

---

bassin. Cette base régie par un modèle relationnel qui assure une structuration informatique des données de la façon pour qu'elles puissent être manipulées ou consultées de la façon la plus fiable et lui confère une capacité d'évolution pour l'intégration d'étude.

## CHAPITRE II : SIG ET BILAN DE L'EAU DE SURFACE

Le bilan hydrologique d'un bassin versant peut s'exprimer schématiquement par la formule

suivante:

$$P = E + Q + I$$

Avec:

*P* - précipitation;

*E* - évaporation + évapotranspiration;

*Q* - écoulement;

*I* - infiltration;

Chacun des termes du bilan hydrologique est naturellement pondéré par divers paramètres climatiques et géographiques. Par exemple, la température est l'un des facteurs principaux du pouvoir évaporant de l'atmosphère, le relief conditionne les précipitations des masses nuageuses, et la nature de la couverture végétale influe sur les phénomènes d'interception et de transpiration.

---

Les durées de séjour de l'eau dans les différents compartiments du cycle sont très variables.

## **I. CARACTERISTIQUE PHYSIQUE DU BASSIN VERSANT**

### **1. Caractéristique Géométrique**

#### **a. Limite du bassin versant**

On appelle bassin versant d'une rivière considérée en un point donné de son cours, l'aire limitée par le contour à l'intérieur duquel l'eau précipitée se dirige vers ce point de la rivière.

L'exutoire d'un bassin est le point le plus en aval du réseau hydrographique par lequel passent toutes les eaux de ruissellement drainées par le bassin. La ligne de crête d'un bassin versant est la ligne de partage des eaux. La ligne ainsi définie, limite les bassins versants topographiques adjacents.

Cependant, le cours d'eau d'un bassin versant donné peut-être alimenté par les eaux précipitées sur un bassin topographiquement adjacent. C'est le cas provoqué par la présence d'un horizon imperméable ou d'écoulements souterrains complexes comme dans les terrains karstiques.

Le tracé de la ligne de crête est une opération délicate qui se fait sur la carte topographique de la région concernée. Généralement, on utilise une carte à l'échelle 1/200 000. S'il s'agit d'un petit bassin versant, de l'ordre de quelques Km<sup>2</sup>, on préférera des cartes topographiques au 1/50000, voire au 1/25000, et, si ces documents existent, la couverture de photos aériennes, qui en vision stéréoscopique, restitue et permet un tracé beaucoup plus précis. Une *vérité terrain* est toujours indispensable.

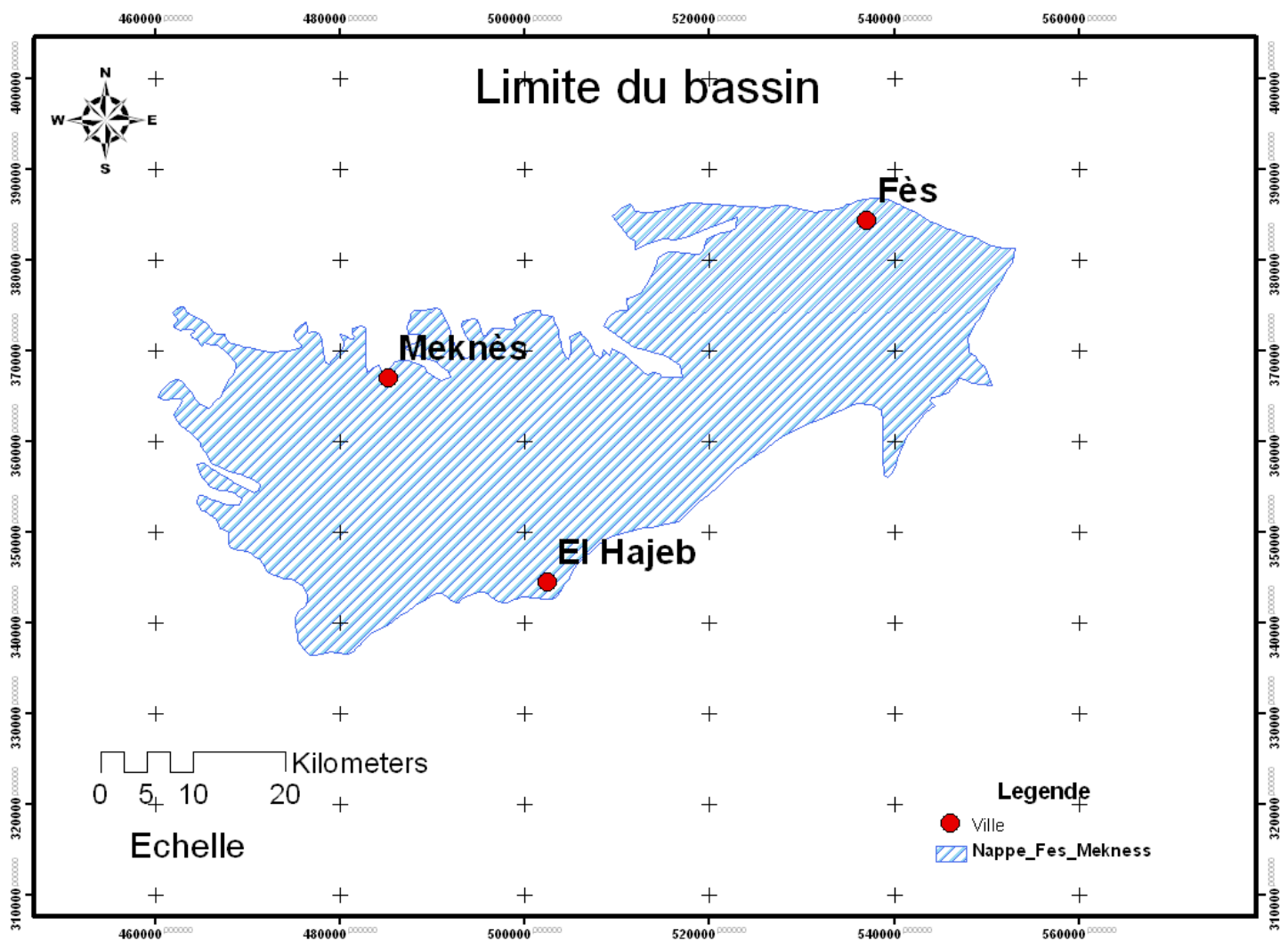


Figure 12 : Carte de la limite du bassin Versant

Le bassin Fès-Meknès a une superficie de 2261 Km<sup>2</sup>. Les trois principales villes de ce bassin sont Fès, Meknès et El Hajeb. Il possède un périmètre de 415km.

#### b. Indice de compacité

L'indice admis par les hydrologues pour caractériser la forme d'un bassin versant est l'indice de compacité de GRAVELIUS qui est le rapport du périmètre du bassin à celui d'un cercle de même surface.

Si  $A$  est la surface du bassin en Km<sup>2</sup> et  $P$  son périmètre en km, le coefficient  $K_c$  est égal à:

$$K_c = 1,39$$

L'indice de compacité est de 1,39

Il est proche de 1 pour un bassin versant de forme quasiment circulaire et supérieur à 1 lorsque le bassin est de forme allongée

## 2. CARACTERISTIQUE TOPOGRAPHIQUE

### a. MNT du bassin

Un modèle numérique de terrain (MNT) est une représentation de la topographie (altimétrie et/ou bathymétrie) d'une zone terrestre sous une forme adaptée à son utilisation par un ordinateur numérique (ordinateur). Très utilisés en CAO et en synthèse d'image, ils apportent également beaucoup de possibilités pour la réalisation d'analyses paysagères, ou la compréhension de certains risques naturels.

Intégrée dans un système d'information géographique, cette information joue alors un rôle important, à l'instar des courbes de niveau et estompages (ombrages) dans une carte traditionnelle, avec cependant des possibilités d'exploitation bien supérieures, notamment en terme d'analyse spatiale.

