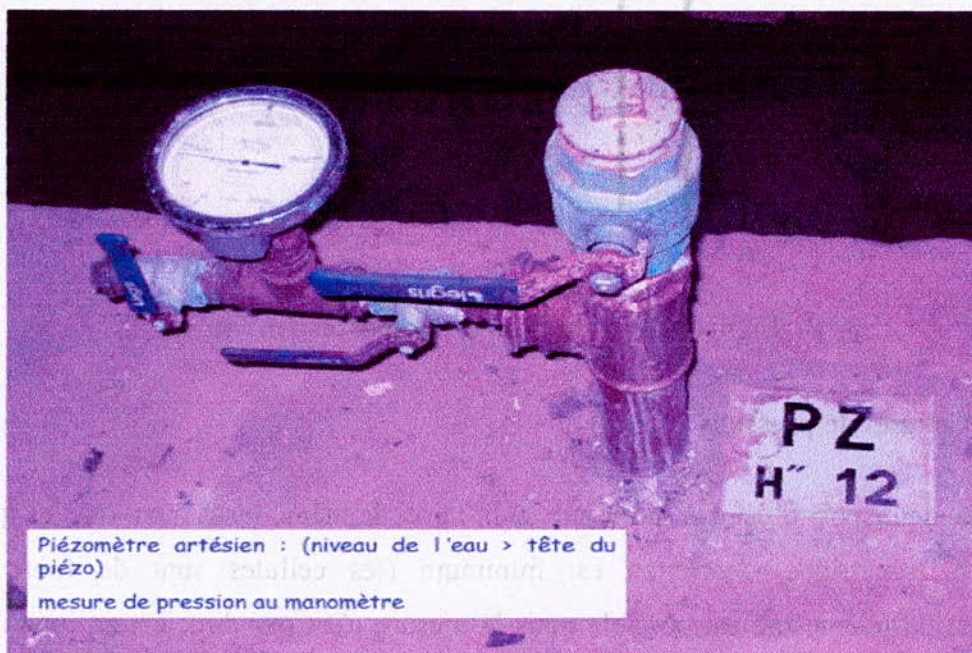


Figure III.8 : Piézomètre artésien.

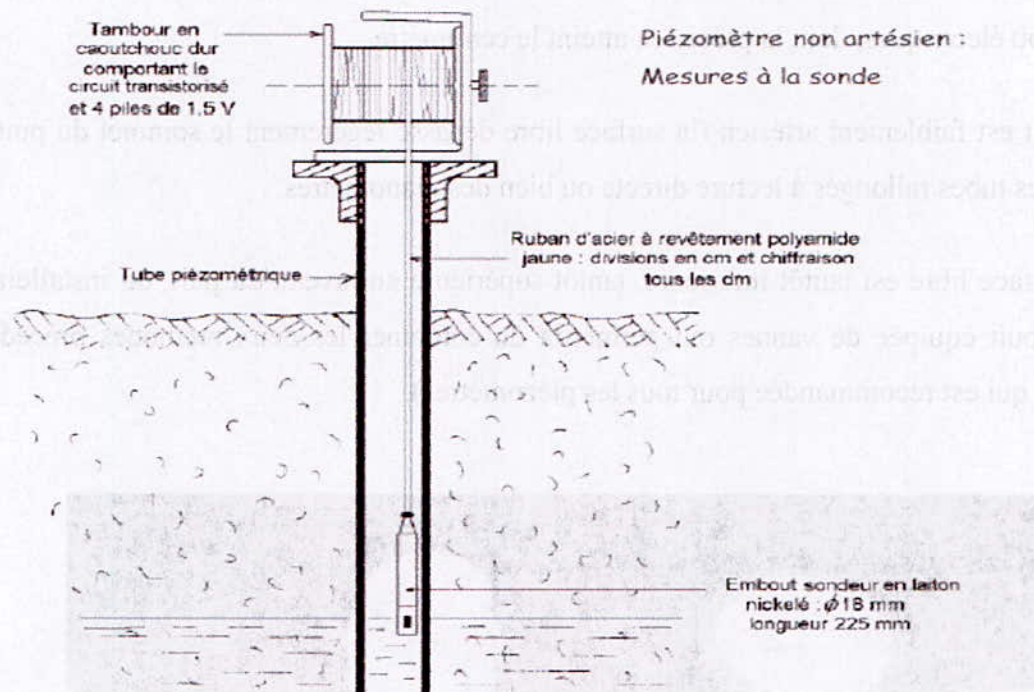


Figure III.9 : Piézomètre non artésien.

- Les Cellules de pression

L'avantage de ce dispositif est que la mesure se fait avec le même instrument quelles que soit le niveau piézométrique, l'entretien est minimum (les cellules sont de toute façon inaccessibles), la télémessure est possible mais la mesure n'est pas directement interprétable par les opérateurs. Il existe plusieurs modèles dont la plupart ont un inconvénient notable : la difficulté d'installation (fort coût en raison des prévisions de tassement et du risque d'écrasement des circuits de purge et de mesure). C'est pourquoi la plupart des ouvrages sont désormais équipés de cellules électriques à corde vibrante.

Ces cellules de pression fonctionnent de la même manière que les extensomètres : l'eau pénètre dans une chambre de mesure et exerce une pression sur un soufflet relié à une corde vibrante. Les variations de pression sont déduites des variations de fréquences mesurées.

Les précautions à prendre pour une bonne utilisation sont : un étalonnage de la cellule au moment de la pose, une saturation constante de la cellule et une liaison électrique installée dans l'axe du noyau du barrage en prévision des tassements ultérieurs.

III-1-10 Les essais destinés à évaluer la qualité du béton

- **L'essai sclérométrique**

Il s'agit d'un essai non destructif permettant d'obtenir rapidement la résistance du béton d'un ouvrage. Le principe est de tester la dureté d'une surface en béton durci.

Le scléromètre est un appareil constitué d'une masse projetée sur l'échantillon par un ressort. On mesure la hauteur du rebond de cette masse qui est d'autant plus importante que la surface du béton est dure. L'appareil est taré sur un bloc de néoprène armé. L'essai est réalisé perpendiculairement à la surface et doit comprendre vingt sept rebonds.

III-2 Espacement des mesures

L'espacement des mesures est fixé et peut être réduit lorsque l'on constate des anomalies :

- Tous les quinze jours : Fuites.
- Tous les mois : Piézomètres, contrôleurs de joints et pendules.
- De deux à six fois par an : extensomètres.
- Deux fois par an : topographie, nivellement, planimétrie (mesures effectuées par des spécialistes).

Dans le cas d'un premier remplissage, la fréquence des auscultations est augmentée (Bremen et al, 2002).

Tableau III.2 : Résumé de la fréquence des mesures.

PARAMÈTRES	TYPES DE MESURE	FRÉQUENCE
Paramètres représentatifs du comportement global	Pendules Débits totaux Pressions	Hebdomadaire bimensuelle Mensuelle
	Mesures géodésiques complètes	Tous les 5 ans
	Mesures géodésiques réduites	1 à plusieurs fois par an
Paramètres complémentaires	Déformations des joints Rotation	1 à 2 fois par an

CHAPITRE IV

Modèle statistique

MODELE STATISTIQUE

IV-1 Introduction

L'auscultation d'un barrage consiste à suivre l'évolution d'un certain nombre de grandeurs physiques au moyen d'instruments spéciaux installés dans l'ouvrage. Le diagnostic sur l'état de l'ouvrage s'appuie sur la comparaison de ces mesures avec les valeurs prédites par un modèle de comportement, une formulation mathématique qui traduit au mieux les variations des grandeurs, en fonction du temps et/ou des conditions dans lesquelles se trouve l'ouvrage. Il existe deux sortes de modèles de comportement :

➤ Les modèles déterministes

Ce sont des modèles numériques qui représentent la structure de l'ouvrage étudié et permettent d'en calculer les déplacements sous une charge donnée, ainsi que les efforts et contraintes qui y règnent. Ils peuvent prendre en considération, selon les cas, les charges statiques ou dynamiques, la température, la pression interstitielle, etc.

Les modèles déterministes permettent d'établir un diagnostic sur un ouvrage dès sa construction et son premier chargement. Ils doivent être progressivement enrichis et ajustés pour représenter au mieux le comportement connu de leur ouvrage de référence.

➤ Les modèles statistiques

A l'opposé des précédents, ils ne contiennent aucune formulation de la structure de leur ouvrage de référence. Ils sont construits à partir des mesures effectuées pendant une période d'apprentissage, et tentent de traduire au mieux les tendances manifestées au cours de celle-ci. Du fait qu'ils nécessitent pour leur calibration une période préalable d'apprentissage, les modèles statistiques ne sont pas utilement exploitables au tout début de la vie d'un ouvrage. En revanche, ils s'ajustent automatiquement au fur et à mesure que les mesures s'accumulent au fil du temps.

De là vient le choix de l'application de la méthode statistique, et plus particulièrement la méthode de séparation des effets hydrostatiques, saisonniers et temporels, plus connue sous le nom HST.

IV-1-1 Méthode HST

Il s'agit d'ajuster au nuage de mesures expérimentales, une fonction, ou un modèle numérique, capable d'expliquer chacune des variations de nature différente. Le modèle s'appuie sur les principes suivants :

- On admet que le phénomène étudié est lié à un certain nombre de variables (charge d'eau, température,...) ;
- On remplace cette relation inconnue par une fonction algébrique arbitraire de ces variables, fonction dont la forme cherche à traduire le plus possible l'influence des variables sur le phénomène. On définit ainsi un modèle dans lequel apparaissent les variables et les coefficients de ces variables ;
- On ajuste le modèle aux mesures déjà faites, c'est-à-dire qu'on cherche la valeur des coefficients qui adapte le mieux possible le modèle à l'ensemble des mesures. Il est important de remarquer que ce sont les coefficients des variables qui sont, dans notre cas les inconnues à déterminer ;
- On admet, enfin, que le modèle représente le phénomène dans la période de temps couvrant les mesures dont on s'est servi pour l'ajustement « période de référence ». La méthode permet donc d'estimer quel sera le comportement futur probable de l'ouvrage. Du moins on pourra toujours comparer le comportement réel au comportement de référence (Royet, 1992).

IV-1-2 Choix des variables

Les mesures brutes enregistrées sur les barrages résultent de la superposition de trois états principaux :

- Un état irréversible correspondant à une évolution du phénomène dans le temps t , évolution qui peut avoir tendance à s'amortir (adaptation ou consolidation) ou à s'accélérer (dégradation) ;

- Un état réversible correspondant à l'effet de la charge hydrostatique à la cote de retenue h ;
- Un second état réversible lié à la l'effet des températures dans l'ouvrage.

Il y'a lieu, cependant, d'ajouter les erreurs expérimentales ainsi que les effets de toutes les autres causes que l'on néglige pour simplifier la méthode.

Le modèle, dont le choix revient à « Electricité de France » (EDF), s'écrit en une somme de trois termes :

$$X(z, \theta, t) = H(z) + S(\theta) + T(t) \quad (\text{IV} - 1)$$

ou :

$H(z)$: Variation d'origine hydrostatique;

$S(\theta)$: Variation due aux effets climatiques;

$T(t)$: Effet évolutif ou irréversible.

IV-1-3 Expression analytique du modèle

Il faut trouver, pour les fonctions H , S et T , une expression algébrique qui doit, avec le minimum de paramètres, représenter le mieux possible tous les effets susceptible d'être rencontrés.

1) Loi d'effet hydrostatique $H(z)$

La grande variété des formes nécessaires à la loi hydrostatique peut être obtenue par une fonction polynomiale du 4ème degré de la cote de retenue ou, de façon plus pratique, du creux relatif Z .

soit :

$$H(z) = A_1 Z + A_2 Z^2 + A_3 Z^3 + A_4 Z^4 \quad (\text{IV} - 2)$$

avec :

$$Z = \frac{Z_{max} - z}{Z_{max} - Z_{min}}$$

ou :

Z_{max} : Niveau normale de retenue;

z : Cote de retenue du jour de la mesure;

Z_{min} : Niveau du volume mort.

2) Loi d'effet thermique $S(\theta)$

Chaque année, à la même date, l'état thermique d'un ouvrage est pratiquement le même. Il ne dépendrait donc que de la saison S . La loi saisonnière qu'on substitue à la loi thermique $S(\theta)$ est alors une fonction périodique du temps (période d'un an).

C'est devant l'absence quasi générale de mesures de températures dans la masse des ouvrages qu'il a été décidé de choisir comme variable explicative. La variable saison assimilée à un angle valant 0 degré le 1^{er} janvier et 360 degrés le 31 décembre.

soit :

$$S(\theta) = A_5 \sin(s) + A_6 \cos(s) + A_7 \sin^2(s) + A_8 \sin(s) \cdot \cos(s) \quad (\text{IV} - 3)$$

avec :

$$\theta(s) = \frac{2\pi s}{365.25} \quad (\text{IV} - 4)$$

3) Loi d'évolution dans le temps $T(t)$

Cette expression comprend un terme exponentiel négatif représentant l'évolution amortie, un terme exponentiel positif représentant l'évolution accéléré, et un terme linéaire représentant les évolutions persistantes.

soit :

$$T(t) = A_9 e^{-t} + A_{10} e^t + A_{11} t \quad (\text{IV} - 5)$$

Ou t est compté à partir de la mise en eau du barrage.

Ou t est compté à partir de la mise en eau du barrage.

4) Expression totale

L'expression totale devient donc :

$$X_0(z, \theta, t) = A_0 + A_1 Z + A_2 Z^2 + A_3 Z^3 + A_4 Z^4 + A_5 \cos(s) + A_6 \sin(s) + A_7 \sin^2(s) + A_8 \sin(s)\cos(s) + A_9 e^{-t} + A_{10} e^t + A_{11} t + \varepsilon \quad (\text{IV-6})$$

Où :

A_0 : Constante qui prend compte de l'arbitraire de l'échelle de mesure des phénomènes ;

ε : Somme des erreurs expérimentales entre les effets de tous les autres cas que l'on néglige.

5) Ajustement du modèle

L'expression (IV-6) définit le modèle mathématique à ajuster à l'ensemble des observations, telles que X_0 , déjà faites. Le problème est de déterminer la valeur des 12 inconnues A_0, A_1, \dots, A_{11} .

En l'absence de l'erreur ε et si le modèle adopté représentait parfaitement le phénomène, il suffirait d'écrire un système de 12 équations permettant de déterminer les 12 inconnues A_0, A_1, \dots, A_{11} , et, dans ce cas, les équations seraient obtenues en écrivant la relation (IV-6) pour 12 observations différentes.

Après résolution du système de 12 équations, on obtient alors les valeurs des 12 coefficients recherchés.

La méthode des moindres carrés permet de résoudre ce problème, il s'agit de poser un système de 12 équations à partir de n observations faites sur le phénomène (n supérieur à 12 et le plus grand possible). La résolution de ce système donne alors la valeur la plus probable des 12 coefficients, compte tenue des observations utilisées, la présence des erreurs ε conduisant au fait que les valeurs des coefficients sont aléatoires c'est-à-dire qu'elle varient légèrement en fonction des observations utilisées puisque l'on substitue à X_0 la valeur $X_0 - \varepsilon$ et qu'il n'est possible que d'en donner une estimation. Les valeurs obtenues sont celles qui donnent à

6) La loi totale

La loi définie par l'équation (IV-6) peut s'écrire sous la forme polynomiale plus générale pour la recherche des corrélations de la façon suivante :

$$X'_0 = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + A_3X_3 + \dots + A_{11}X_{11} \quad (\text{IV} - 7)$$

en substituant aux variables curvilignes T, S, Z les 12 variables linéaires et en faisant passer ε dans le premier membre :

$$\text{avec : } \begin{cases} X_1 = Z; & X_2 = Z^2; & X_3 = Z^3; & X_4 = Z^4; \\ X_5 = \sin(s); & X_6 = \cos(s); & X_7 = \sin^2(s); & X_8 = \sin(s)\cos(s); \\ X_9 = e^{-t}; & X_{10} = e^t; & X_{11} = t. \end{cases}$$

7) Equation de régression

Le système d'équations à poser pour déterminer $A_0, A_1, A_2, \dots, A_{11}$ s'obtiennent en exprimant que les coefficients à déterminer sont tels qu'appliquées à l'expression polynomiale (IV-7), ils minimisent la somme des carrés des écarts entre valeurs observées X_0 et celles calculées correspondantes X'_0 selon l'expression (IV-7) (Coyne et Bellier, 1995).

soit :

$$S_i = \sum_1^n (X_0 - X'_0)^2 = \sum_1^n (X_0 - A_0 - A_1X_1 - A_2X_2 - \dots - A_{11}X_{11})^2 \quad (\text{IV} - 8)$$

avec :

S_i : écart entre la valeur observée et celle calculée correspondante.

Les coefficients à déterminer satisfont donc, au mieux, l'ensemble des n observations.