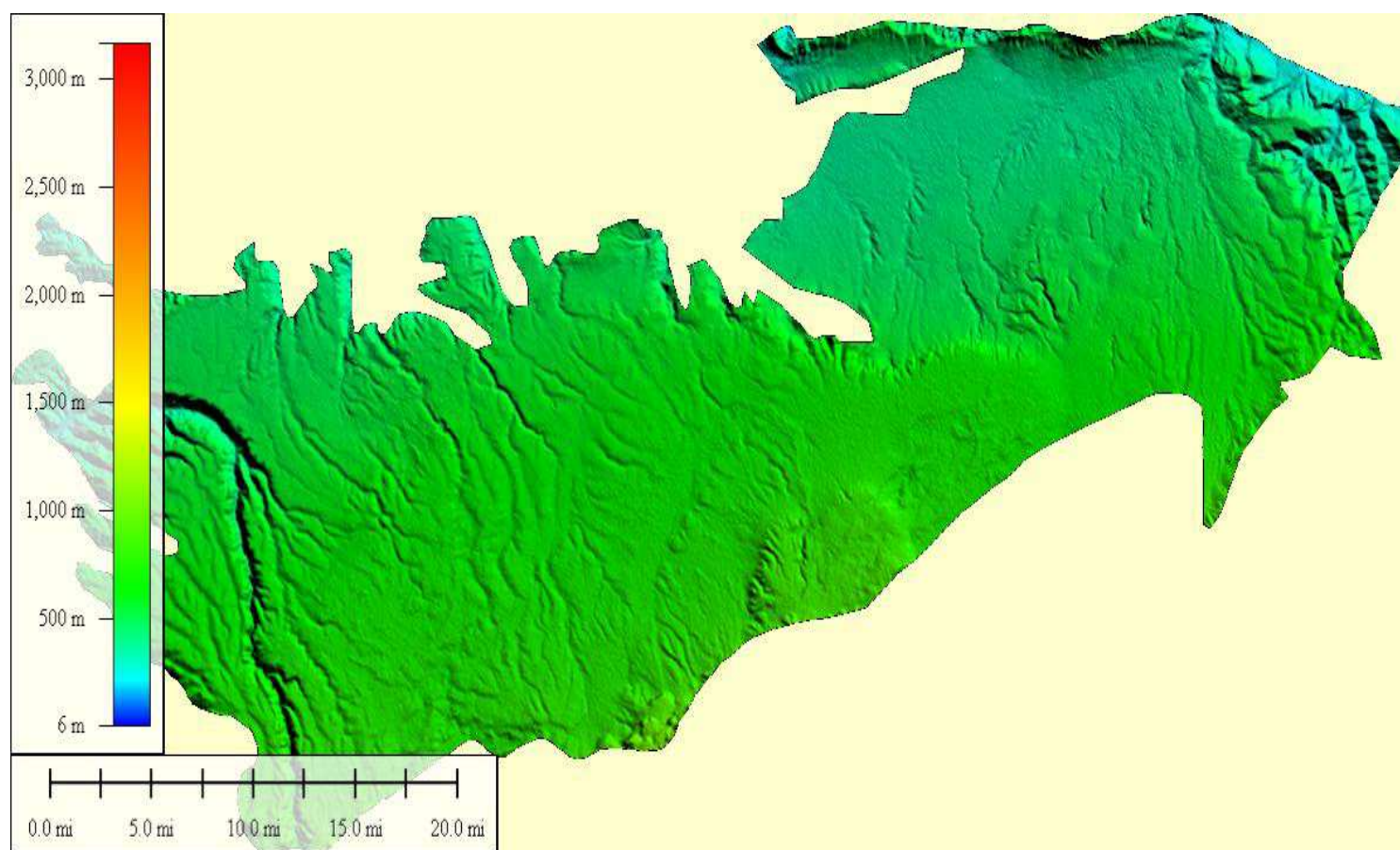


Figure 13 : Carte des MNT du bassin Fès-Meknès

La carte MNT du bassin a un pas de 90m. Elle nous montre que les altitudes du bassin sont comprises entre un peu plus de 200m à 1050m de hauteur. Les altitudes les plus basses se trouvent au nord du bassin et les plus élevées au Sud. On peut dire que les écoulements des eaux de surfaces se font du Sud vers le Nord. Afin de déterminer les sens d'écoulements exacts dans chaque région du bassin nous allons créer une carte des écoulements des eaux de surfaces. Pour cela nous serons amenés à générer un ensemble de cartes à savoir.

## b. Courbes de niveaux

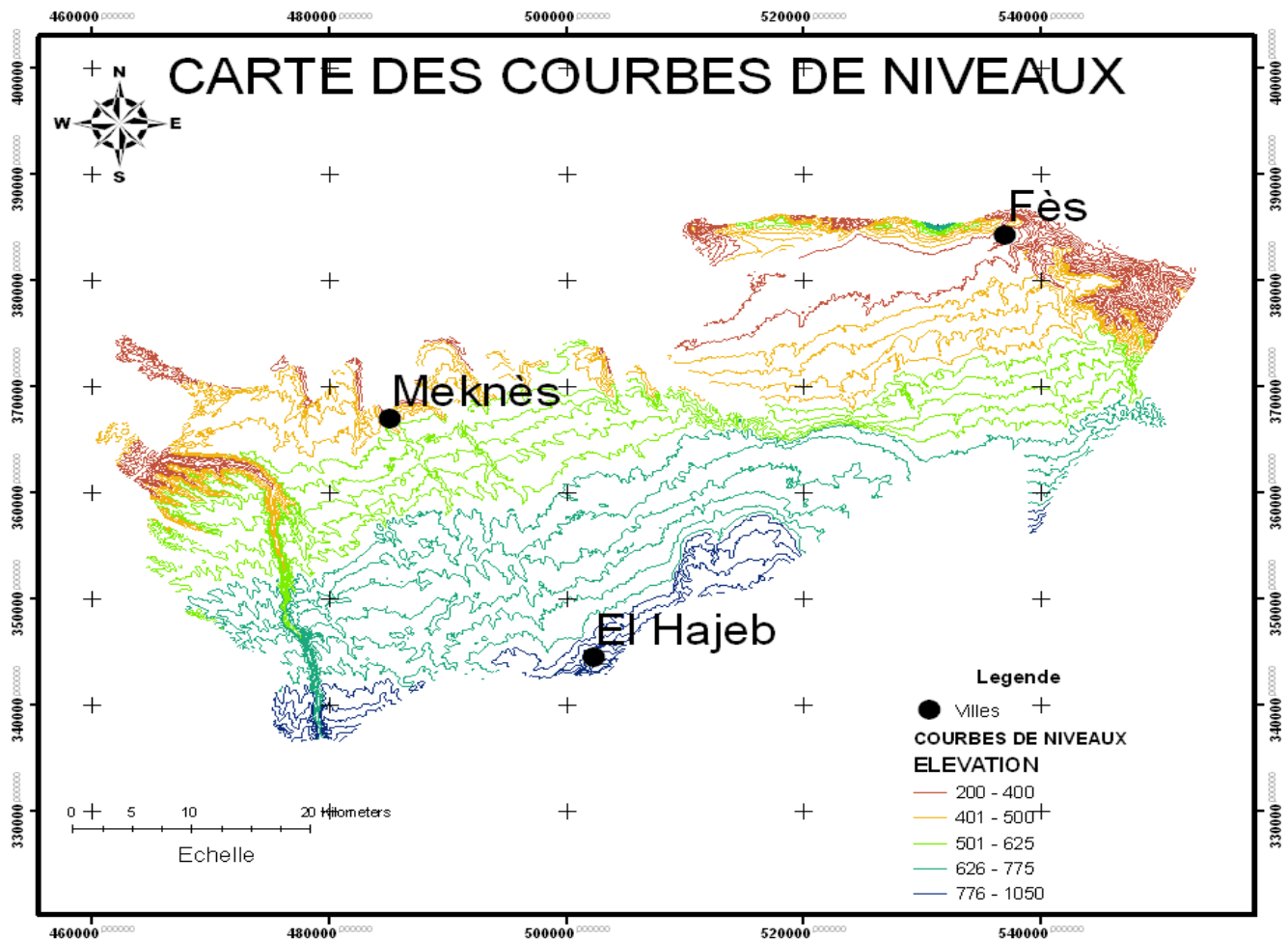


Figure 14 : Cartes des courbes de niveaux du bassin Fès-Meknès

Une courbe de niveau sur une carte est une ligne imaginaire qui indique les points à la même altitude. Elle permet de mieux appréhender le relief sur une carte en 2 dimensions. La différence d'altitude entre deux courbes (dénivelé) est nommée l'équidistance. L'équidistance de cette carte générée à partir des MNT est de 25m. Elle nous permettra de créer une carte Tin.

## c. Création d'un Tin

TIN est un acronyme pour Triangulated Irregular Network (littéralement Réseau de Triangles Irréguliers). Il s'agit d'un modèle de représentation principalement utilisé pour les surfaces continues. Il s'agit d'un modèle de représentation principalement utilisé pour les

---

surfaces continues. Le TIN nous permet ensuite de générer ensuite la carte des pentes et la carte des écoulements des eaux.

Pour une triangulation faite à partir de courbes de niveau numérisées, on utilise des algorithmes différents, afin d'éviter la construction de triangles s'appuyant sur trois points d'une même courbe de niveau.