Les 12 équations s'obtiennent en exprimant la nullité simultanée des dérivées partielles de (IV-8) par rapport à A_0 et par rapport aux coefficients A_i .

La dérivée par rapport à A_0 donne :

$$\frac{\partial}{\partial A} \left\{ \sum_1^n (X_0 - A_0 - A_1 X_1 - A_2 X_2 - \dots - A_{11} X_{11})^2 \right\} = 0$$

$$2 \sum_1^n \left[(X_0 - A_0 - A_1 X_1 - \dots - A_{11} X_{11}) * \frac{\partial}{\partial A} (X_0 - A_0 - A_1 X_1 - \dots - A_{11} X_{11}) \right] = 0$$

soit : $\sum_1^n [(X_0 - A_0 - A_1 X_1 - \dots - A_{11} X_{11}) \times 1] = 0$

ou : $\sum_1^n X_0 = n A_0 + A_1 \sum_1^n X_1 + \dots + A_{11} \sum_1^n X_{11}$

Soit en divisant par n on obtient :

$$\overline{X_0} = A_0 + A_1 \overline{X_1} + \dots + A_{11} \overline{X_{11}} \tag{IV-9}$$

L'expression (IV-9) exprime le plan de régression, dans l'espace à 12 dimensions des 11 variables, passe par le point moyen de coordonnées $\overline{X_1}, \overline{X_2}, \dots, \overline{X_{11}}$. L'équation de ce plan s'écrit donc :

$$X'_0 - \overline{X_0} = A_1 (X_1 - \overline{X_1}) + \dots + A_{11} (X_{11} - \overline{X_{11}}) \tag{IV-10}$$

L'expression (IV-10) obtenue permet d'éliminer le coefficient A_0 et ne dépend maintenant que des coefficients A_i . Le minimum $S_i = \sum_1^n (X_0 - X'_0)^2$ peut donc s'écrire sous la forme suivante :

$$S_i = \sum_1^n (X_0 - \overline{X_0} + \overline{X_0} - X'_0)^2 = \sum_1^n ((X_0 - \overline{X_0}) - (X'_0 - \overline{X_0}))^2 = \sum_1^n (x_0 - A_1 x_1 - A_2 x_2 - \dots - A_{11} x_{11})^2 \tag{IV-11}$$

Les dérivées partielles de S_i par rapport aux A_i peuvent être calculées à partir de l'équation (IV-11), ce qui donne donc :

Ainsi en donnant aux matrices les noms symboliques MAT, A, RES :

$$[MAT] * [A] = [RES] \quad (IV-16)$$

Si [C] est la matrice inverse de [MAT] on a donc :

$$[C] * [MAT] = [I] \quad (IV-17)$$

Les coefficients A_i sont donnés par :

$$A_i = C_{i1} \sum_1^n x_0 x_1 + C_{i2} \sum_1^n x_0 x_2 + \dots + C_{in} \sum_1^n x_0 x_n \quad (IV-18)$$

CHAPITRE V

Les réseaux de neurones

LES RESEAUX DE NEURONES

V-1 Introduction

L'informatique est la science du traitement automatique de l'information. Son développement est souvent confondu avec celui des machines de traitement : les ordinateurs. Depuis les débuts jusqu'à aujourd'hui, les ordinateurs sont devenus de plus en plus puissants. Cependant, cette augmentation de puissance ne permet pas de toujours résoudre les problèmes d'une application informatique dans un domaine particulier. L'idée s'est donc installée que ce n'était peut être pas tant le matériel que le logiciel qui pêchait par manque de puissance. La construction de logiciels s'appuie sur plusieurs approches. Deux parmi les plus utilisées sont l'approche algorithmique et l'approche basée sur la connaissance.

Ces deux approches ne suffisent pas à répondre à tous les problèmes existants. Citons les domaines de la reconnaissance de formes (images ou signaux), du diagnostic, du contrôle moteur, de la traduction automatique, de la compréhension du langage, depuis longtemps explorés à l'aide des approches algorithmiques et à base de connaissances, qui n'ont pas rencontré le succès escompté. Pourtant, des êtres vivants relativement simples sont capables de réaliser certaines de ces opérations apparemment sans difficulté.

Une troisième approche au traitement automatique de l'information semble donc s'offrir à nous, où l'on cherche à s'inspirer du traitement de l'information effectué par le cerveau. L'hypothèse principale, à la base de l'essor des réseaux de neurones artificiels, est que le comportement intelligent est sous-tendu par un ensemble de mécanismes mentaux. Ces mécanismes étant basés sur des processus neurophysiologiques, nous supposons donc que la structure du système nerveux central est à la base du développement d'un comportement intelligent (Touzet, 1992).

V-2 Définition

Le terme de réseaux de neurones 'formels' (ou 'artificiels') fait rêver certains, et fait peur à d'autres ; la réalité est à la fois plus prosaïque et rassurante. Les réseaux de neurones sont une

technique de traitement de données qui fera bientôt partie de la boîte à outils de tout ingénieur préoccupé de tirer le maximum d'informations pertinentes des données qu'il possède : faire des prévisions, élaborer des modèles, reconnaître des formes ou des signaux, etc.

Par analogie avec les neurones biologiques, on appelle réseaux de neurones des ensembles de calculateurs numériques qui agissent comme des unités élémentaires. Ils sont reliés entre eux par un ensemble d'interconnexions pondérées qui transmettent des informations numériques d'un « neurone formel » à l'autre.

L'apprentissage du réseau de neurones consiste alors à modifier répétitivement les valeurs de pondération des interconnexions jusqu'à ce que la performance du réseau atteigne le niveau désiré. Un neurone formel reçoit en entrée des informations sous la forme de valeurs numériques, d'en faire un traitement, et selon ses résultats, de générer une information de sortie vers un autre neurone formel. Chaque neurone formel possède des caractéristiques propres, en particulier un seuil de déclenchement, assimilable à un poids synaptique dont le dépassement implique la décharge du neurone, c'est-à-dire la transmission d'une information de sortie (Virole, 2001).

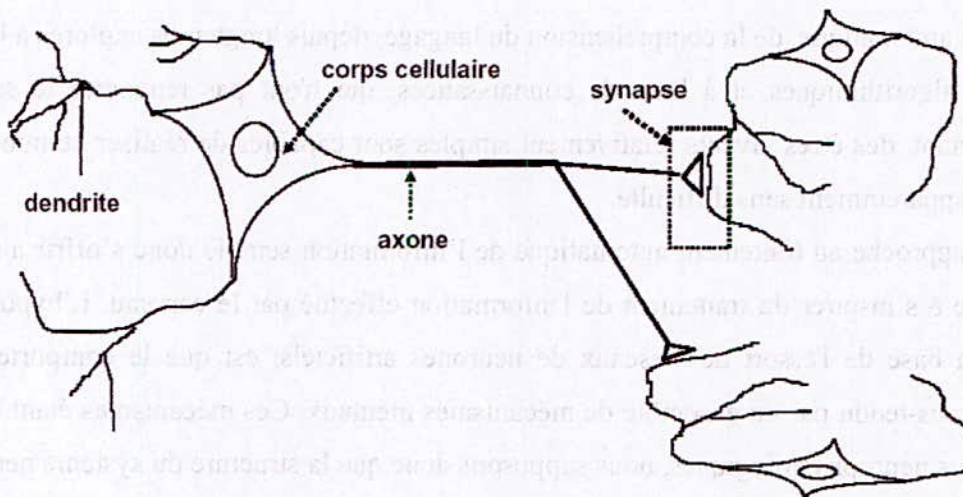


Figure V-1 : Représentation schématique d'un réseau de neurone biologique.

V-3 Le neurone artificiel

V-3-1 Historique

Deux équipes de chercheurs, dont les travaux marquent le début des réseaux de neurones artificiels, ont jeté les bases de ces modélisations. En 1943, Mc Culloch et Pittts décrivent un neurone formel, basé sur leurs travaux sur les neurones biologiques. Le neurone formel effectue une sommation pondérée des influx qui lui parviennent. Si cette somme dépasse un seuil, le neurone s'active et transmet aux autres neurones un influx égal à son activation. Sinon, il reste inactif et ne transmet rien. En 1949, Hebb propose un modèle simple des phénomènes d'apprentissage dans le cerveau, basé sur le renforcement ou l'affaiblissement des efficacités synaptiques, c'est-à-dire des taux de transmission de l'influx entre deux neurones.

Le perceptron, proposé par Rosenblatt en 1962, est le premier modèle de réseau intégrant le neurone de Mc Culloch et Pitts et la règle d'apprentissage de Hebb. Par ses capacités d'apprentissage, le perceptron suscita de grands espoirs dans la communauté des chercheurs en intelligence artificielle (IA) qui engagea des travaux importants dans ce domaine.

En 1969, deux mathématiciens, Papert et Minsky, mettent en évidence les limites théoriques du perceptron. Ces limites, essentiellement liées à l'impossibilité d'apprendre la totalité des connexions du réseau, entraînent un ralentissement de la recherche sur les réseaux neuronaux.

Il faudra attendre 1982 avec Hopfield, et Kohonen en 1984, puis Rumelhart en 1986 pour voir apparaître de nouveaux types de réseaux ainsi qu'une nouvelle version du Perceptron doté d'un algorithme d'apprentissage permettant de dépasser les limitations de l'ancienne version. La recherche sur les réseaux est alors relancée.

Aujourd'hui le domaine d'application des réseaux de neurones recouvre aussi bien la reconnaissance de formes, que le contrôle de processus ou la prévision de séries chronologiques (Moutarde, 2003).

V-3-2 Description architecturale

L'élément de base d'un réseau de neurone est, bien entendu, le neurone artificiel. Un neurone contient deux éléments principaux :

- Un ensemble de poids associés aux connexions du neurone ;
- Une fonction d'activation.

Les valeurs d'entrée sont multipliées par leur poids correspondant et additionnées pour obtenir la somme.

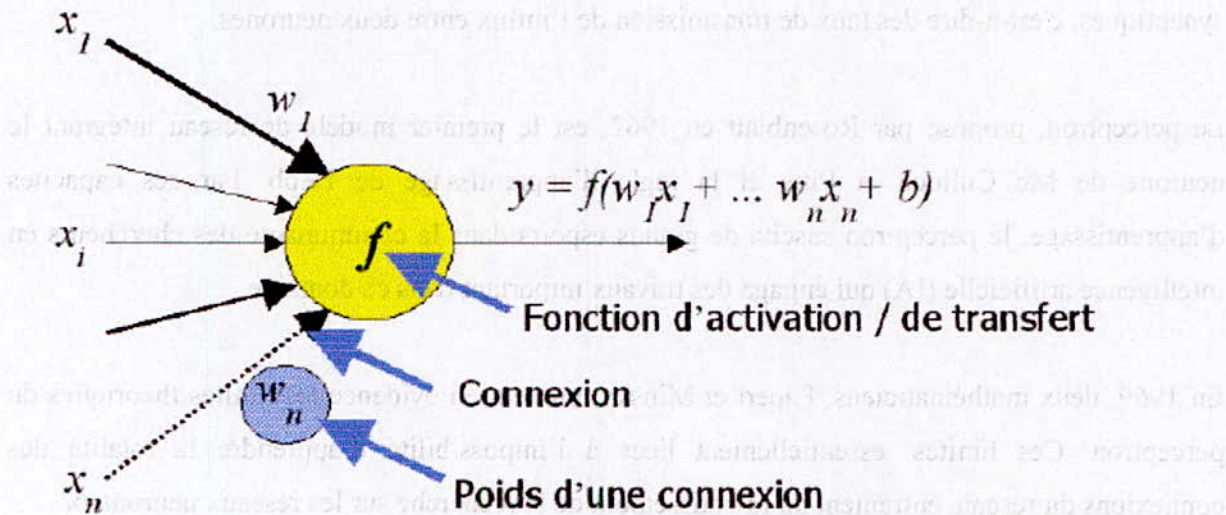


Figure V-3 : Le neurone artificiel.

Cette somme devient l'argument de la fonction d'activation, qui est le plus souvent une des formes présentées dans la figure (V-4). Une fonction d'activation importante est la simple multiplication par un, c'est-à-dire que la sortie est simplement une somme pondérée (Framling, 1992).

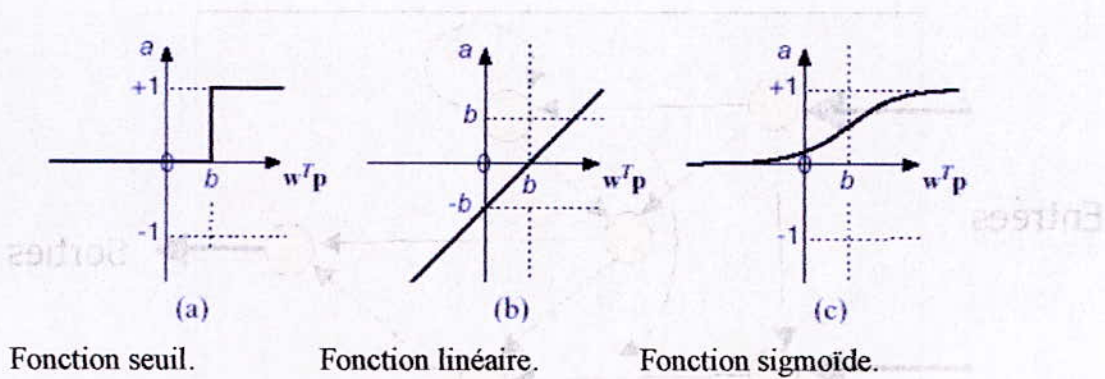


Figure V-4 : Fonctions de transfert ou d'activation.

La fonction seuil interne à chaque neurone formel assure que la valeur de sommation des potentiels pré-synaptiques ne dépassera pas certaines limites raisonnables (en général l'intervalle 0 - 1). Elle interdit les évolutions catastrophiques (effets de boucle où les valeurs deviennent de plus en plus grandes).

Le Perceptron original, inventé par Frank Rosenblatt en 1958, possédait une telle fonction de seuil (sorties toujours ramenées à 0 ou 1). Minsky et Papert ont démontré en 1969 les limites de cette sorte de perceptron (incapacité de discriminer des classes non linéairement séparables) induisant à attribuer ces limites à tous les réseaux de neurones. Cependant, les neurones à « sigmoïde » (la fonction douce et progressive) peuvent bien tout modéliser, même avec une seule couche.

V-4 Propriétés des réseaux de neurones

Un réseau de neurones se compose de neurones qui sont interconnectés de façon à ce que la sortie d'un neurone puisse être l'entrée d'un ou plusieurs autres neurones. Ensuite il y a des entrées de l'extérieur et des sorties vers l'extérieur.

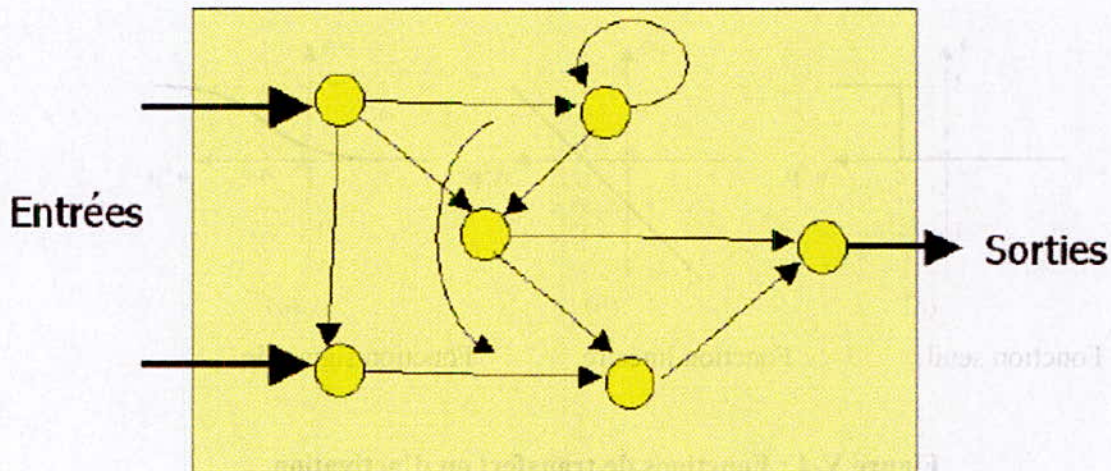


Figure V-5 : Représentation d'un réseau de neurones.

Les réseaux de neurones sont souvent appelés des "boîtes noires" car la fonction mathématique qui est représentée devient vite trop complexe pour l'analyser et la comprendre directement. Cela est notamment le cas si le réseau développe des représentations distribuées, c'est à dire que plusieurs neurones sont plus ou moins actifs et contribuent à une décision (Framling, 1992).

V-5 Les mécanismes d'apprentissage

L'apprentissage d'un réseau de neurones artificiels est induit par une procédure itérative d'ajustement de ses paramètres internes (poids synaptiques et nombres de neurones). Cette procédure d'ajustement est décrite par un algorithme d'apprentissage. Celui-ci détermine alors le comportement du réseau. Ainsi le comportement d'un même réseau diffère selon l'algorithme d'apprentissage utilisé pour modifier ses paramètres. Il existe deux grandes stratégies d'apprentissage :

1) Apprentissage supervisé

Déterminant des variables de sortie, on fait apprendre au réseau par itérations successives à modifier ses paramètres internes de façon à reconnaître ces variables. En quelque sorte, on propose au réseau des exemples (observations) auxquels sont associées des réponses désirées. Dans ce type d'apprentissage, la sortie produite par le réseau en réponse à une observation

donnée est comparée à la réponse désirée (variable de sortie). La différence entre la réponse désirée et la réponse du réseau est alors utilisée pour adapter les paramètres du réseau de façon à corriger son comportement. Ce processus est répété de façon itérative jusqu'à obtenir le meilleur comportement.

On présente en entrée chaque observation au réseau de neurones (c'est-à-dire qu'on met les valeurs décrivant le dossier dans les entrées), puis on propage ces valeurs vers la sortie. La prédiction que l'on obtient en sortie est (très probablement, surtout au début) erronée. On calcule la valeur de l'erreur (c'est donc la différence entre les valeurs désirées et les valeurs prédites), puis on « rétro-propage » cette erreur en remontant le réseau et en modifiant les poids proportionnellement à la contribution de chacun à l'erreur totale. On répète ce mécanisme pour chaque exemple des données et tant que le taux de reclassement sur les données de test s'améliore. Ce mécanisme porte le nom de rétro-propagation de l'erreur.

Le principe de l'algorithme est de remonter couche par couche, des neurones de sortie vers les neurones d'entrées et de modifier les poids synaptiques en amont de chaque couche, de manière à diminuer l'erreur commise en sortie. Le processus est en général itératif (le problème étant généralement non linéaire).

2) Apprentissage non supervisé

C'est une technique différente où on ne détermine pas de variables de sortie. Le réseau va de lui-même catégoriser les variables d'entrée. Cet apprentissage est destiné à l'élaboration d'une représentation interne de l'espace des données d'entrée en identifiant la structure statistique sous-jacente des variables d'entrée sous une forme plus simple ou plus explicite (Virole, 2001).

V-6 Les différents types de réseaux de neurones

Plusieurs types de réseaux de neurones ont été développés qui ont des domaines d'application souvent très variés.

1) Le Perceptron

Premier en date des réseaux de neurones, ce système comporte trois couches dont deux effectuent des traitements et une, la rétine, assure la réception des signaux. Le système fonctionne suivant une loi de convergence qui renforce l'activation d'un neurone si celui-ci est activé.

2) Adaline

Est un réseau spécialisé dans le traitement du signal fonctionnant à partir d'une règle d'apprentissage. Celle-ci permet de réduire l'erreur observée entre l'état du réseau et la valeur correcte attendue par une modification des connexions des neurones de façon à la minimiser (par un algorithme dit de descente de gradient).

3) L'associateur linéaire

Est un réseau à deux couches avec une fonction d'activation linéaire utilisant la règle de Hebb. Le principe de Hebb postule qu'une synapse améliore son efficacité seulement quand l'activité des deux neurones qu'elle relie est corrélée.

4) Les réseaux récurrents

Permettent une interconnectivité quasi totale entre les neurones des différentes couches, y compris éventuellement en se bouclant sur eux mêmes. Ils permettent la résolution de problèmes qui ne peuvent être résolus de façon algorithmique.

5) Le réseau de Hopfield

Associé avec la règle de Hebb, ce réseau peut apprendre à mémoriser les exemples présentés en entrée sous la forme d'états stables. En phase d'exploitation, les stimuli présentés en entrée évolueront dans le réseau vers l'état stable le plus ressemblant. Un réseau de Hopfield fonctionne ainsi comme un véritable classificateur à mémoire associative.

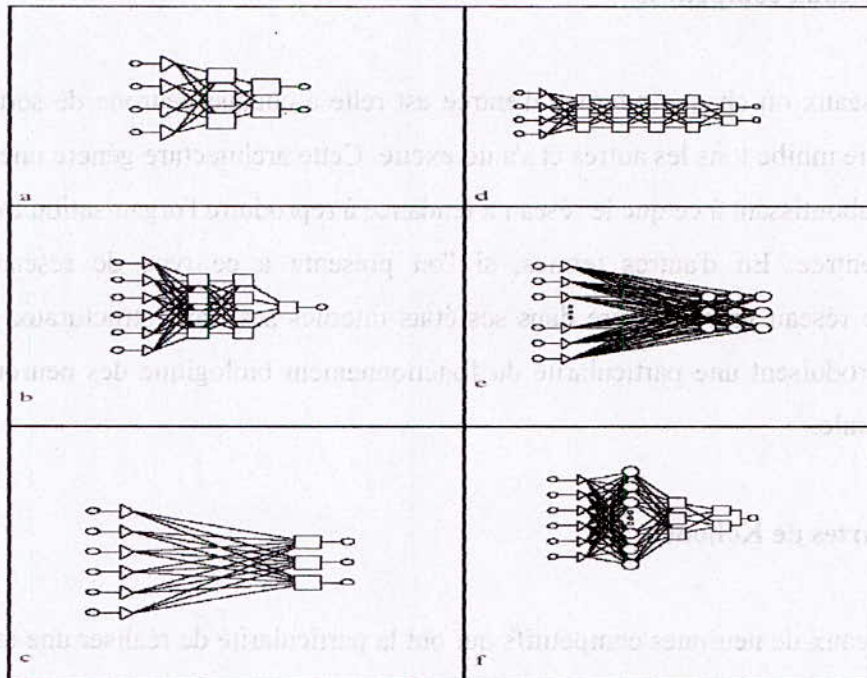
6) Les réseaux compétitifs

Ce sont des réseaux où chaque neurone d'entrée est relié à chaque neurone de sortie et chaque neurone de sortie inhibe tous les autres et s'auto excite. Cette architecture génère une compétition inter-neurones aboutissant à ce que le réseau a tendance à reproduire l'organisation topographique des formes d'entrée. En d'autres termes, si l'on présente à ce type de réseau des objets quelconques, le réseau va reproduire dans ses états internes ses traits structuraux. Les réseaux compétitifs reproduisent une particularité du fonctionnement biologique des neurones, à savoir l'inhibition latérale.

7) Les cartes de Kohonen

Ce sont des réseaux de neurones compétitifs qui ont la particularité de réaliser une représentation ordonnée des données selon une topologie fixée, généralement une grille bidimensionnelle. En général, l'algorithme permet d'assurer que les données projetées dans un même voisinage sont des données proches. En revanche, il peut se produire que des données proches soient projetées dans des zones non voisines de la grille de représentation.

Ces réseaux de neurones sont considérés comme des « classificateurs universels ». Ils résolvent notamment des problèmes de modélisation ou de classification linéaire. Le problème résolu devient un problème de régression linéaire multiple.



(a) (b) (d) Perceptron multicouche, (c) linéaire, (e) Kohonen, (f) radial.

Figure V-6 : Principaux types de réseau de neurone

❖ Conclusion

En conclusion, le choix du type de réseau dépend de l'objectif que l'on veut atteindre. Si l'on souhaite faire des prédictions ou des modélisations de comportement d'un système, les réseaux de type Perceptron suffisent. Par contre, si l'on veut extraire de l'information de données ou réaliser des classifications, alors les réseaux compétitifs sont indiqués. La plupart des grands logiciels statistiques proposent les différents types de réseaux et permettent parfois de construire des réseaux hybrides (Virole, 2001).

V-7 Procédure de développement d'un réseau de neurones

Le cycle classique de développement peut être séparé en sept étapes :

- ❖ La collecte des données ;
- ❖ L'analyse des données ;

- ❖ La séparation des bases de données ;
- ❖ Le choix d'un réseau de neurones ;
- ❖ La mise en forme des données ;
- ❖ L'apprentissage ;
- ❖ La validation.

1) Collecte des données

L'objectif de cette étape est de recueillir des données, à la fois pour développer le réseau de neurones et pour le tester. Dans le cas d'applications sur des données réelles, l'objectif est de rassembler un nombre de données suffisant pour constituer une base représentative des données susceptibles d'intervenir en phase d'utilisation du système neuronal. La fonction réalisée résultant d'un calcul statistique, le modèle qu'il constitue n'a de validité que dans le domaine où on l'a ajusté. En d'autres termes, la présentation de données très différentes de celles qui ont été utilisées lors de l'apprentissage peut entraîner une sortie totalement imprévisible.

2) Analyse des données

Il est souvent préférable d'effectuer une analyse des données de manière à déterminer les caractéristiques discriminantes pour détecter ou différencier ces données. Ces caractéristiques constituent l'entrée du réseau de neurones. Notons que cette étude n'est pas spécifique aux réseaux de neurones, quelque soit la méthode de détection ou de classification utilisée, il est généralement nécessaire de présenter des caractéristiques représentatives.

Cette détermination des caractéristiques a des conséquences à la fois sur la taille du réseau (et donc le temps de simulation), sur les performances du système (pouvoir de séparation, taux de détection), et sur le temps de développement (temps d'apprentissage). Une étude statistique sur les données peut permettre d'écarter celles qui sont aberrantes et redondantes.

3) Séparation des bases de données

Afin de développer une application à base de réseaux de neurones, il est nécessaire de disposer de deux bases de données : l'une pour effectuer l'apprentissage et l'autre pour tester le réseau obtenu et déterminer ses performances, afin de contrôler la phase d'apprentissage.

Il n'y a pas de règle pour déterminer ce partage de manière quantitative. Il résulte souvent d'un compromis tenant compte du nombre de données dont on dispose et du temps imparti pour effectuer l'apprentissage.

4) Choix d'un réseau de neurones

Il existe un grand nombre de types de réseaux de neurones, avec pour chacun des avantages et des inconvénients. Le choix d'un réseau peut dépendre :

- De la tâche à effectuer (classification, association, contrôle de processus, séparation aveugle de sources...);
- De la nature des données;
- D'éventuelles contraintes d'utilisation à temps réel;
- Des différents types de réseaux de neurones disponibles dans le logiciel de simulation que l'on compte utiliser.

Ce choix est aussi fonction de la maîtrise ou de la connaissance que l'on a de certains réseaux, ou encore du temps dont on dispose pour tester une architecture prétendue plus performante.

5) Mise en forme des données pour un réseau de neurones

De manière générale, les bases de données doivent subir un prétraitement afin d'être adaptées aux entrées et sorties du réseau de neurones. Un prétraitement courant consiste à effectuer une normalisation appropriée, qui tient compte de l'amplitude des valeurs acceptées par le réseau.

6) Apprentissage du réseau de neurones

Tous les modèles de réseaux de neurones requièrent un apprentissage. Plusieurs types d'apprentissages peuvent être adaptés à un même type de réseau de neurones. Les critères de choix sont souvent la rapidité de convergence ou les performances de généralisation.

7) Validation

Une fois le réseau de neurones entraîné (après apprentissage), il est nécessaire de le tester sur une base de données différente de celles utilisées pour l'apprentissage. Ce test permet à la fois d'apprécier les performances du système neuronal et de détecter le type de données qui pose problème. Si les performances ne sont pas satisfaisantes, il faudra soit modifier l'architecture du réseau, soit modifier la base d'apprentissage (Dreyfus, 2000).

CHAPITRE VI

Résultats de la modélisation

RESULTATS DE LA MODELISATION

VI-1 Présentation du barrage de KEDDARA

VI-1-1 Situation géographique

Le barrage de KEDDARA est situé sur le territoire de la Wilaya de BOUMERDES, à 8 Km au sud de BOUDOUAOU et à 35 Km à l'Est d'ALGER (Figure VI-1).

La digue est en enrochement avec un noyau central en argile, sur lequel sont appuyées les couches filtrantes. Elle a une hauteur de 106 m, la crête est à la cote 151 m NGA, et donne origine à une retenue avec un volume de 145.6 Mm³, et une superficie du plan d'eau de 5.2 Mm². La mise en eau du barrage de KEDDARA date du 12 décembre 1985.

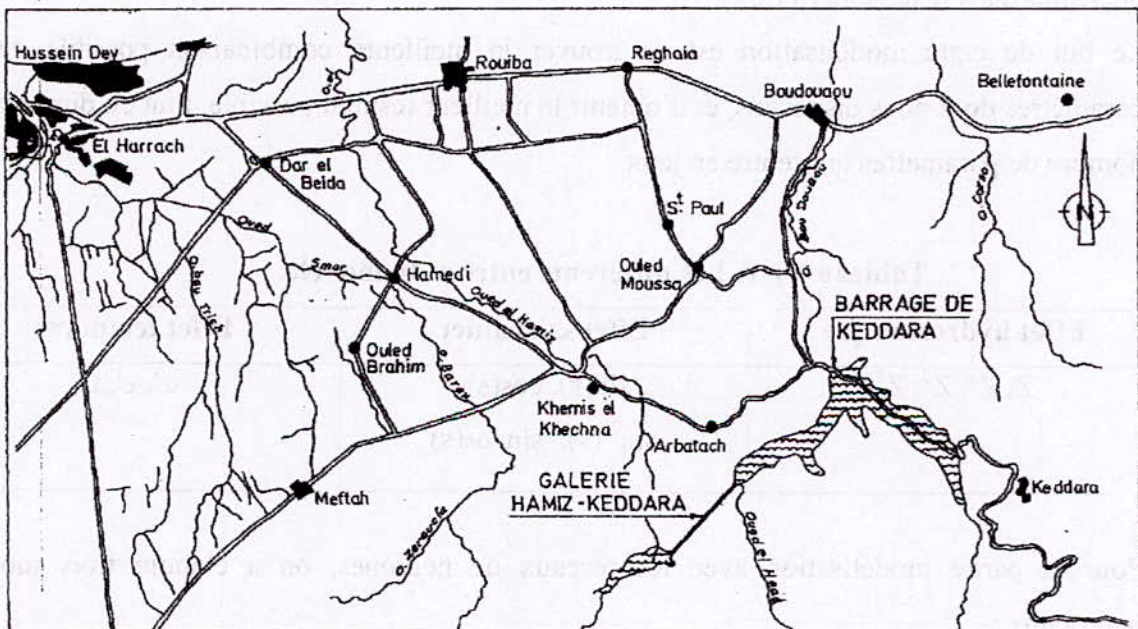


Figure VI-1 : Situation géographique du barrage de KEDDARA.

VI-2 Présentation des données

Les données utilisées dans le cadre de ce travail, nous ont été aimablement fournies par l'Agence Nationale des Barrages et des Transferts « ANBT ». Cette base de données est assez longue, et commence pour certains appareils depuis 1985, et 1993 pour d'autres.

En premier lieu, on s'est intéressé à l'étude d'un seul piézomètre, afin de tester les différents modèles, et essayer de trouver le meilleur d'entre eux. Le piézomètre en question possède une base de données de 345 valeurs, de 1993 à 2005, il est à surface libre et se trouve en rive gauche à la cote 128.53 NGA.

VI-3 Modélisation par les réseaux de neurones

Nous allons construire progressivement le modèle, en prenant compte les différents effets de la retenue, du temps et de la saison. Les paramètres qui interviennent dans ces trois effets sont présentés dans le tableau (VI-2)

Le but de cette modélisation est de trouver la meilleure combinaison possible des 11 paramètres dont nous disposons, et d'obtenir le meilleur résultat possible, tout en diminuant le nombre de paramètres qui rentre en jeu.

Tableau VI-1: Les différents entrées du modèle.

Effet hydrostatique	Effet saisonnier	Effet temporel
Z, Z^2, Z^3, Z^4	$\sin(s), \cos(s),$ $\sin^2(s), \text{sincos}(s)$	e^{-t}, e^t, t

Pour la partie modélisation avec les réseaux de neurones, on a élaboré trois modèles neuronaux :

- Le Perceptron multicouches ;
- Les réseaux de neurones à base radiale ;
- Les réseaux de neurones généralisés par une régression linéaires.

Ces modèles ont été élaborés à l'aide du logiciel MATLAB 6p5. On a commencé par scinder la base de données recueillies en deux : une partie pour le calage et qui contient 320 valeurs et les 25 valeurs restantes serviront pour la validation des différents modèles élaborés.

VI-3-1 Critères de validation

Pour pouvoir évaluer les performances ou la validité d'un modèle plusieurs critères peuvent être utilisés.

1) Le critère de Nash-Sutcliffe

Le critère de Nash-Sutcliffe quantifie la fraction de la variance observée qui est prise en compte par le modèle. Il prend des valeurs allant de $-\infty$ à 1 ; plus l'efficacité est proche de 1, plus l'accord entre la modélisation et l'observation est meilleur.

$$Nash = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_{obs}} (Y_{i\ mod} - Y_{i\ obs})^2}{\sum_{i=1}^{n_{obs}} (Y_{i\ mod} - \bar{Y}_{obs})^2} \right] \times 100 \quad (VI - 1)$$

où :

$Y_{i\ mod}$: Variable simulée ;

Y_{obs} : Variable observée ;

\bar{Y}_{obs} : Moyenne des observations ;

n_{obs} : Nombre d'observations.