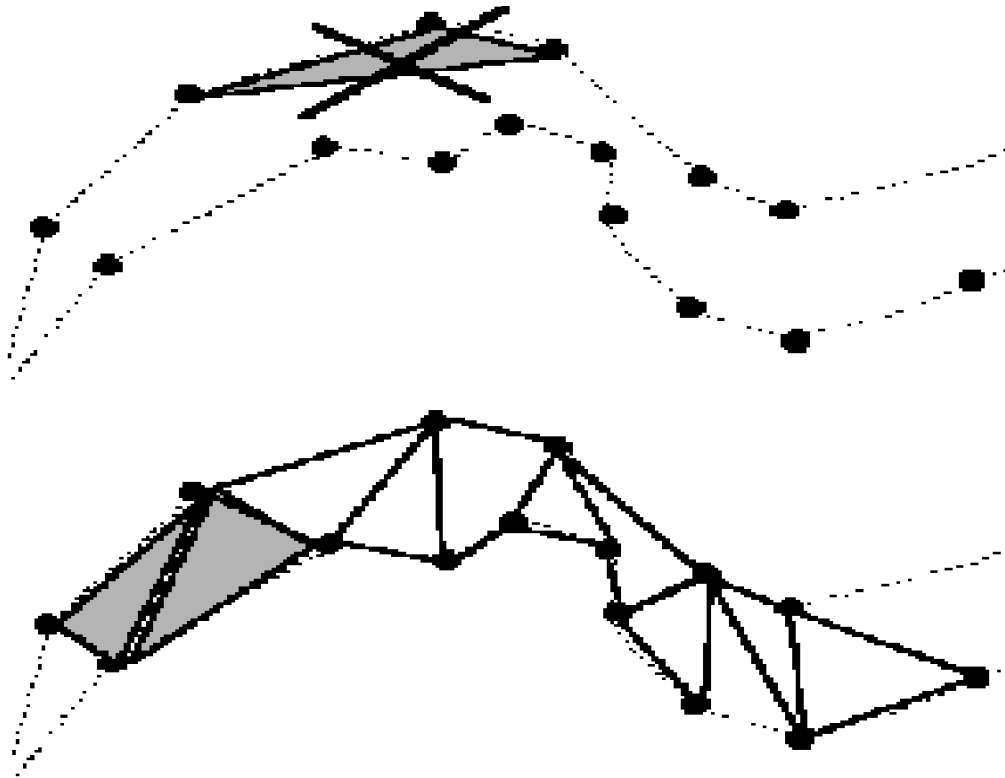
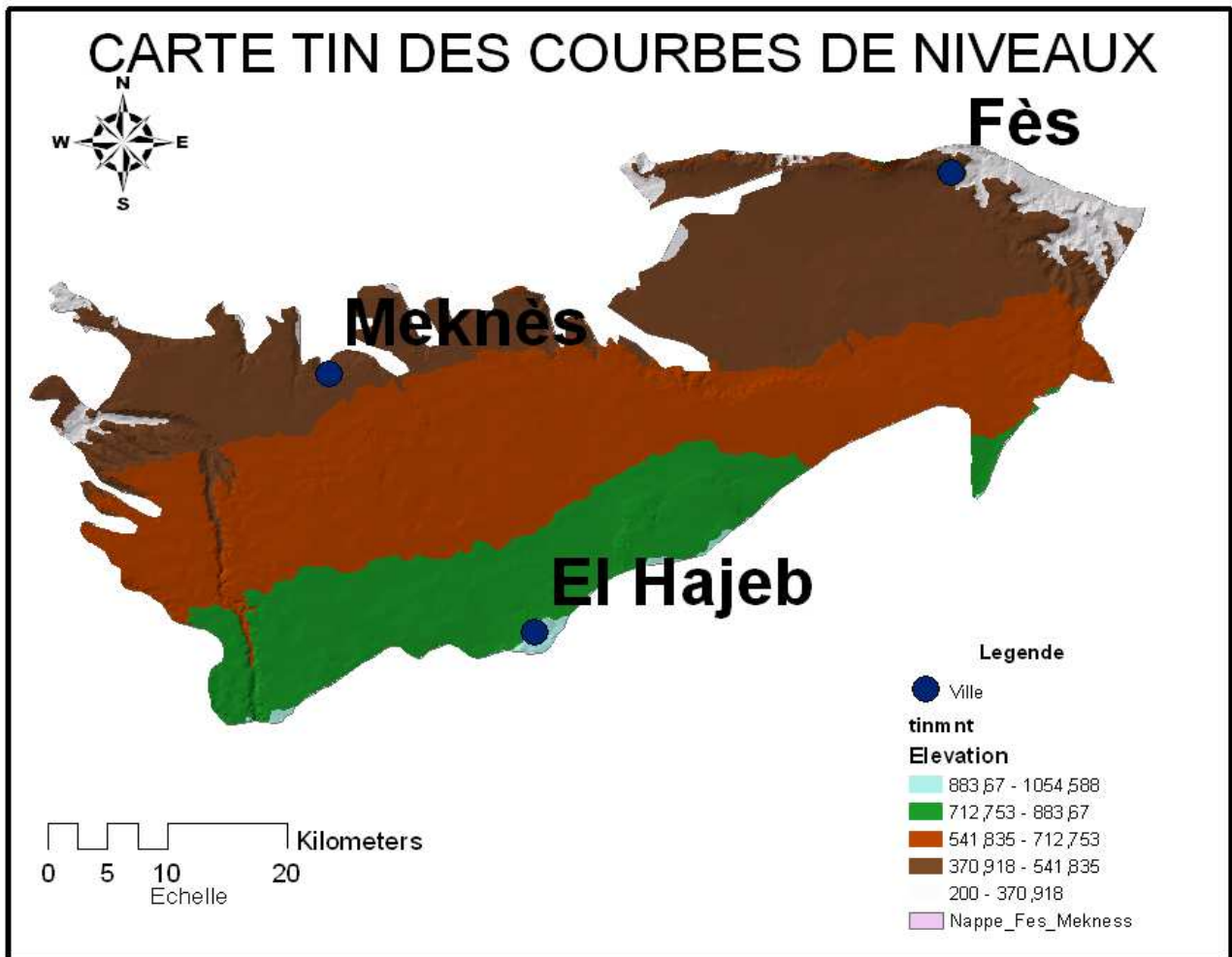


Figure 15 : Production d'un TIN à partir de courbe de niveau

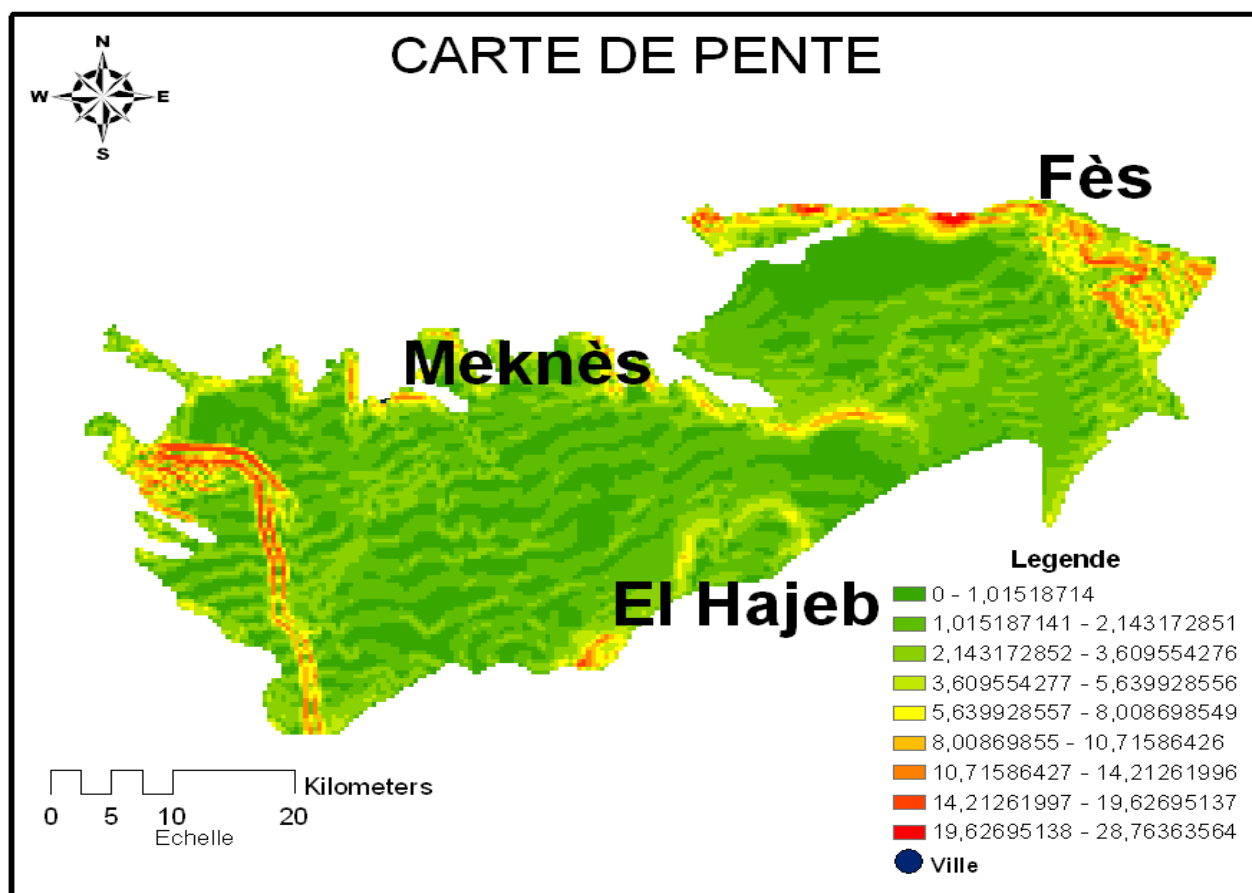
Les courbes de niveau générées à partir des MNT de la zone d'étude nous permettent ainsi de créer la carte TIN du bassin versant.