Le critère donne beaucoup de poids aux valeurs fortes, c'est ce qui fait son point faible. Dans ce cas, on peut utiliser la même formulation sur le logarithme de la variable, ou sur leur racine carrée.

2) L'erreur moyenne quadratique (RMSE)

Ce critère est utilisé pour calculer l'écart entre les valeurs simulées et celles observées ; il est donné par :

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n_{obs}} \sum_{i=1}^{n_{obs}} (Y_{i\ mod} - Y_{i\ obs})^2 \right)} \quad (VI - 2)$$

Il donne une idée sur la dispersion entre les valeurs observées et simulées, en effet plus le critère RMSE sera faible plus l'écart entre les valeurs sera limité.

Ce critère a tendance lui aussi à donner plus de poids aux valeurs fortes et peut être appliqué sur le logarithme ou la racine carrée des valeurs afin d'améliorer la représentation des valeurs faibles.

3) Le coefficient de détermination

Il représente le carré de la corrélation entre les séries simulées et observées, son objectif est de quantifier de manière à mettre en évidence le sens et la force de la liaison des deux séries. Plus il se rapproche de la valeur 1 plus la corrélation est forte (Dagnelie, 1992) :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n ((Y_{i\text{obs}} - \bar{Y}_{\text{obs}}) \times (Y_{i\text{mod}} - \bar{Y}_{\text{mod}}))^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{i\text{obs}} - \bar{Y}_{\text{obs}})^2 \times \sum_{i=1}^n (Y_{i\text{mod}} - \bar{Y}_{\text{mod}})^2} \quad (\text{VI-3})$$

4) Coefficient de corrélation global (CgC)

C'est un indicateur de statisticien. Il varie entre 0 et 1, et est rapidement proche de 1 :

$$CgC = \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma(\varepsilon)}{\sigma(MB)} \right)^2} \quad (\text{VI-4})$$

avec :

$\sigma(\varepsilon)$: écart type sur les variations résiduelles ;

$\sigma(MB)$: écart type sur les mesures brutes.

5) Coefficient d'explication globale (CgE)

C'est un indicateur qui parle à l'ingénieur, variant linéairement selon σ . Tout comme le coefficient de corrélation globale, il varie entre 0 et 1.

- 0 : le modèle n'explique rien du tout ;
- 1 : le modèle est validé à 100%.

$$CgE = 1 - \frac{\sigma(\varepsilon)}{\sigma(MB)} \quad (VI-5)$$

Les deux derniers critères de validation ne seront pris en compte que dans l'application du modèle HST.

En plus de ces critères numériques, deux autres critères graphiques seront utilisés :

- ✚ Représentation graphique de la période de validation pour les deux séries, simulées et observées ;
- ✚ Représentation de la corrélation entre séries simulées et observées.

Ces deux tests permettent une validation visuelle du modèle.

VI-3-2 Construction des modèles

1) Le Perceptron multicouche « MLP »

Le Perceptron utilisé dans ce modèle possède les caractéristiques suivantes : **12** neurones dans la première couche, **20** neurones dans la couche cachée et une fonction de transfert du type **sigmoïde**.

L'algorithme utilisé pour la programmation de ce modèle est :

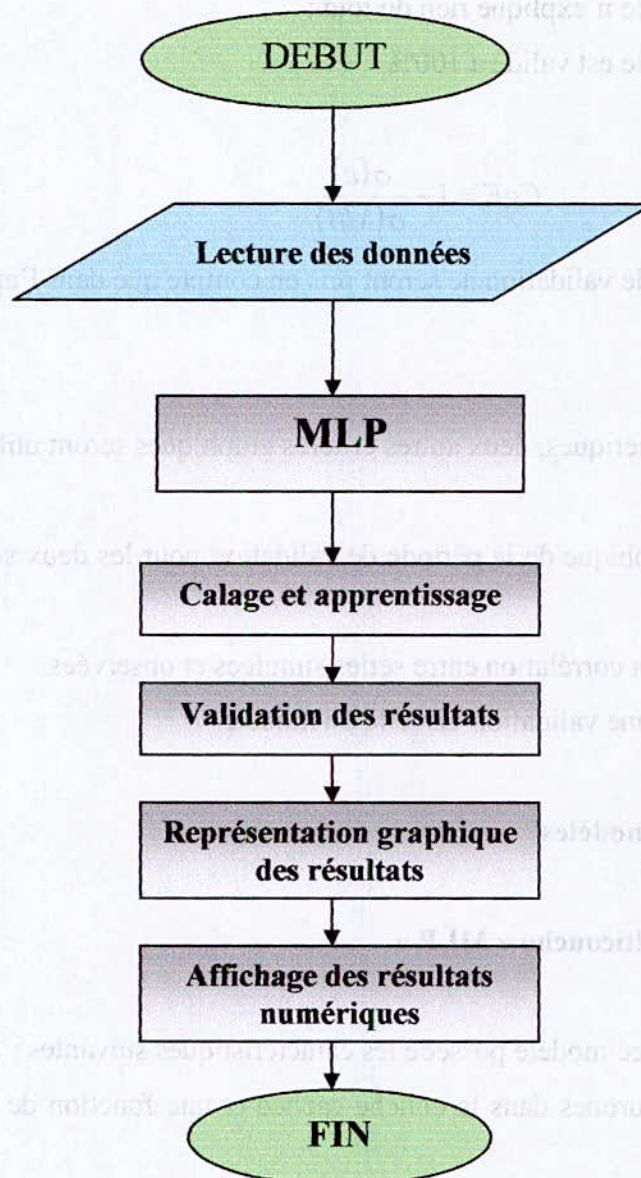


Figure VI-2 : Algorithme du MLP.

➤ **Effet de la retenue**

En introduisant dans le modèle les différentes combinaisons des quatre fonctions représentatives de la variation du niveau de la retenue on obtient les résultats représentés dans le tableau (VI-2).

Tableau VI-2: Résultats des combinaisons de l'effet de la retenue.

Paramètres	RMSE (m)	Nash (%)	R ² (%)
Z	0.71	54.2	28.2
Z+Z ²	0.70	52.9	27.1
Z+Z ² +Z ³	0.72	53.9	25.9
Z+Z ² +Z ³ +Z ⁴	0.70	51.9	29.4

Les résultats obtenus pour les différents critères ne sont pas assez significatifs pour le modèle utilisé, en effet, le fait d'introduire une ou quatre entrées n'apporte aucune amélioration consistante aux critères de validation numériques. Pour cela nous n'allons représenter graphiquement que les résultats obtenus avec la seule entrée " Z ".

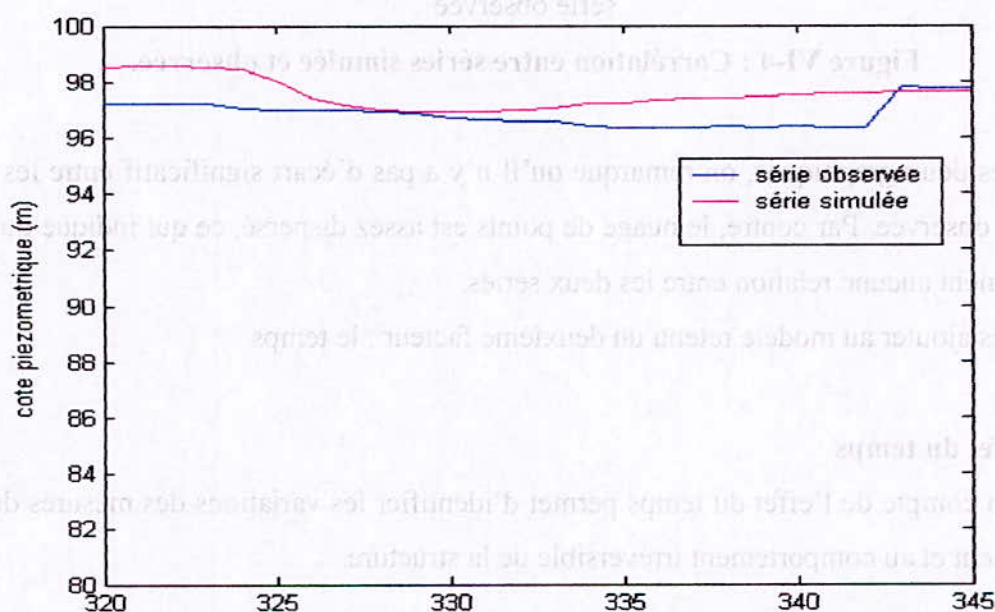


Figure VI-3 : Evolution des séries simulée et observée durant la période de validation.

Paramètres	RMSE (m)	Nash (%)	R ² (%)
Z	0.71	54.2	28.2
Z+Z ²	0.70	52.9	27.1
Z+Z ² +Z ³	0.72	53.9	25.9
Z+Z ² +Z ³ +Z ⁴	0.70	51.9	29.4

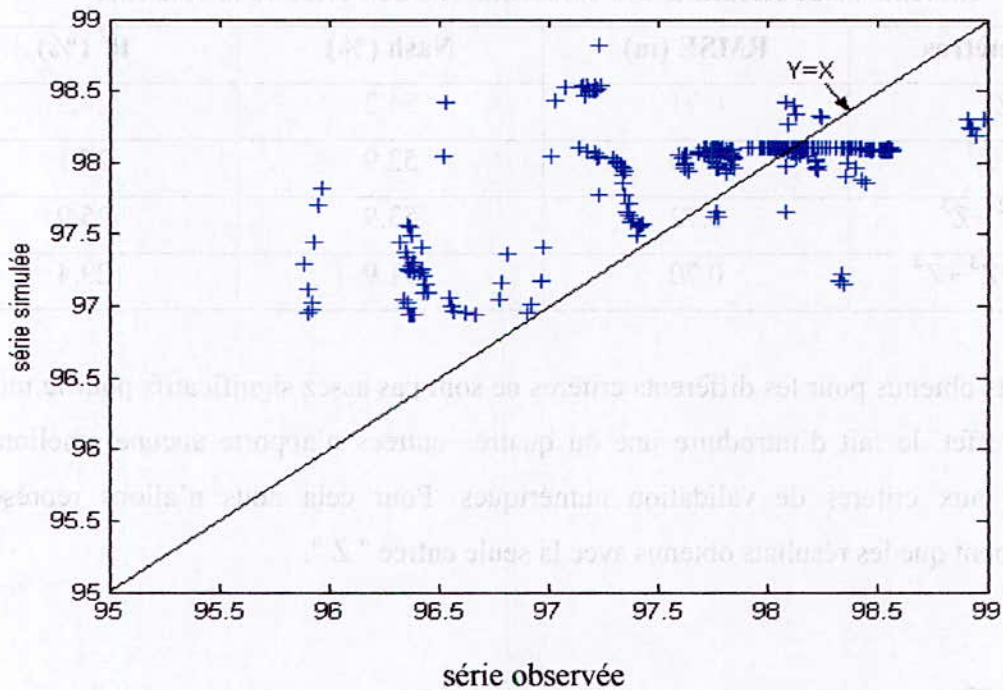


Figure VI-4 : Corrélation entre séries simulée et observée.

D'après ces deux graphiques, on remarque qu'il n'y a pas d'écart significatif entre les séries simulée et observée. Par contre, le nuage de points est assez dispersé, ce qui indique qu'il n'y a pratiquement aucune relation entre les deux séries.

Nous allons ajouter au modèle retenu un deuxième facteur : le temps.

➤ Effet du temps

La prise en compte de l'effet du temps permet d'identifier les variations des mesures dues au vieillissement et au comportement irréversible de la structure.

Tableau VI-3: Résultats de la combinaison des effets hydrostatique et du temps.

Paramètres	RMSE (m)	Nash (%)	R ² (%)
Z+ e ^{-t}	0.71	54.3	28.9
Z+ e ^t	0.81	-3.94	1.08
Z+t	0.32	84.4	84.7

D'après ces résultats, on remarque que la prise en compte des effets accéléré et retardé explicités respectivement par e^t et e^{-t}, le premier manquant complètement les résultats et le second n'apportant aucune amélioration au résultats précédent (Z seule). Par contre l'effet

seront pas pris en compte dans la suite des modèles réseaux de neurones. La combinaison retenue dans ce cas est (Z+t), et c'est pour cette dernière que nous présentons les résultats graphiques.

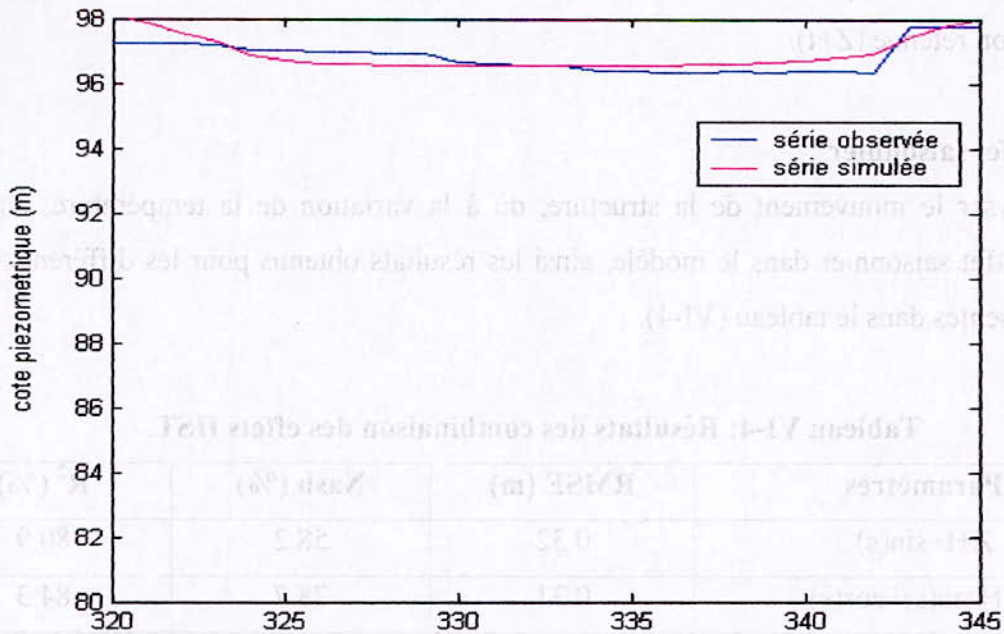


Figure VI-5 : Evolution des séries simulée et observée durant la période de validation.

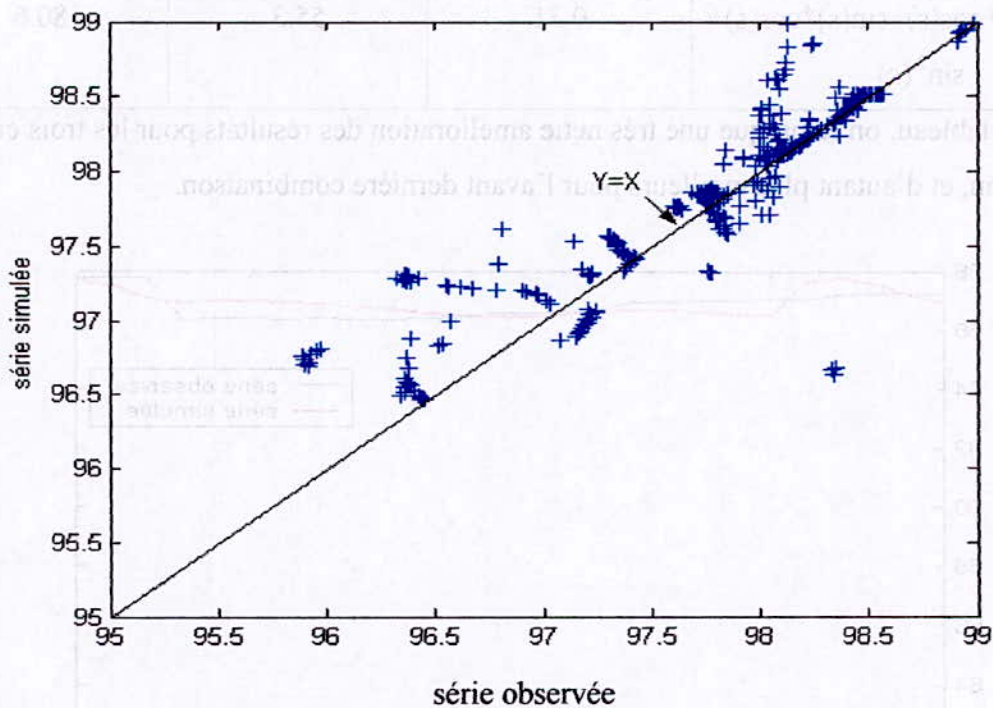


Figure VI-6 : Corrélation entre séries simulée et observée.

D'après ces graphiques on voit que la courbe de la série simulée s'ajuste bien à celle observée, et que la dispersion du nuage de point entre les deux séries s'est réduite considérablement par rapport à l'entrée Z seule.

Afin de voir le comportement du modèle, on a rajouté l'effet saisonnier à la meilleure combinaison retenue (Z+t).

➤ Effet saisonnier

Pour analyser le mouvement de la structure, dû à la variation de la température, on peut ajouter l'effet saisonnier dans le modèle, ainsi les résultats obtenus pour les différents effets sont représentés dans le tableau (VI-4).

Tableau VI-4: Résultats des combinaison des effets HST.

Paramètres	RMSE (m)	Nash (%)	R ² (%)
Z+t+sin(s)	0.32	58.2	80.9
Z+t+sin(s)+cos(s)	0.31	78.7	84.3
Z+t+sin(s)+cos(s)+sin ² (s)	0.39	72.4	76.9
Z+t+sin(s)+cos(s)+sin(s)*cos(s)	0.28	90.1	88.3
Z+t+sin(s)+cos(s)+sin(s)*cos(s)+sin ² (s)	0.31	55.3	80.6

D'après ce tableau, on remarque une très nette amélioration des résultats pour les trois critères de validation, et d'autant plus meilleurs pour l'avant dernière combinaison.

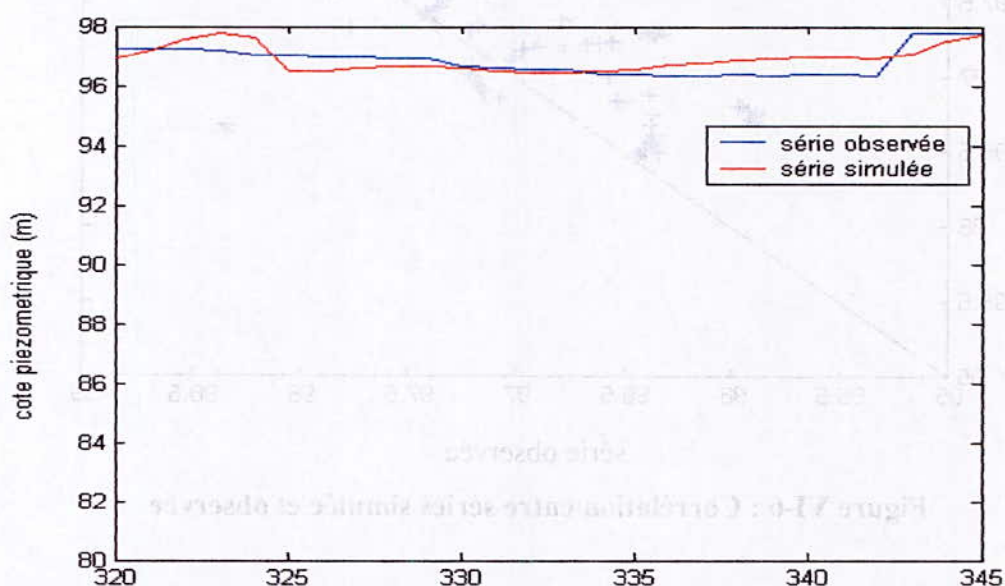


Figure VI-7 : Evolution des séries simulée et observée durant la période de validation.

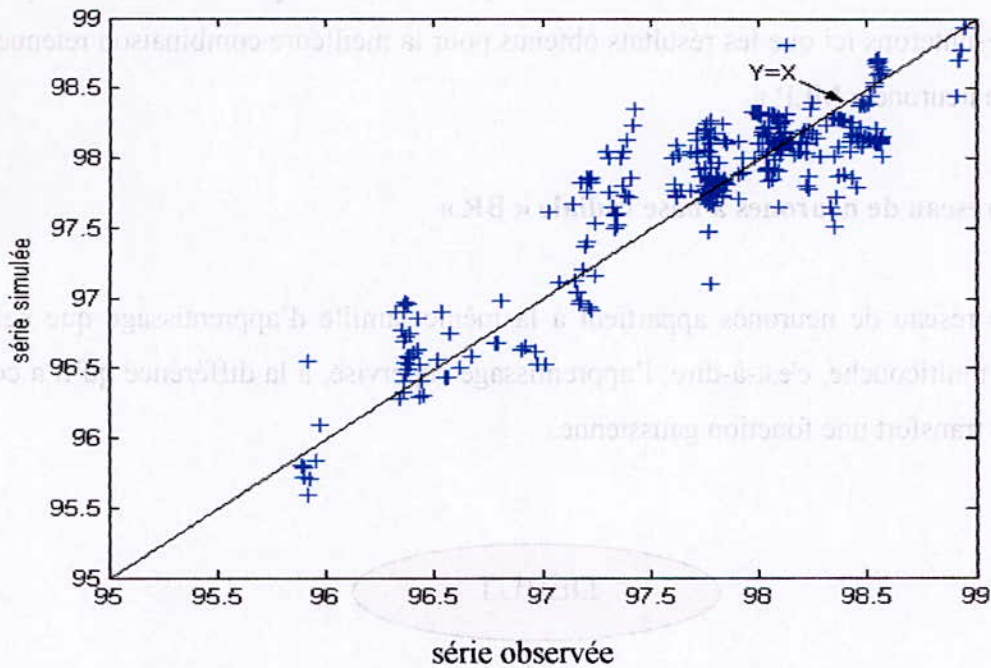


Figure VI-8 : Corrélation entre séries simulée et observée.

Les critères graphiques confirment les résultats obtenus numériquement, en effet, l'on note une nette réduction de la dispersion du nuage de points entre les deux séries, ainsi, qu'un très faible écart entre la série simulée et celle observée durant la période de validation du modèle.

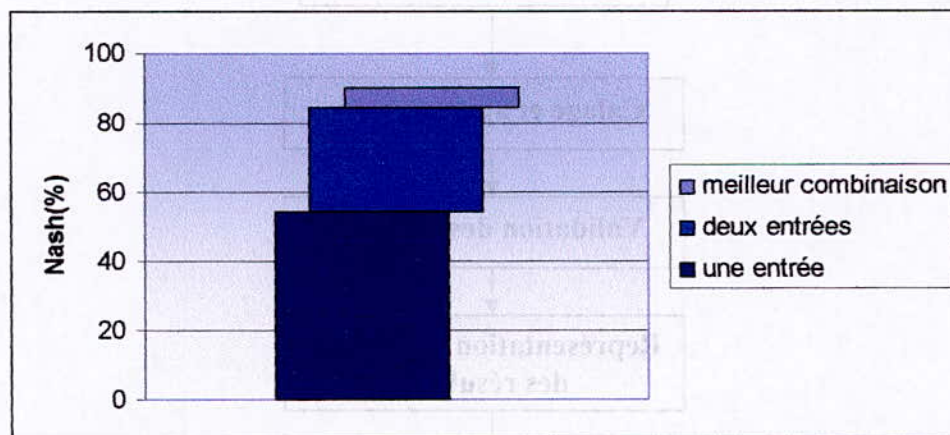


Figure VI-9 : Comparaison des résultats obtenus pour les différentes combinaison.

En conclusion, la combinaison à retenir pour le réseau de neurone utilisé « MLP » et celle qui a donné les meilleurs résultats numériques et graphiques en même temps, dans notre cas : « $Z+t+\sin(s)+\cos(s)+\sin(s)*\cos(s)$ ».

La même démarche a été adoptée pour les deux autres types de réseaux de neurones pour lesquels on a testé les différentes combinaisons possibles, mais pour un souci de synthèse, nous ne présenterons ici que les résultats obtenus pour la meilleure combinaison retenue pour le réseau de neurone « MLP ».

2) Le réseau de neurones à base radiale « BR »

Ce type de réseau de neurones appartient à la même famille d'apprentissage que celle du Perceptron multicouche, c'est-à-dire, l'apprentissage supervisé, à la différence qu'il a comme fonction de transfert une fonction gaussienne.

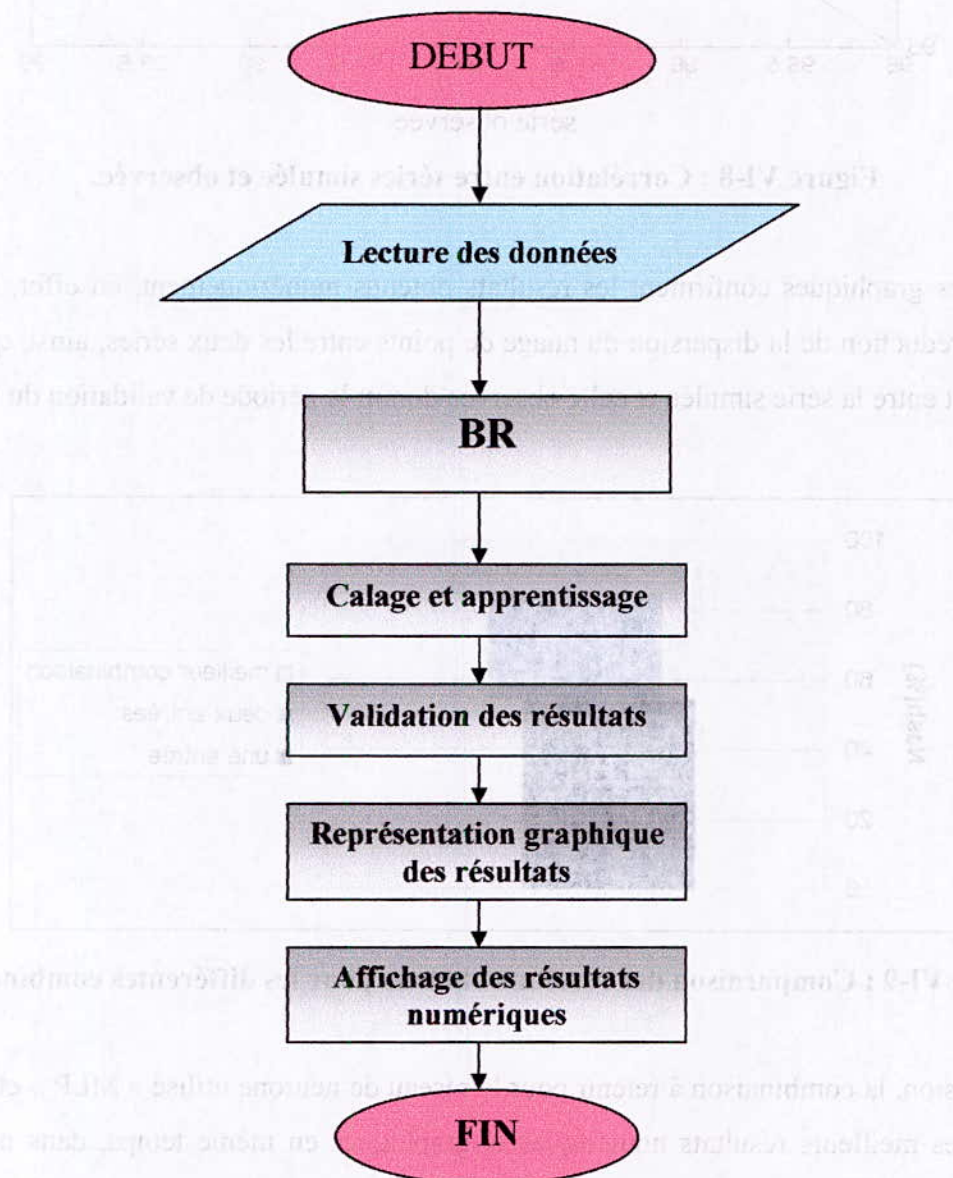


Figure VI-10 : Algorithme du BR.

Les résultats obtenus pour la combinaison retenue sont présentés dans le tableau VI-5.

Tableau VI-5: Résultats de la meilleure combinaison.

Paramètres	RMSE (m)	Nash (%)	R ² (%)
Z+t+sin(s)+cos(s)+sin(s)*cos(s)	0.15	80.9	94.2

Ceux-ci montrent une nette amélioration du coefficient de détermination ainsi que de la RMSE par rapport au premier modèle. Par contre on remarque une diminution pour le coefficient de Nash.

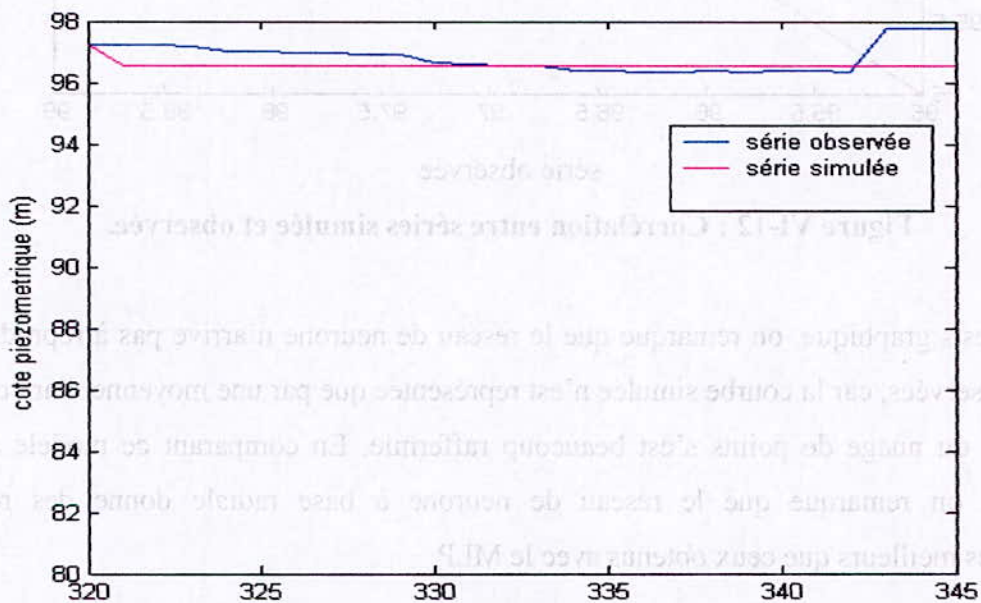


Figure VI-11 : Evolution des séries simulée et observée durant la période de validation.

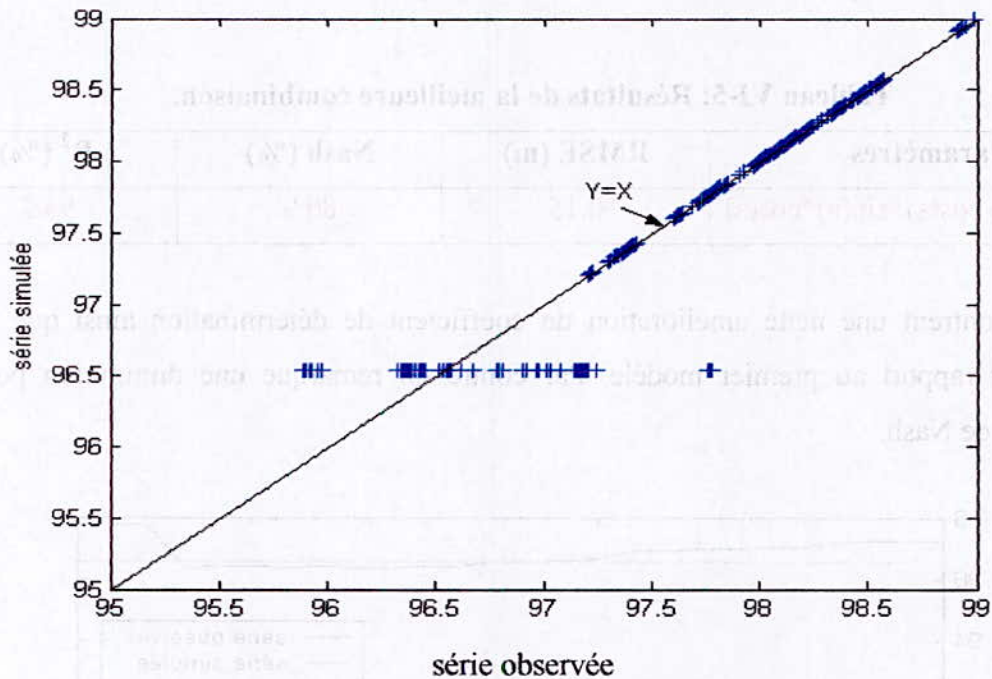


Figure VI-12 : Corrélation entre série simulée et observée.

Pour les tests graphique, on remarque que le réseau de neurone n'arrive pas à reproduire les valeurs observées, car la courbe simulée n'est représentée que par une moyenne. Par contre, la dispersion du nuage de points s'est beaucoup raffermie. En comparant ce modèle avec le précédent, on remarque que le réseau de neurone à base radiale donne des résultats numériques meilleurs que ceux obtenus avec le MLP.