**Figure 16 : Carte TIN des altitudes du bassin**

La carte TIN nous montre que les altitudes du bassin sont comprises entre 200 et 1054m de hauteur. Les altitudes les plus importantes se situent au Sud-ouest du bassin et les plus basses à 200m de hauteurs Nord-Ouest du bassin versant. La carte TIN nous permettra donc de générer la carte des pentes, des écoulements mais également la carte du réseau hydrographique du bassin versant Fès-Meknès.

#### **d. Calcul de Pente**



**Figure 17 : Carte des pentes du bassin**

La pente moyenne du cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin donc le temps de concentration. Cette variable influence donc le débit maximal observé. Une pente abrupte favorise et accélère l'écoulement superficiel, tandis qu'une pente douce ou nulle donne à l'eau le temps de s'infiltrer, entièrement ou en partie, dans le sol.

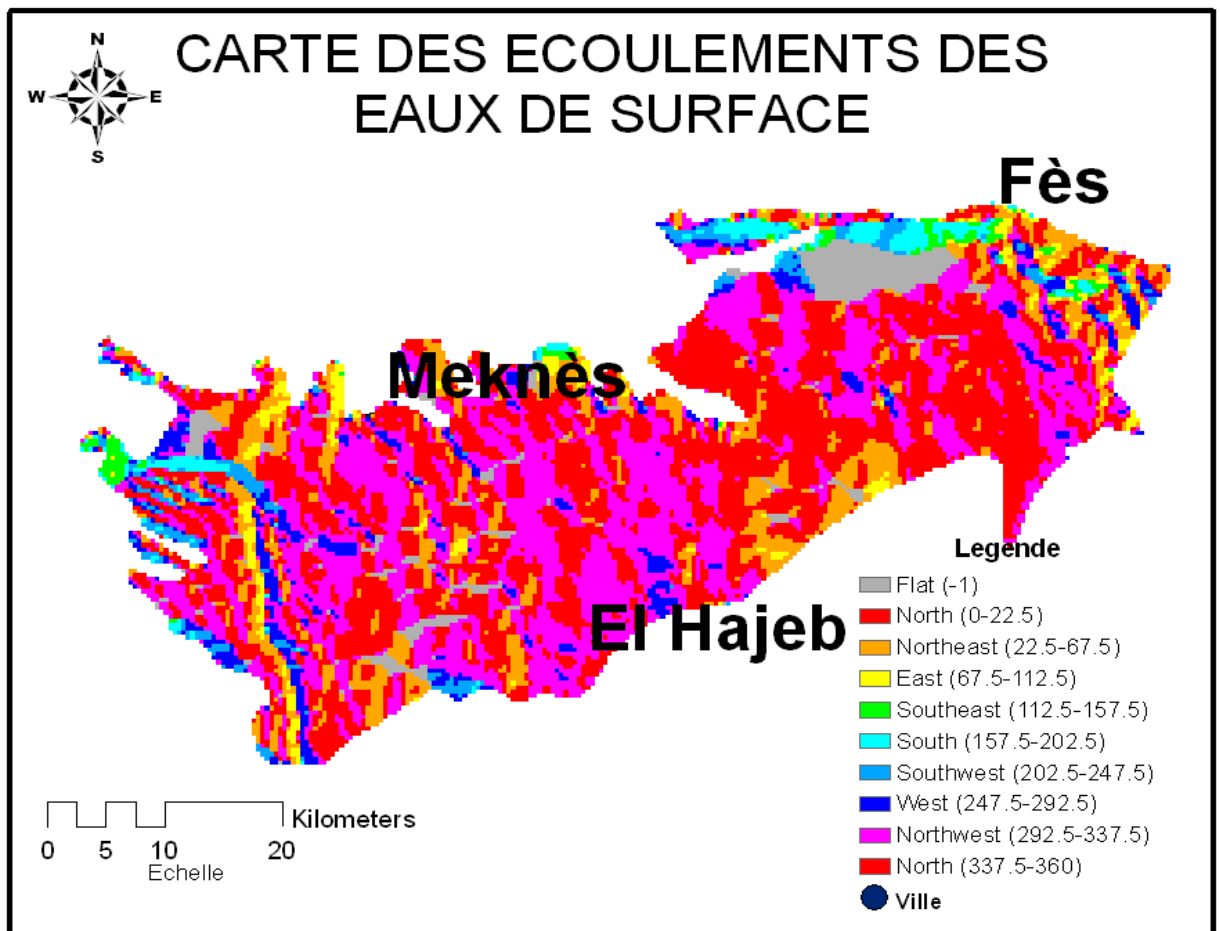
La carte des pentes montre que les pentes les plus importantes se situent entre 1 et 2%. Toutefois, il existe des pentes dépassant les 6% voire 28%. Il s'agit des pentes des cours d'eau. La pente moyenne du bassin versant est de 2,5%.

La détermination de la pente est assez importante dans le calcul hydrologique car elle donne une idée sur le volume de ruissellement des eaux de surfaces mais aussi sur le coefficient d'infiltration. Elle détermine si le ruissellement est plus important que l'infiltration et donc permet de connaître l'érosion hydrique.

### **3. Ecoulements des eaux et Réseau hydrographique théorique.**

#### **a. Détermination des directions d'écoulement.**





**Figure 18 : Carte des écoulements des eaux de surfaces du bassin**

La carte des écoulements des eaux des surfaces du bassin sont en majorité au Nord. On remarque que les écoulements Nord-Ouest sont assez importants aussi. La plaine de Fès n'a pas un écoulement particulier.