3) Le réseau de neurone généralisé par une régression linéaire « GRL »

Ce modèle est identique aux réseaux de neurones à base radiale, sauf que sa fonction de sortie est linéaire. Le tableau VI-6 résume les résultats obtenus pour la combinaison retenue. L'algorithme utilisé est le suivant :

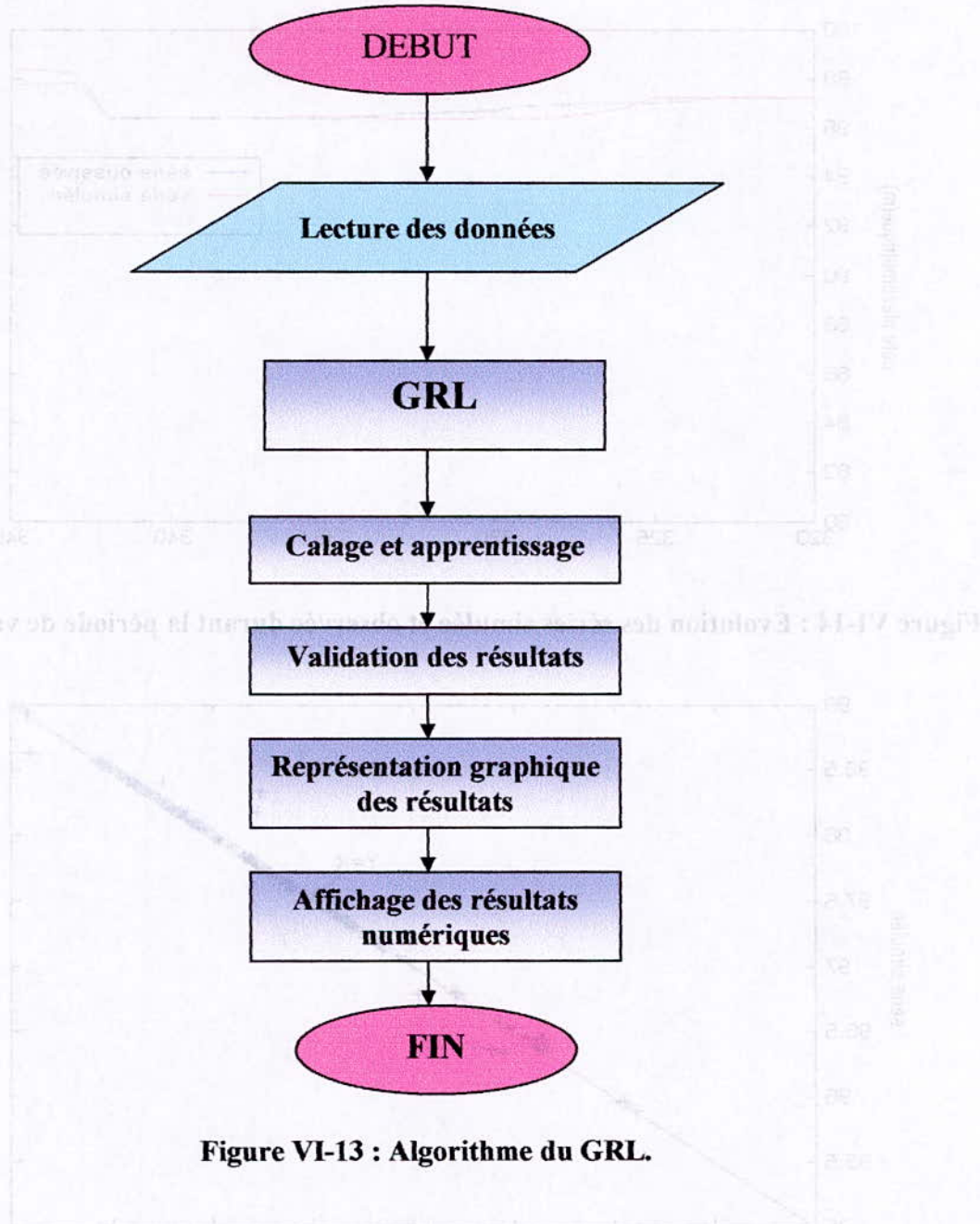


Figure VI-13 : Algorithme du GRL.

Tableau VI-6: Présentation des résultats.

Paramètres	RMSE (m)	Nash (%)	R ² (%)
Z+t+sin(s)+cos(s)+sin(s)*cos(s)	0.02	95.3	99.2

Pour ce dernier modèle, on remarque une très nette amélioration des critères de validation numériques. Les représentations graphiques de la combinaison donnant les meilleurs résultats sont présentées ci-dessous :

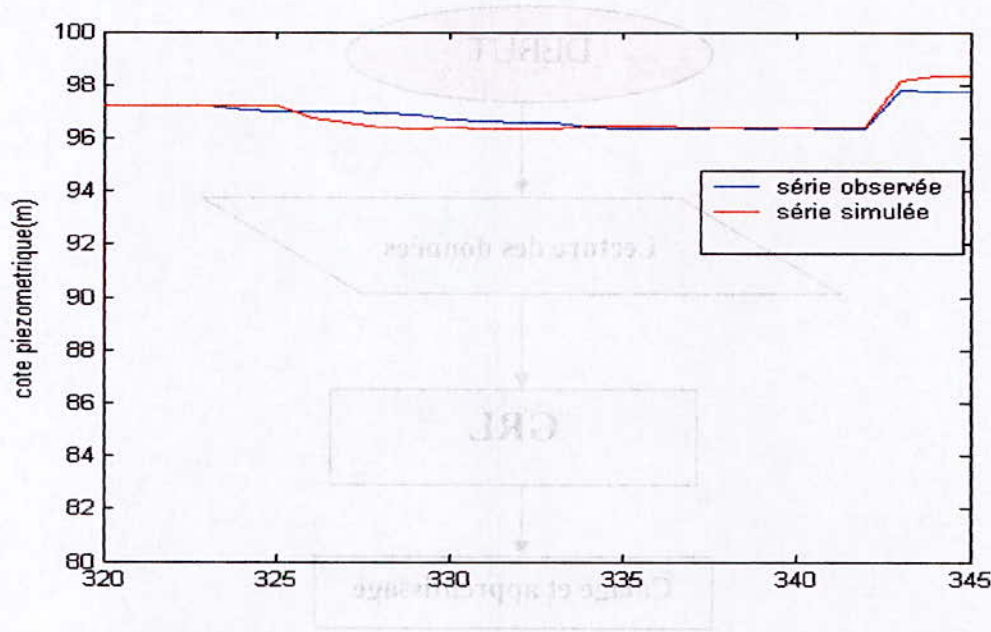


Figure VI-14 : Evolution des séries simulée et observée durant la période de validation.

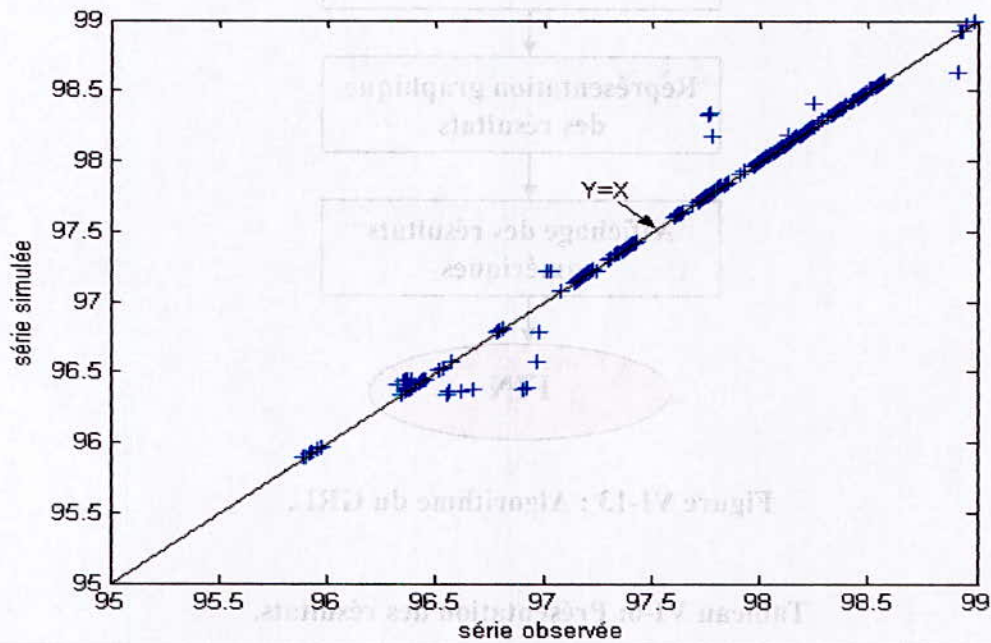


Figure VI-15 : Corrélation entre séries simulée et observée.

On voit que les deux courbes sont pratiquement collées, et qu'il n'y a aucune dispersion du nuage de point, celui-ci s'ajuste très bien à la droite ($Y=X$), ce qui montre la grande corrélation entre les deux séries.

4) Comparaison des résultats

Pour la comparaison des trois différents modèles, on a établi des graphiques montrant l'évolution des critères de validation en fonction des modèles utilisés.

En prenant comme notation :

- ✦ (A) : Réseau de neurone à base radial généralisé par une régression linéaire ;
- ✦ (B) : Réseau de neurone à base radial ;
- ✦ (C) : Perceptron multicouches.

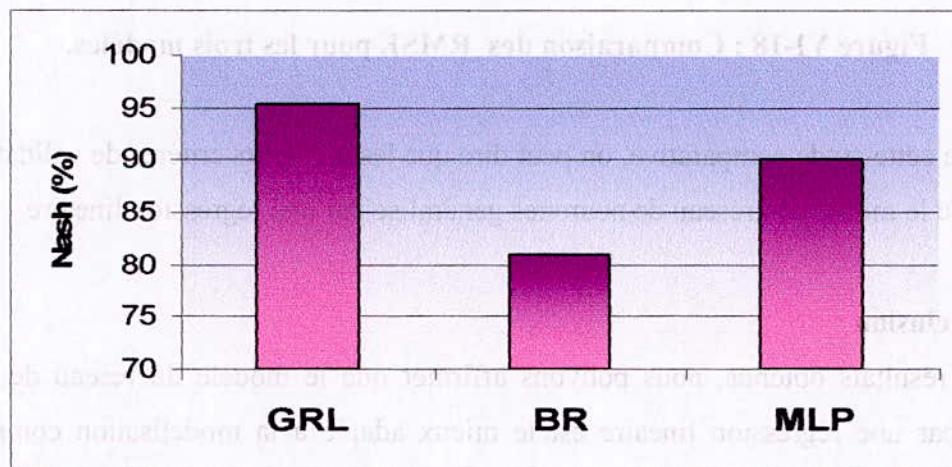


Figure VI-16 : Comparaison des coefficients de Nash pour les trois modèles.

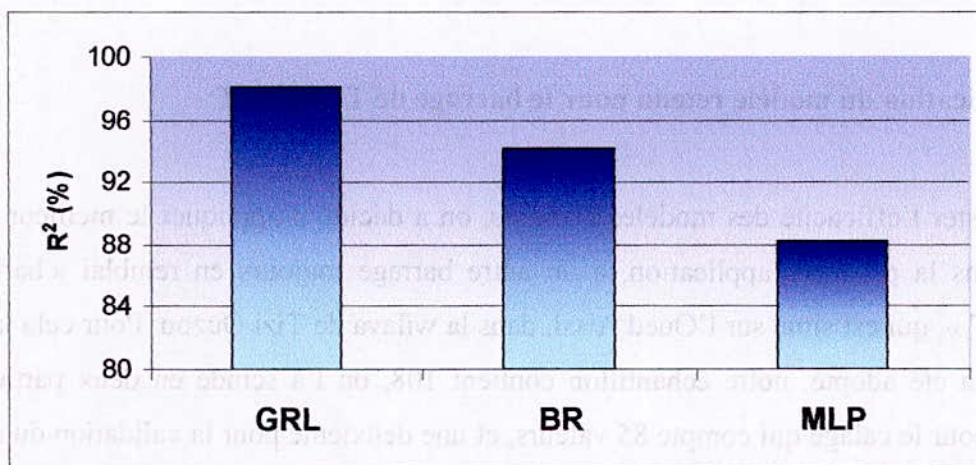


Figure VI-17 : Comparaison des coefficients R^2 pour les trois modèles.

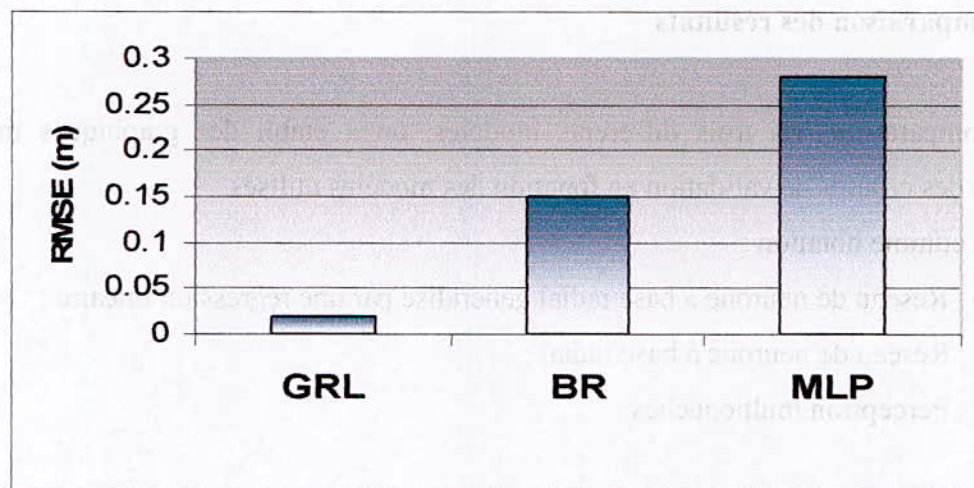


Figure VI-18 : Comparaison des RMSE pour les trois modèles.

Au terme de cette étude comparative, on peut dire que les meilleurs critères de validation sont obtenus avec le modèle du réseau de neurones généralisé par une régression linéaire.

➤ Conclusion

Au vu des résultats obtenus, nous pouvons affirmer que le modèle du réseau de neurone généralisé par une régression linéaire est le mieux adapté à la modélisation complexe de l'auscultation du barrage de KEDDARA, mais cela ne diminue en rien le potentiel et la capacité du Perceptron multicouches et du réseau de neurone à base radiale à modéliser un tel problème.

VI-4 Application du modèle retenu pour le barrage de TAKSEBT

Afin de tester l'efficacité des modèles élaborés, on a décidé d'appliquer le meilleur modèle obtenu dans la première application, à un autre barrage toujours en remblai « barrage de TAKSEBT », qui est situé sur l'Oued Aissi, dans la wilaya de Tizi Ouzou. Pour cela la même démarche a été adoptée, notre échantillon contient 108, on l'a scindé en deux parties : une première pour le calage qui compte 85 valeurs, et une deuxième pour la validation du modèle. L'appareil de mesure utilisé est un piézomètre placé dans les alluvions, sur le profil 4, qui a comme côte 90.52 m.

1) Le réseau de neurone généralisé par une régression linéaire

➤ Effet de la retenue

En introduisant dans le modèle les différentes combinaisons des quatre fonctions représentatives de la variation du niveau de la retenue on obtient les résultats représentés dans le tableau (VI-7).

Tableau VI-7: Résultats des combinaisons de l'effet hydrostatatique.

Paramètres	RMSE (m)	Nash (%)	R ² (%)
Z	2.29	96.6	92.3
Z+Z ²	2.13	96.6	93.3
Z+Z ² +Z ³	2.05	96.6	93.7
Z+Z ² +Z ³ +Z ⁴	2.03	96.6	93.9

Les résultats obtenus pour les différents critères sont très significatifs pour le modèle utilisé, le fait d'introduire une ou quatre entrées apporte une amélioration non consistante aux critères de validation numériques. Pour cela nous n'allons retenir que le modèle avec la seule entrée " Z ".

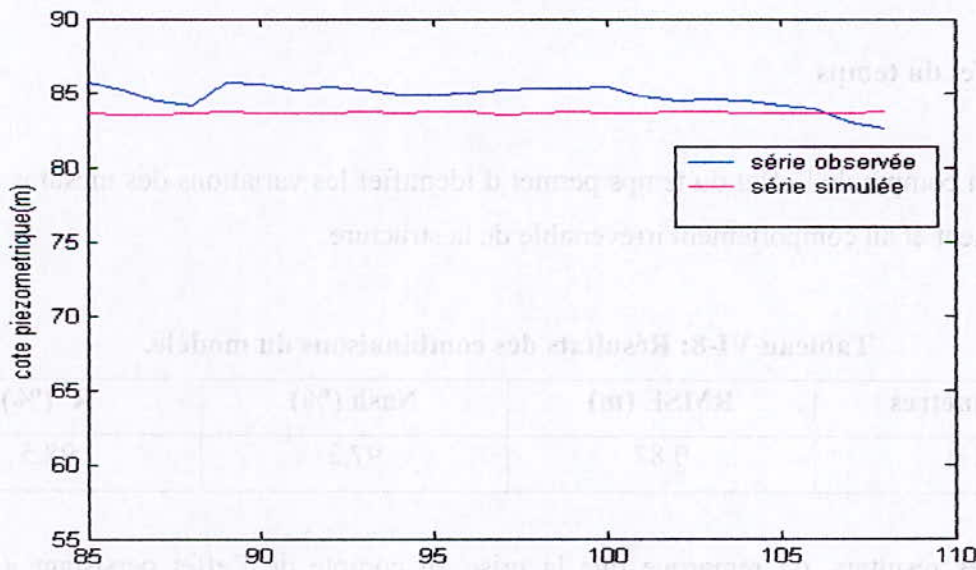


Figure VI-19 : Evolution des séries simulée et observée durant la période de validation.