### **b. Accumulation des écoulements**

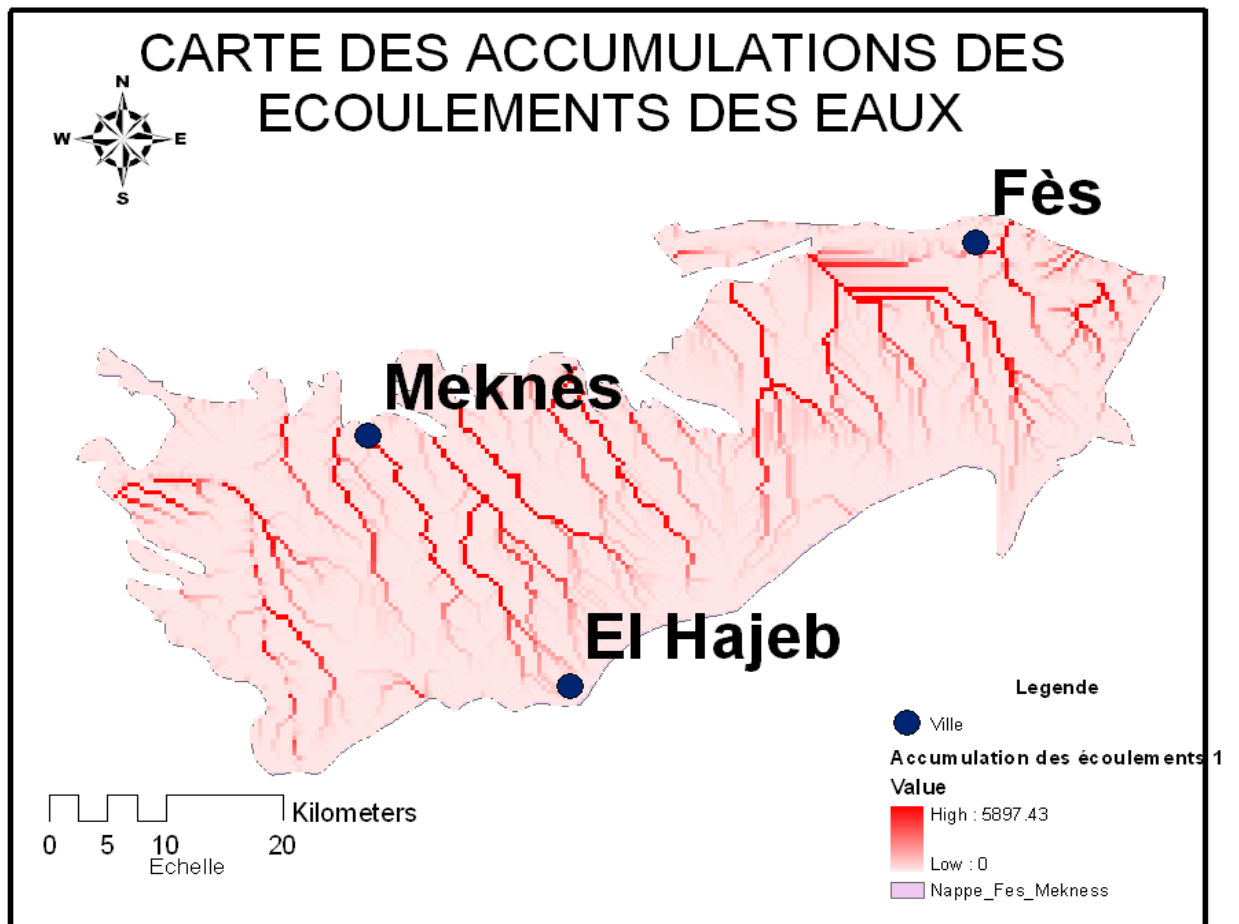
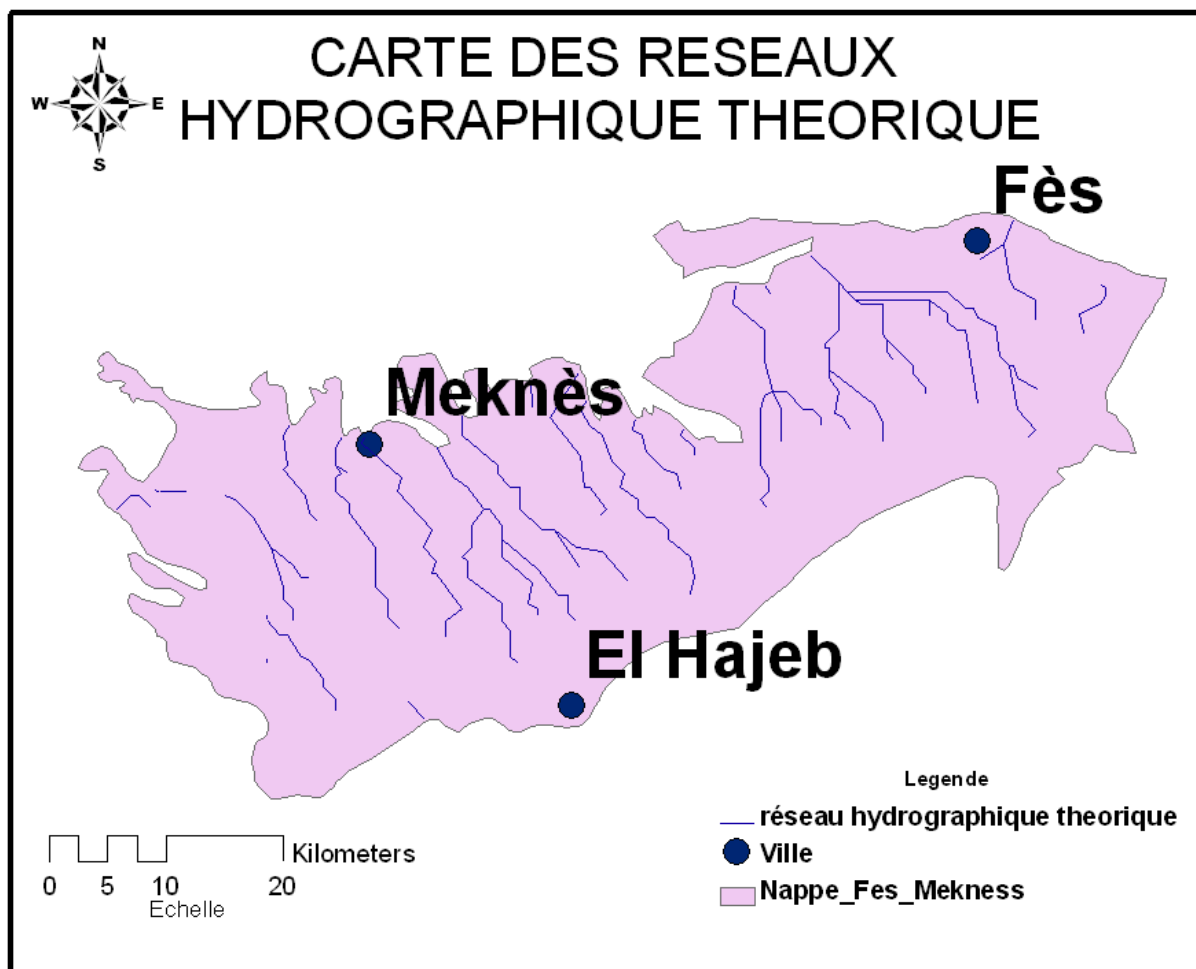


Figure 19 : Carte des accumulations des écoulements des eaux de surface.

ArcGis est un outil de SIG assez puissant et nous permet de créer une grille d'accumulation des écoulements.

A partir de cette grille nous avons pu déterminer le réseau hydrographique théorique.

### c. Calcul du Réseau Hydrographique Théorique



**Figure 20 : Carte des réseaux hydrographique théorique du bassin**

Nous avons pu générer la carte des réseaux hydrographique théorique du bassin Fès-Meknès. La longueur du réseau théorique est de **348994,32794 m soit environ 349 km.**  
**Le résultat obtenu est assez proche de celui réel mesuré sur le terrain.**

## **II. PLUVIOMETRIE DU BASSIN EN GENERAL**

<b>NOM</b>	<b>M</b>	<b>X_</b>	<b>M</b>	<b>Y_</b>	<b>MOY</b> <b>ENNE</b> <b>annuelle</b>
<b>Agou ray</b>		<b>481</b> <b>500</b>		<b>338</b> <b>500</b>	<b>630</b>
<b>AIN TAOUJDA</b>		<b>518</b> <b>000</b>		<b>371</b> <b>500</b>	<b>482</b>
<b>Ait naama</b>		<b>505</b> <b>000</b>		<b>346</b> <b>000</b>	<b>643</b>
<b>Ait yazem</b>		<b>483</b> <b>000</b>		<b>346</b> <b>000</b>	<b>602</b>
<b>Allal Al Fa</b>		<b>556</b> <b>650</b>		<b>370</b> <b>540</b>	<b>337</b>
<b>El Gaida</b>		<b>534</b> <b>500</b>		<b>353</b> <b>000</b>	<b>503</b>
<b>Oulje t solt</b>		<b>454</b> <b>900</b>		<b>340</b> <b>000</b>	<b>406</b>
<b>El kansera</b>		<b>452</b> <b>100</b>		<b>382</b> <b>620</b>	<b>398</b>
<b>Mek nès aero</b>		<b>487</b> <b>500</b>		<b>365</b> <b>000</b>	<b>616</b>
<b>Oued beht</b>		<b>450</b> <b>000</b>		<b>365</b> <b>000</b>	<b>417</b>
<b>Oued Mikkes</b>		<b>508</b> <b>860</b>		<b>382</b> <b>760</b>	<b>363</b>
<b>Ras Ma</b>		<b>528</b> <b>000</b>		<b>375</b> <b>600</b>	<b>519</b>
<b>Ras tabouda</b>		<b>564</b> <b>000</b>		<b>379</b> <b>000</b>	<b>631</b>
<b>Sefro u</b>		<b>552</b> <b>000</b>		<b>359</b> <b>000</b>	<b>531</b>

<b>FES</b>	<b>536</b>	<b>381</b>	<b>541</b>
<b>DOUYET</b>	<b>460</b>	<b>970</b>	
<b>FES</b>	<b>535</b>	<b>384</b>	<b>487</b>
<b>MEDINA</b>	<b>400</b>	<b>800</b>	
<b>MAL</b>	<b>519</b>	<b>371</b>	<b>448</b>
<b>LAL</b>	<b>150</b>	<b>500</b>	

Tableau 5 : des stations pluviométrique

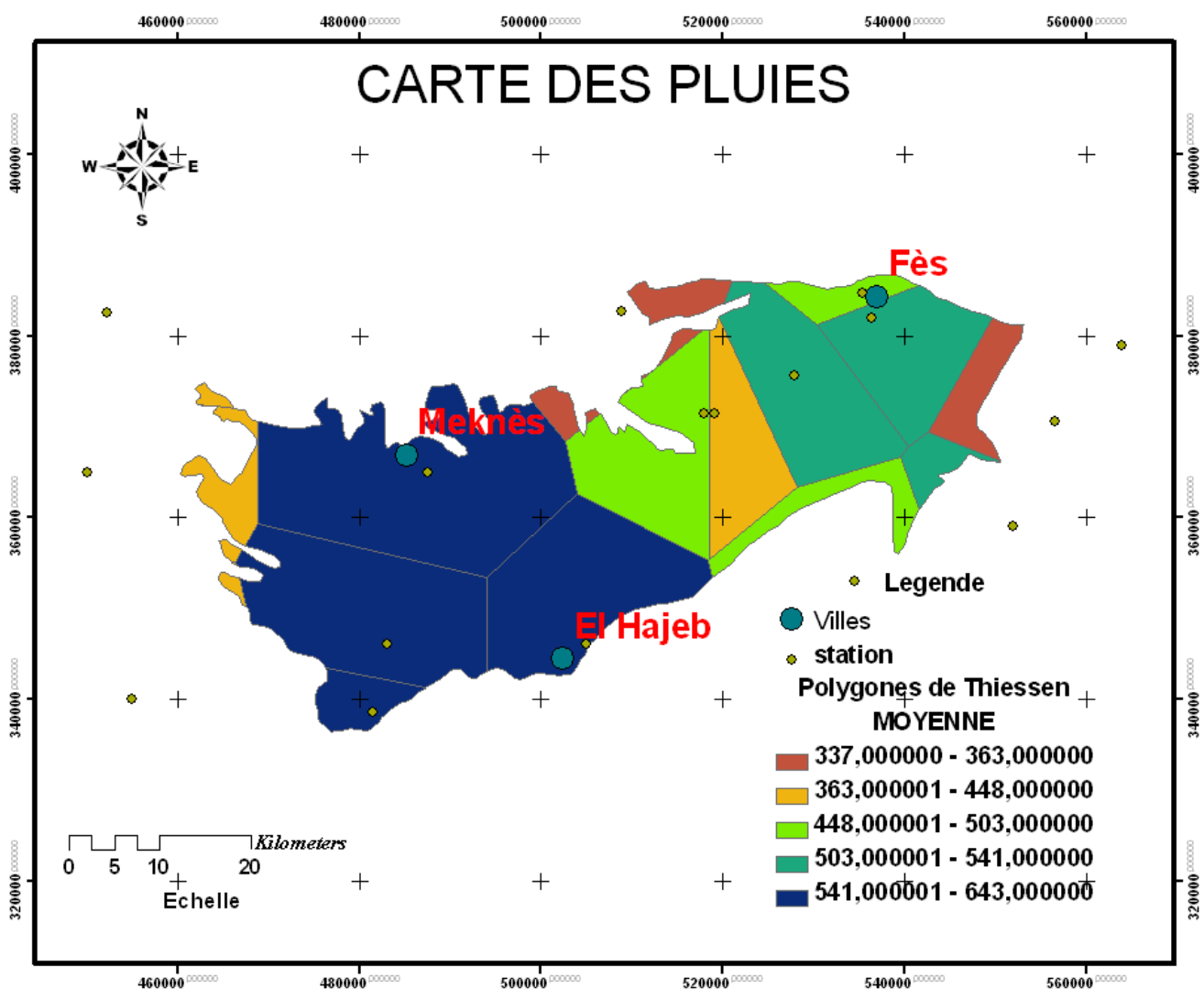


Figure 21 : Carte de la pluviométrie moyenne du bassin

La pluviométrie est plus importante à l'Ouest et au Sud. A l'aide des stations nous avons pu créer les polygones de Thiessen. La méthode du polygone de Thiessen est la plus couramment utilisée, parce que son application est aisée et qu'elle donne en général de bons

---

résultats. Elle convient notamment quand le réseau pluviométrique n'est pas homogène spatialement (pluviomètres distribués irrégulièrement).

La lame d'eau de précipitation dans le bassin est de **1247049267,88024m<sup>3</sup>/an** environ **1,247 milliards de m<sup>3</sup> par an**.

### III. RESEAU HYDROGRAPHIQUE

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement. Le réseau hydrographique est sans doute une des caractéristiques les plus importantes du bassin. Le réseau hydrographique peut prendre une multitude de formes. La différenciation du réseau hydrographique d'un bassin est due à quatre facteurs principaux.

- **La géologie** : par sa plus ou moins grande sensibilité à l'érosion, la nature du substratum influence la forme du réseau hydrographique. Le réseau de drainage n'est habituellement pas le même dans une région où prédominent les roches sédimentaires, par comparaison à des roches ignées (i.e. des "roches de feu" dénommées ainsi car ces roches proviennent du refroidissement du magma). La structure de la roche, sa forme, les failles, les plissements, forcent le courant à changer de direction.
- **Le climat** : le réseau hydrographique est dense dans les régions montagneuses très humides et tend à disparaître dans les régions désertiques.
- **La pente du terrain**, détermine si les cours d'eau sont en phase érosive ou sédimentaire. Dans les zones plus élevées, les cours d'eau participent souvent à l'érosion de la roche sur laquelle ils s'écoulent. Au contraire, en plaine, les cours d'eau s'écoulent sur un lit où la sédimentation prédomine.
- **La présence humaine** : le drainage des terres agricoles, la construction de barrages, l'endiguement, la protection des berges et la correction des cours d'eau modifient continuellement le tracé originel du réseau hydrographique.

## 1. Les oueds

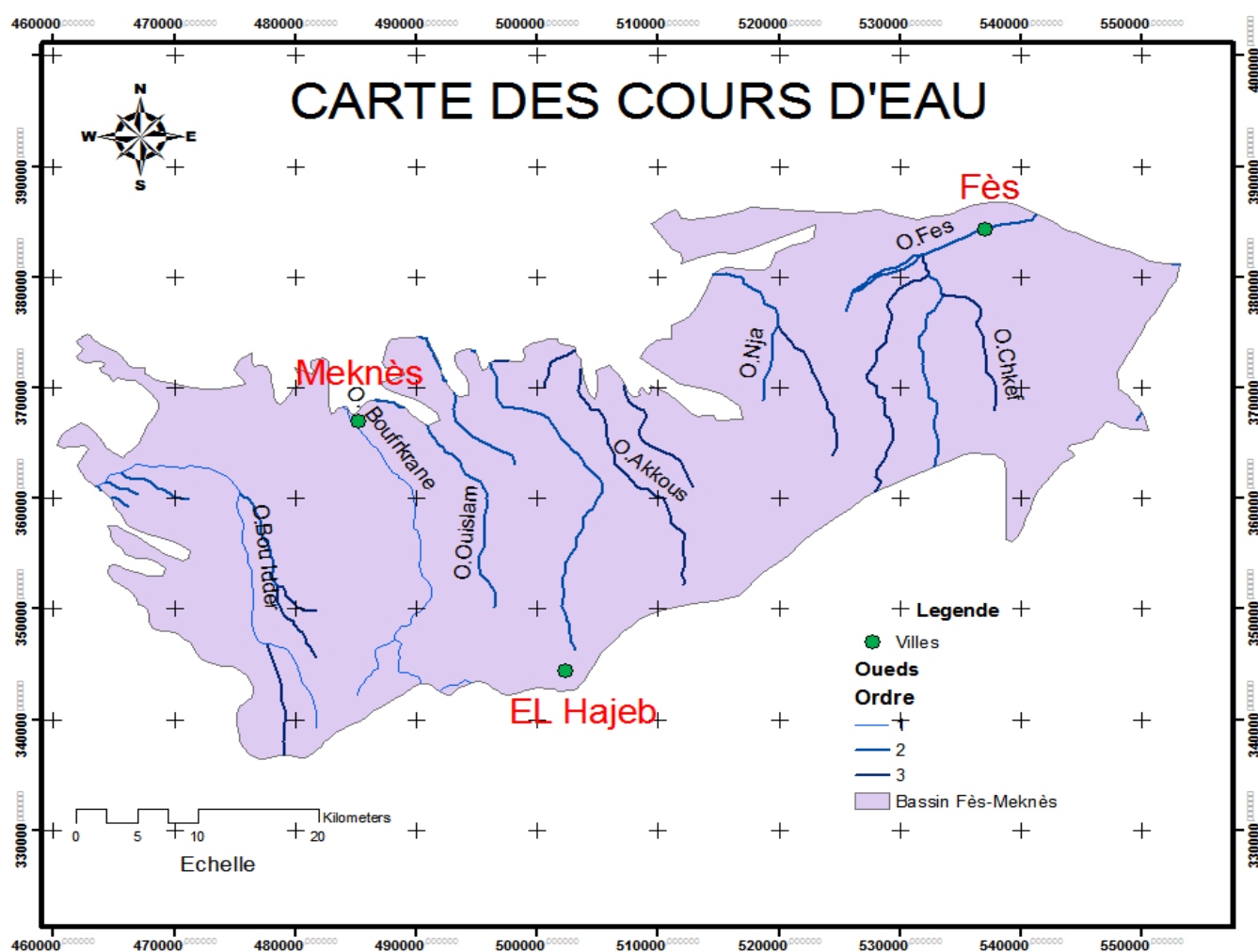


Figure 22 : Carte des oueds drainant le bassin

### a. Densité de drainage

La densité de drainage, introduite par Horton, est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant :