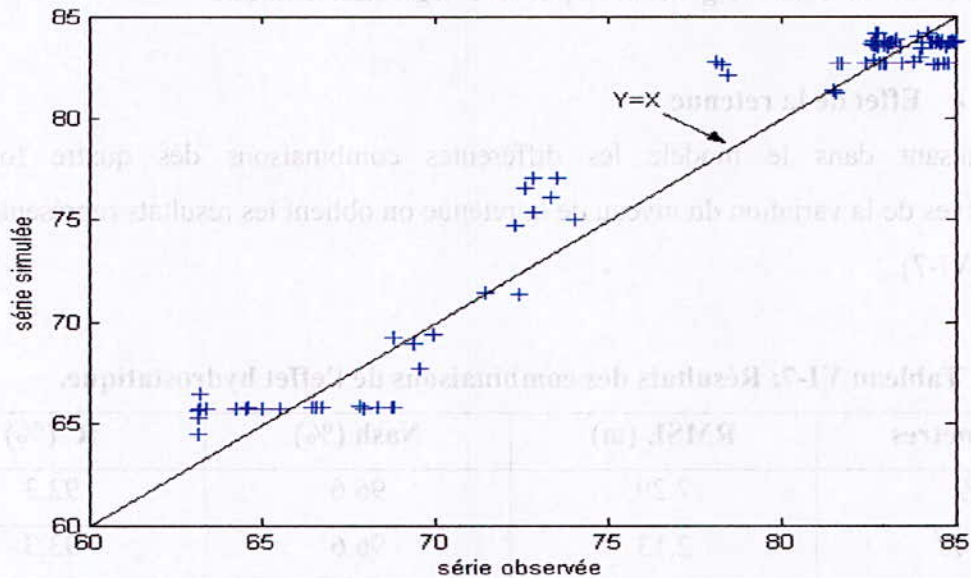


Figure VI-20 : Corrélation entre séries simulée et observée.

Le premier graphique montre que la série simulée est représentée par une courbe moyenne, ce genre de chose est spécifique aux réseaux de neurones, qui quand ils n'arrivent pas à reproduire la série observée, simulent une moyenne de cette dernière. Par contre, on remarque que le deuxième graphique indique que de points serpente la droite ($Y=X$), ce qui indique une bonne corrélation entre les deux séries.

Nous allons rajouter au modèle retenu un deuxième facteur : le temps.

➤ Effet du temps

La prise en compte de l'effet du temps permet d'identifier les variations des mesures dues au vieillissement et au comportement irréversible de la structure.

Tableau VI-8: Résultats des combinaisons du modèle.

Paramètres	RMSE (m)	Nash (%)	R^2 (%)
Z+t	0.87	97.3	98.5

D'après ces résultats, on remarque que la prise en compte de l'effet persistant « t », les améliore nettement. La représentation graphique pour la meilleure combinaison, c'est-à-dire, « Z+t » de la période de validation ainsi que la corrélation entre les séries simulées et observées confirme les résultats obtenus.

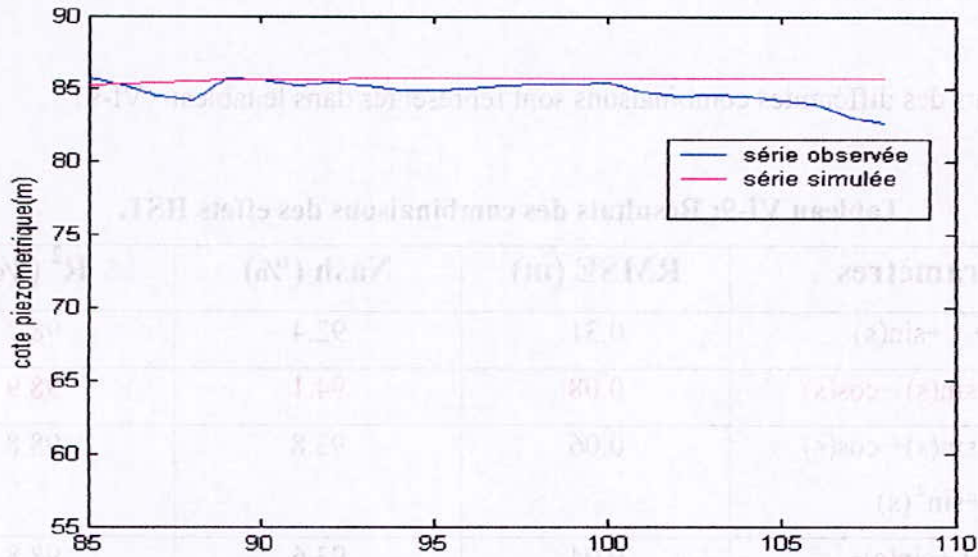


Figure VI-21 : Evolution des séries simulée et observée durant la période de validation.

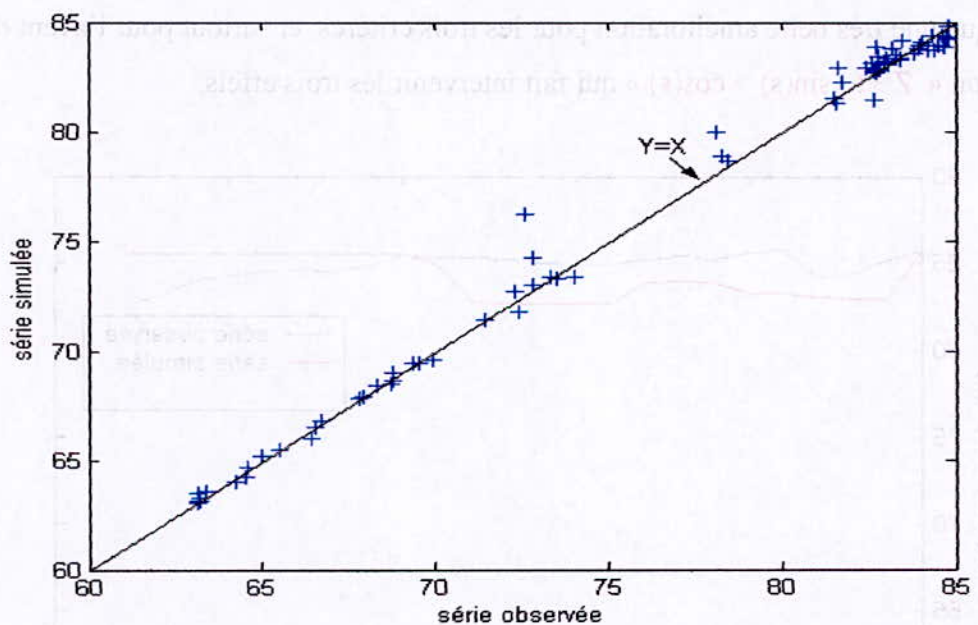


Figure VI-22 : Corrélation entre séries simulée et observée.

Pour la représentation de la période de validation, on remarque que c'est toujours le même problème qui revient, le réseau de neurone n'arrive toujours pas à reproduire les valeurs observées, car la courbe simulée représente toujours une moyenne. Par contre, sur la deuxième figure, on voit une très nette diminution de la dispersion du nuage de points, ceux-ci s'ajustent presque à la droite ($Y=X$).

On a rajouté l'effet saisonnier à la meilleure combinaison retenue.

➤ Effet saisonnier

Les résultats des différentes combinaisons sont représentés dans le tableau (VI-9).

Tableau VI-9: Résultats des combinaisons des effets HST.

Paramètres	RMSE (m)	Nash (%)	R ² (%)
Z+ t +sin(s)	0.31	92.4	98.7
Z+ t +sin(s)+ cos(s)	0.08	94.1	98.9
Z+ t +sin(s)+ cos(s) +sin ² (s)	0.06	93.8	98.8
Z +t +sin(s)+ cos(s)+sin(s)*cos(s)	0.04	93.6	98.8

On remarque une très nette amélioration pour les trois critères, et surtout pour l'avant dernière combinaison « Z +t +sin(s) + cos(s) » qui fait intervenir les trois effets.

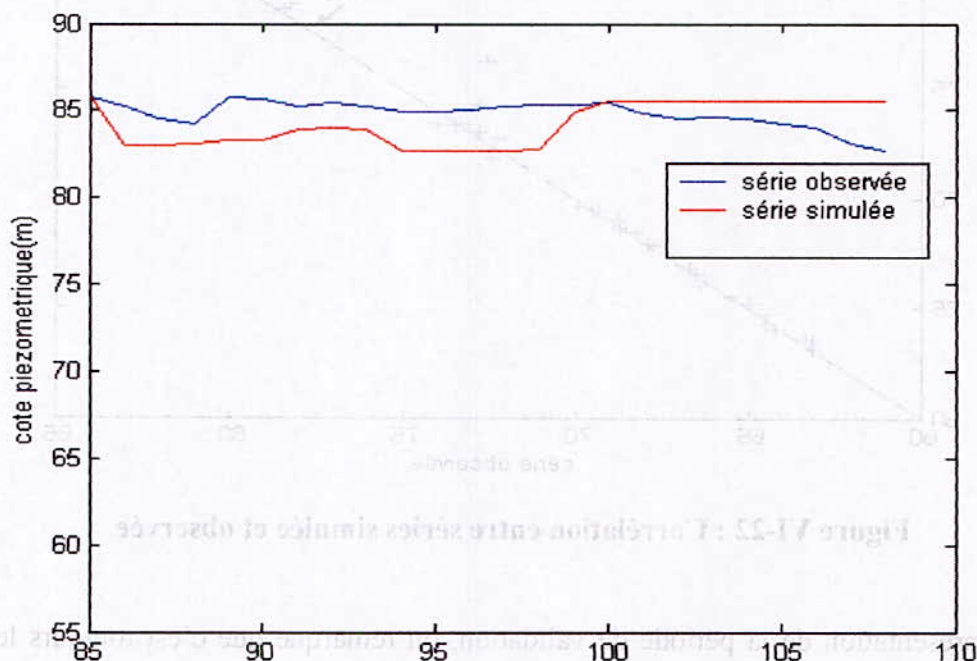


Figure VI-23 : Evolution des séries simulée et observée durant la période de validation.

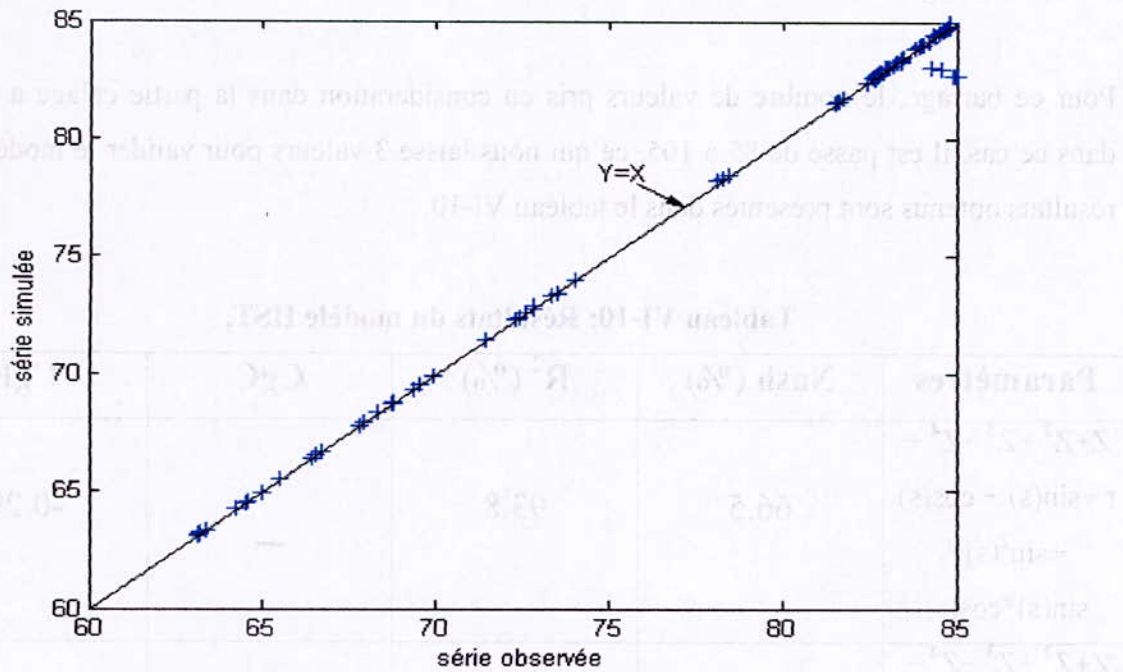


Figure VI-24 Corrélation entre séries simulée et observée.

On remarque dans ce cas, que la courbe de la série simulée durant la période de validation n'est plus représentée par une moyenne, au contraire celle-ci suit l'allure de celle observée, ce qui veut dire que le réseau de neurone arrive à reproduire les valeurs observées. Ceci se confirme aussi par la représentation de la corrélation entre les deux séries, où l'on remarque que le nuage de points est bien ajusté collé à la droite ($Y=X$), ce qui indique une très forte corrélation entre les deux séries.

❖ Conclusion

Pour le barrage de TAKSEBT, on remarque que même en ne prenant en compte que l'effet hydrostatique on arrive à de très bons résultats. Contrairement au barrage de KEDDARA, qui ne commence à donner de bons résultats qu'après introduction de l'effet du temps.

VI-5 Modèle HST

En ce qui concerne le modèle statistique HST, la même démarche a été adoptée que précédemment, mais toujours par soucis de synthèse, nous ne présenterons que les résultats donnés par les meilleures combinaisons, et cela pour les deux barrages.

1) Barrage de TAKSEBT

Pour ce barrage, le nombre de valeurs pris en considération dans la partie calage a changé dans ce cas, il est passé de 85 à 105, ce qui nous laisse 3 valeurs pour valider le modèle. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau VI-10.

Tableau VI-10: Résultats du modèle HST.

Paramètres	Nash (%)	R ² (%)	CgC	CgE
$Z+Z^2+Z^3+Z^4 +$ $t + \sin(s) + \cos(s)$ $+ \sin^2(s) +$ $\sin(s)*\cos(s)$	66.5	93.8	—	-0.29
$Z+Z^2+Z^3+Z^4 +$ $t + \sin(s) + \cos(s)$ $+ \sin^2(s) + e^{-t}$ $\sin(s)*\cos(s)$	76.8	93.9	0.85	0.48

D'après ce tableau, on remarque que le modèle donne de bons résultats pour les trois premiers critères, mais pas assez pour le coefficient CgE et ce pour la deuxième combinaison, par contre pour la première cela n'est pas le cas, car on remarque que les deux coefficients spécifiques au modèle HST ne donnent aucun résultat significatif. C'est pour cela que dans la suite de l'application, on appliquera seulement la deuxième combinaison.

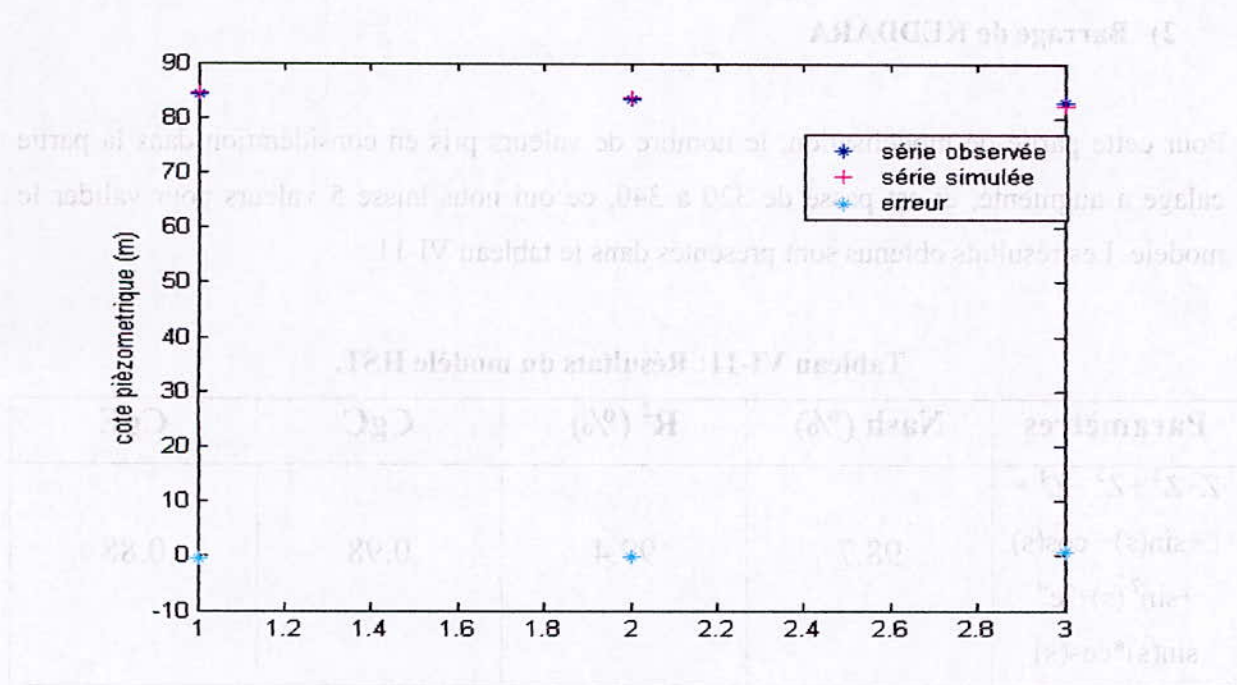


Figure VI-25: Evolution des séries simulée et observée durant la période de validation.