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A}$$

La longueur totale du réseau hydrographique est de 346 km.

La surface du bassin est de 2261 Km<sup>2</sup>.

La densité de drainage

Dd = 0,16

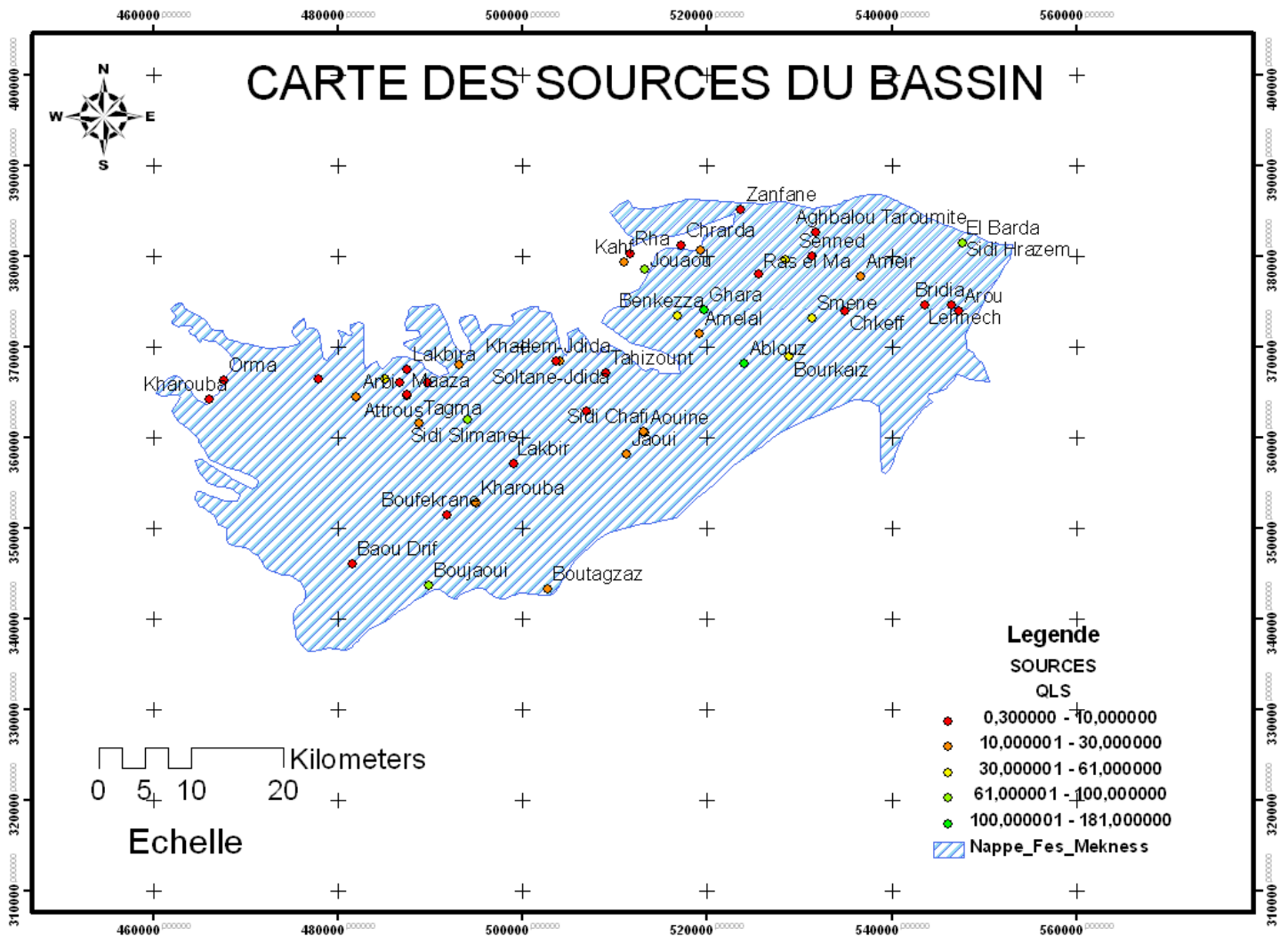
L'ABHS a mené une campagne de jaugeage en février 2005 et a concerné 5 oueds (tab. 3), leur débit total s'élève à 793 l/s (environ 25 Mm<sup>3</sup>/an).

Oued	Station	X	Y	Z	Q (l/s)	
<b>Nja</b>	Pont Rp1	0	519,5	0	378,7	<b>187</b>
<b>Boufekrane</b>	Mejjat	5	488,6	0	361,0	<b>236</b>
<b>Mikkes</b>	Machra balaraj	5	509,7	0	380,5	<b>139</b>
<b>Ouislane</b>	Pont ONCF	5	490,7	5	366,6	<b>131</b>
<b>Chkef</b>	Pont	0	535,0	0	375,7	<b>100</b>
						<b>TT : 793 l/s</b>

Tableau 6 : Débits des oueds drainant les nappes du bassin de Fès-Meknès (Etat de Février 2005)



## 2. Les sources



**Figure 23 : Carte des sources du bassin**

Le bassin de Fès - Meknès est drainé par une multitude de sources (Fig. 22), caractérisées par :

- ▲ la variabilité de leurs débits (quelques l/s à plus d'un m<sup>3</sup>/s);
- ▲ leur origine qui peut être la nappe phréatique, profonde ou mixte ;
- ▲ leur température (sources thermales de Sidi Harazem ; 30 à 33°C, Moulay Yaâcoub ; 54 °C et Askhounat ; 38 °C).

On distingue plusieurs types de sources (Essahlaoui, 2000) :

- ▲ les sources issues essentiellement des calcaires liasiques : A. Chkeff, A. Bourkaiz, les sources thermo-minérales : A. Skhounate (38 °C), A. Sidi Harazem (30 à 33 °C) et A. Moulay Yacoub (54 °C) ;
- ▲ les sources d'origine mixte (Lias et Plio-Quaternaire) : A. Ben Kazza, Amellal, Ghara, Smène, Ras El Ma, etc. ;
- ▲ les sources d'émergence de la nappe phréatique, situées généralement en bordure des oueds peu encaissés (oued Ouislan, Jdidah et Madhouma, EL Kell, N'ja, etc.) ;

---

Les campagnes de Février-Mars et de septembre 1984 ont concerné 60 sources, groupes de sources et oueds. Le total des débits mesurés variait respectivement entre environ 10.2 et 11 m<sup>3</sup>/s.

L'ABH Sebou a mené une campagne de jaugeage en Mars-Avril 2005 qui a concerné **49 sources, totalisant un débit d'environ 1491,6 l/s (environ 47 millions de m<sup>3</sup>/an)**.

Le débit total du drainage naturel des aquifères (oueds et sources) du bassin s'élève à environ **2.3 m<sup>3</sup>/s (environ 72 Mm<sup>3</sup>/an)**, ce qui représente une baisse **d'environ 80 % par rapport à la situation de 1984**. Cette baisse est la conséquence directe des déficits pluviométriques accumulés dans le bassin (notamment depuis le début 1980, Fig. 2 et 3) et de l'augmentation des prélèvements (agricoles et d'AEP) dans les nappes constituant le bassin de

Fès-Meknès

#### IV. INFILTRATION

L'évaluation de l'infiltration efficace a été effectuée à partir du bilan de Thornthwaite, basé sur des données climatiques des stations de Fès et de Meknès (avec un pas de temps mensuel) de la période comprise entre 1973 et 2003.