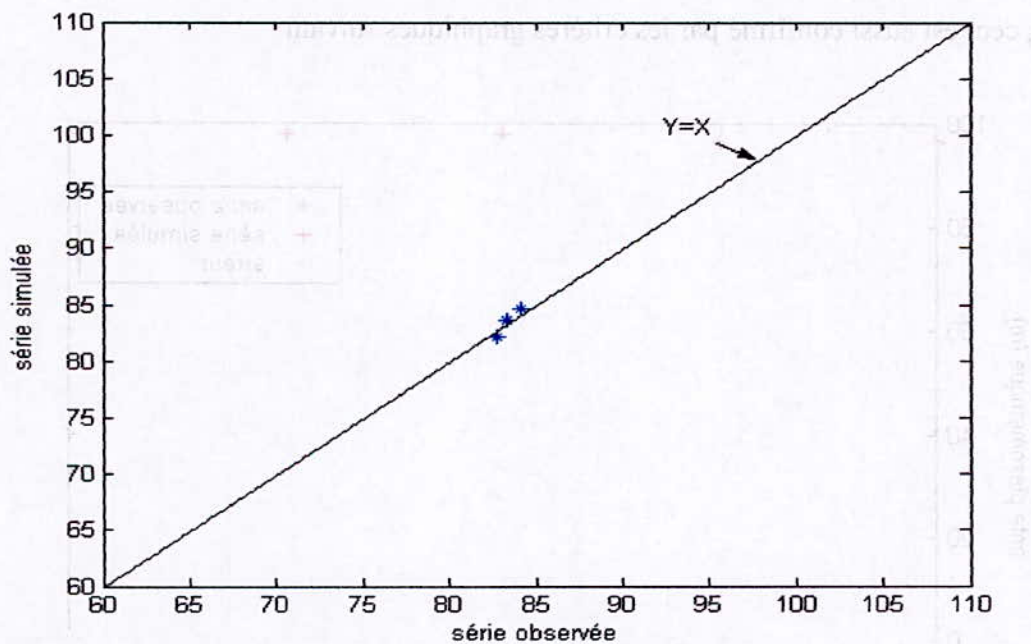


Figure VI-26 Corrélation entre séries simulée et observée (validation).

On voit que pour la représentation graphique de la meilleure combinaison, les deux séries simulée et observée sont pratiquement collées l'une sur l'autre, et qu'il y'a une très forte corrélation entre elles, ce qui confirme les bons résultats des critères numériques.

2) Barrage de KEDDARA

Pour cette partie de modélisation, le nombre de valeurs pris en considération dans la partie calage a augmenté, et est passé de 320 à 340, ce qui nous laisse 5 valeurs pour valider le modèle. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau VI-11.

Tableau VI-11: Résultats du modèle HST.

Paramètres	Nash (%)	R ² (%)	CgC	CgE
$Z+Z^2+Z^3+Z^4+$ $t+\sin(s)+\cos(s)$ $+\sin^2(s)+e^{-t}$ $\sin(s)*\cos(s)$	98.7	99.4	0.98	0.88

D'après les résultats obtenus, on remarque que les résultats numériques valident très bien le modèle, ceci est aussi confirmé par les critères graphiques suivant :

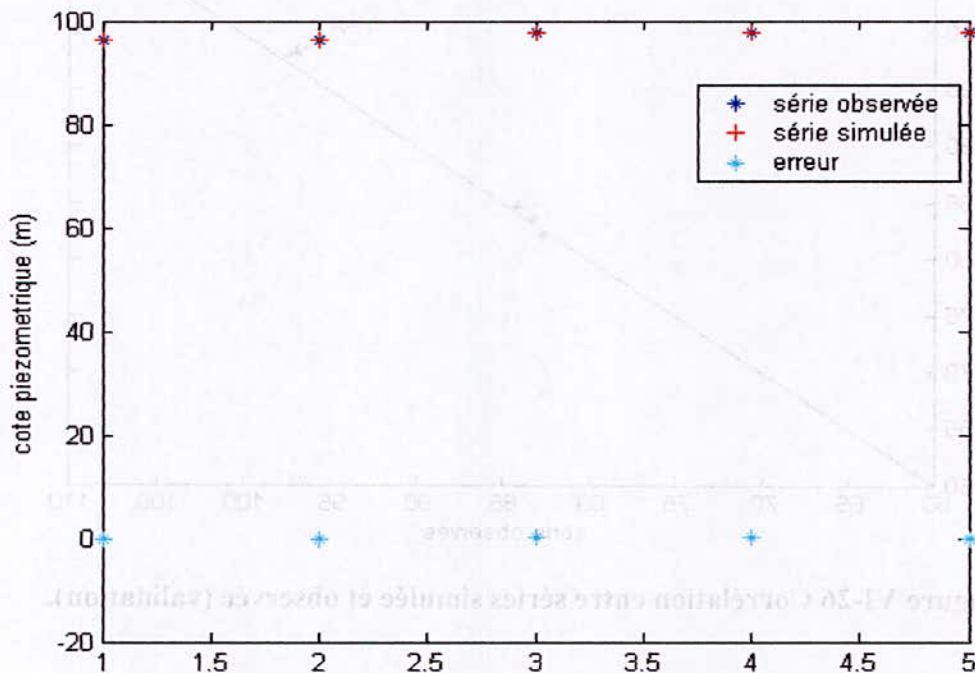


Figure VI-27: Evolution des séries simulée et observée durant la période de validation.

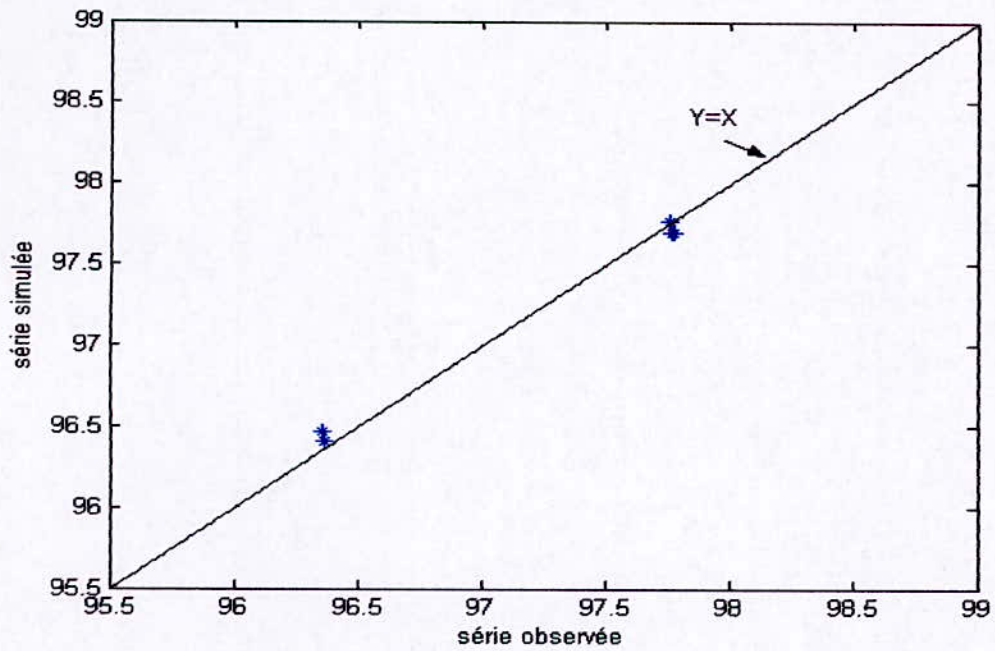


Figure VI-28: Corrélation entre séries simulée et observée (validation).

On remarque en effet, que les deux séries simulée et observée sont très bien collées l'une sur l'autre, et qu'il y'a une très forte corrélation entre elles, ce qui confirme aussi les bons résultats numériques obtenus.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Pour éviter d'éventuels problèmes au niveau des ouvrages d'accumulation, une approche globale de la sécurité a été développée, et se base sur la triptyque :

- sécurité structurale ;
- surveillance ;
- intervention en cas d'urgence.

Les ouvrages doivent être conçus et réalisés selon des normes scientifiques et techniques de telle façon à garantir la sécurité pour tous les cas de charges et d'exploitation possibles.

La surveillance régulière basée sur le contrôle et la modélisation a pour effet de prévenir toute dégradation afin de maintenir en bon état de sécurité l'ouvrage et ainsi permettre à ce dernier de remplir ses fonctions

Ce travail a pour objectif d'apporter une contribution à la modélisation de l'auscultation des barrages, et cela à l'aide de deux techniques :

La première basée sur l'intelligence artificielle utilisant les réseaux de neurones : Trois différents modèles ont été élaborés, le perceptron multicouches (MLP), le réseau de neurones à base radiale (BR) et le réseau de neurones généralisé par une régression linéaire (GRL).

Une première application a été réalisée pour le barrage de Keddara, pour les trois modèles utilisés, on remarque :

En ce qui concerne le MLP, les différentes combinaisons utilisées des paramètres entrants en jeu ont été testées afin d'aboutir à la combinaison donnant les meilleurs résultats possibles. Ce modèle donne certes d'assez bons résultats mais possède un inconvénient majeur qui est le temps de calcul.

Le deuxième modèle utilisé est le BR, pour ce modèle on a pris la meilleure combinaison trouvée avec le MLP et on l'a appliqué au modèle. Les résultats obtenus sont meilleurs que ceux obtenus par le MLP, et que le temps de calcul dans ce cas a nettement diminué.

Enfin, pour le dernier modèle élaboré dans cette partie le GRL ; on remarque une très nette amélioration des résultats numériques et graphiques et un temps de calcul très réduit.

Une seconde application a été faite au barrage de Taksebt, dans ce cas on a utilisé le meilleur modèle résultant à savoir le GRL avec différentes combinaisons possibles.

Les résultats obtenus ont confirmé les meilleures combinaisons obtenues.

Une seconde approche basée sur la statistique et utilisant le modèle « HST » (Hydrostatique-Saison-Temps) a été développée.

Un logiciel constitué de quatre modules a été mis au point, ce dernier a permis de tester les différentes combinaisons.

Cette approche basée sur le modèle HST reste à peaufiner surtout pour les paramètres qui ont une évolution assez faible dans le temps, ainsi que pour l'optimisation des paramètres influents cette approche.

Références bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Amberge W., Bossoney C., Darbre G., Hammer J., Otto B., Studer J., Wieland M. (2003): " Documentation de base pour la verification des ouvrages d'accumulation aux séismes" .Rapport de l'OFEG(office fédéral des eaux et de la géologie).Série eaux. Bienne. Allemagne.

Bonelli S., Felix H., Tourment R. (1998): "Interprétation des mesures d'auscultation des barrages par régression linéaire multiples HST". Proc. 2^{ème} conférence nationale de la fiabilité des matériaux et des structures. Université de Marne la vallée. France.

Boutayeb N., Lamrin O., Bayoumi M. (2000): "CONDOR II software package genesis and evolution". 20th congress of the ICOLD(International commission on large Dams). Beijing. Question Q.78. China.

Bremen R., Collet G., Hunger B., Kobelt A.,Mathey F., Oberholzer A., Pougatsch H., Rouiller J.M. (2002) : " Sécurité des ouvrages d'accumulation ". Rapport de l'OFEG(Office fédéral des eaux et de la géologie). Documentation de base relative à la surveillance et à l'entretien. Série eaux. Bienne. Allemagne.

Cemagref. (2002): " Gardiens des eaux, barrages et digues sous surveillance ". Dossiers thématiques. France.

Coyne et Bellier. (2001): " Interprétation des mesures d'auscultation des ouvrages". France.

Dagnielie P. (1992):" Statistique théorique appliquée tom 1". Les presses agronomiques de Grenoble. France.

Davalo E., Naim P.(1991) : " Des réseaux de neurones ". Eyrolles.

Dibiagio E. (2000): " Monitoring of dams and their foundation". 20th congress of the ICOLD (International commission on large Dams). Beijing. Question Q.78. China.

Dreyfus G. (2002) : " Réseaux de neurones, méthodologie et application ". Eyrolles. France.

Encarta. Encyclopédie Microsoft. (2004) : " Barrage".

Framling K. (1992) : " Les réseaux de neurones comme outils d'aide à la décision floue".
Rapport DEA. Ecole nationale supérieure des mines de saint-etiène. France.

Lazzarotto O. (1998) : "Les travaux de suivi, d'entretien et de rénovation des barrages et retenues d'eau ". Université de Savoie. France.

Lecornue M. (2004) : " Les barrages et la sécurité". CIGB(Comité international des grands barrages).

Leray P. (1998) : " Quelques types de réseaux de neurones ". Laboratoire PSI. INSA.
Rouen. France.

Lino M. (2000) : " Les réseaux de neurones en auscultation de barrage". Communication
orale. 20^{ème} congrès de CIGB (comité international des grands barrages). Beijing. China.

Lugiez F., Beaujoint N., Hardy X. (1970) : " L'auscultation des barrages en exploitation
au service de la production Hydrauliques d'Electricité de France, des principes aux résultats".
10^{ème} Congrès du CIGB (Comité international des grands barrages). Montréal. Question Q.38.
R.33. Canada.

Moutarde F. (2003) : " Introduction aux réseaux de neurones et a leurs applications en
automatique ". Ecole des mines de Paris. France.

Plageos B. (1997) : " Thème mobilisateur, évaluation de modèles ". Cemagref. France.

Parizeau M. (2004) : " Réseaux de neurones ". Université Laval. France.

Peyras L. (2003) : " Diagnostic et analyse des risques lies aux vieillissements des barrages ". Cemagref. Unité de recherche ouvrages hydrauliques. France.

Touileb B., Coté P., Popovici A. (2004) : " Analysis of flow and piezometry by means of statistical models with a case study ". CDA (Canadian dam association). Annual conference. Montréal. Québec. Canada.

Touzet C. (1992) : " Les réseaux de neurones artificiels, introduction au connexionisme". LERI (Laboratoire d'étude et recherche à Nimes). France.

Virole B. (2001) : " Réseaux de neurones et psychométrie ". Edition du centre de psychologie appliquée. France.

Wieland M. (2003) : " Aspect sismique relatifs aux barrages ". 21^{ème} Congrès du CIGB (Comité international des grands barrages). Montréal. Québec. Q.83. Canada.

ملخص:

يهدف هذا العمل إلى تقديم مساهمة لفحص السدود و ذلك بالاعتماد على طريقتين مختلفتين، فالطريقة الأولى هي عبارة عن طريقة إحصائية مخصصة لدراسة فحص السدود، أما الطريقة الثانية فهي تنتمي إلى التكنولوجيا الحديثة المتعلقة بالعبقرية الاصطناعية و المتمثلة في ' الشبكة العصبونية'.
لوحظ وجود تطابق بين النتائج المتحصل عليها و ذلك عن طريق النمذجة و هذا بالطريقتين المستعملتين.

مفاتيح الكلمات:

الفحص، السدود، النمذجة، الشبكة العصبونية، طريقة احصائية.

Résumé :

Ce travail a pour objectif d'apporter une contribution à l'auscultation des barrages, et cela en élaborant deux différentes approches, la première statistique spécifique à l'auscultation, la deuxième fait partie des nouvelles technologies de l'intelligence artificielle « les réseaux de neurone ».

Une bonne concordance a été observée entre les résultats de la modélisation et les séries observées et cela avec les deux approches.

Mots clés :

Auscultation, barrages, modélisation, réseaux de neurones, méthode statistiques.

Abstract :

This work contribute to the auscultation of dams, for this purpose two different ways was used: the first one is a statistical method and the second way is one of the new technologies of artificial intelligence: Neuronal network.

A good link was remarked between the results of modelisation and the observed series.

Keywords:

Auscultation, dams, modelisation, neuronal network, statistical method.