L'évapotranspiration réelle dépend des valeurs des précipitations, de l'évapotranspiration potentielle (calculée avec la formule de Penman) et des réserves en eau du sol. Faute de mesures, la valeur de la RFU (Réserves Facilement Utilisables) a été considérée égale à 60 mm.

Les tableaux de l'annexe 1 synthétisent les résultats du bilan de Thornthwaite et montrent que le coefficient d'infiltration (CI) des précipitations varie généralement entre 0 % et plus de 28.7 % (année 1990-1991) au niveau de la station de Fès et entre 0 % et 51 % (année 2000 – 2001) pour la station de Meknès. Les valeurs moyennes du CI varient entre 9.3 % pour la plaine de Fès et d'environ 12 % pour le plateau de Meknès.

L'étude effectuée par le BET AQUASOFT (2004) a permis d'évaluer l'infiltration des eaux de pluie entre 5 et 9 %, respectivement dans la plaine de Sais et le plateau Meknès. Cette différence peut être expliquée par les précipitations plus faibles considérées par cette étude, qui sont respectivement de 407.2 (au lieu de 455 mm) et de 529 mm/an (au lieu de 550 mm/an).

Le coefficient d'infiltration moyen des précipitations a été évalué (à partir du bilan global des nappes du bassin de Fès-Meknès) à environ 10 %, soit un volume moyen de la recharge de la nappe phréatique par la pluie d'environ 104 Mm<sup>3</sup>/an.

Les figures 15 et 16 montrent l'historique des précipitations et des lames d'eau infiltrées au niveau des stations de Fès et de Meknès. Les figures 17 et 18 montrent les écarts à la moyenne de l'infiltration efficace des précipitations calculés au niveau des stations de Fès et de Meknès.

Ces résultats montrent que la région traverse une importante période de sécheresse depuis le début des années 80. Les années excédentaires sont en effet devenues exceptionnelles depuis 1980.

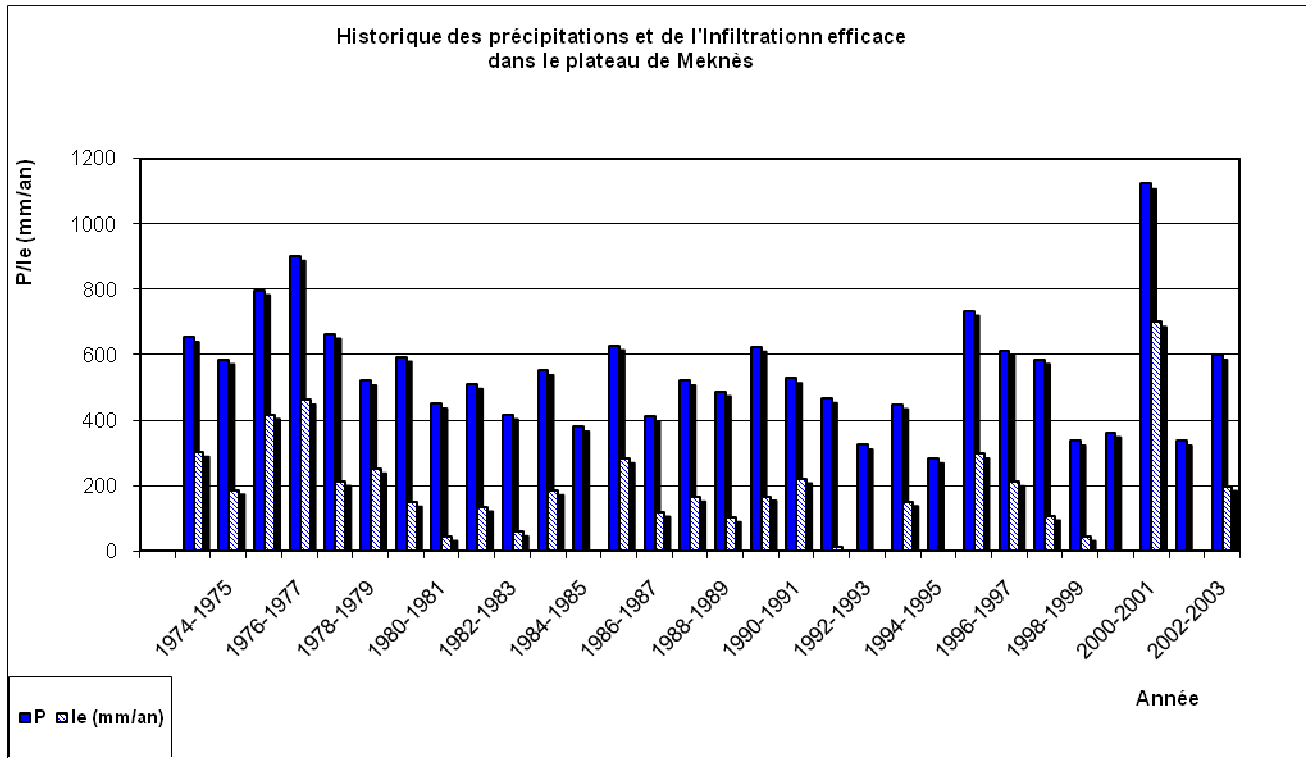


Figure 24 : Historique des précipitations et de l'infiltration efficace dans le plateau de Meknès.

### 1. Historique des écarts à la moyenne des infiltrations

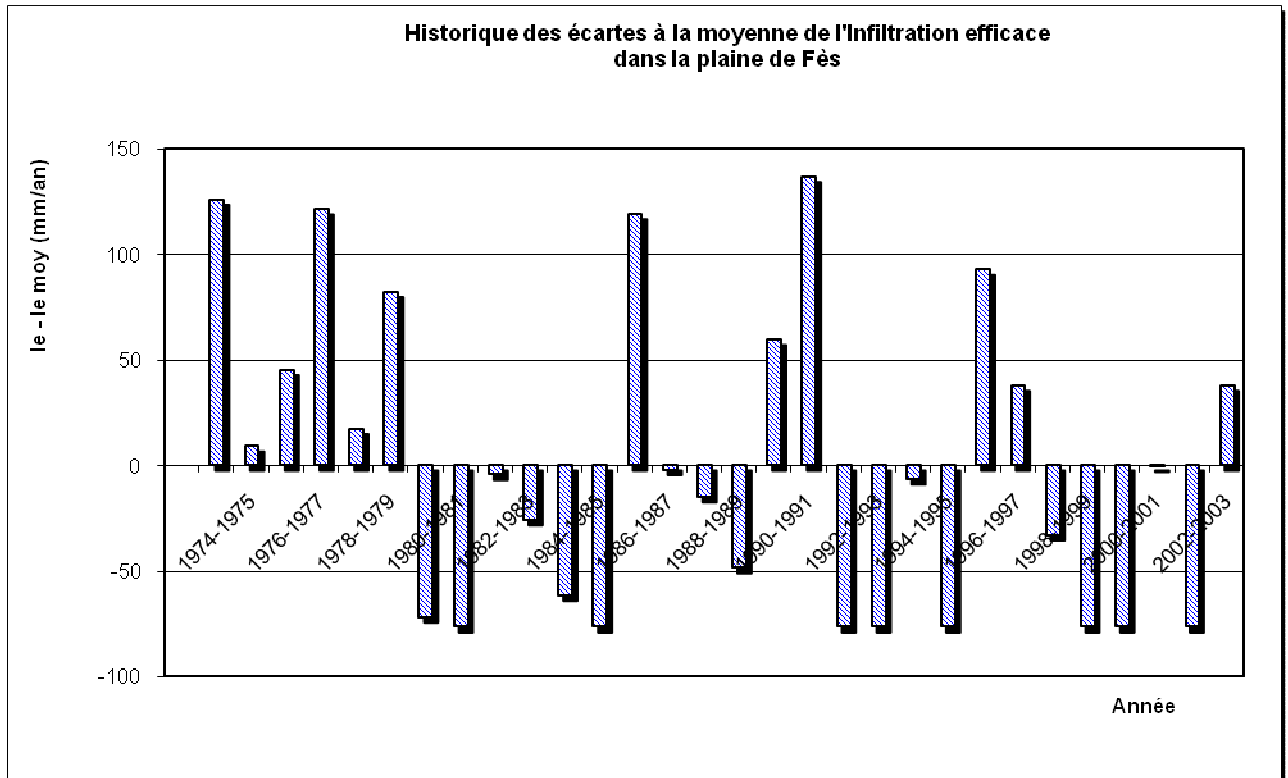


Figure 25 : Historique des écarts à la moyenne de l'Infiltration efficace dans la plaine de Fès

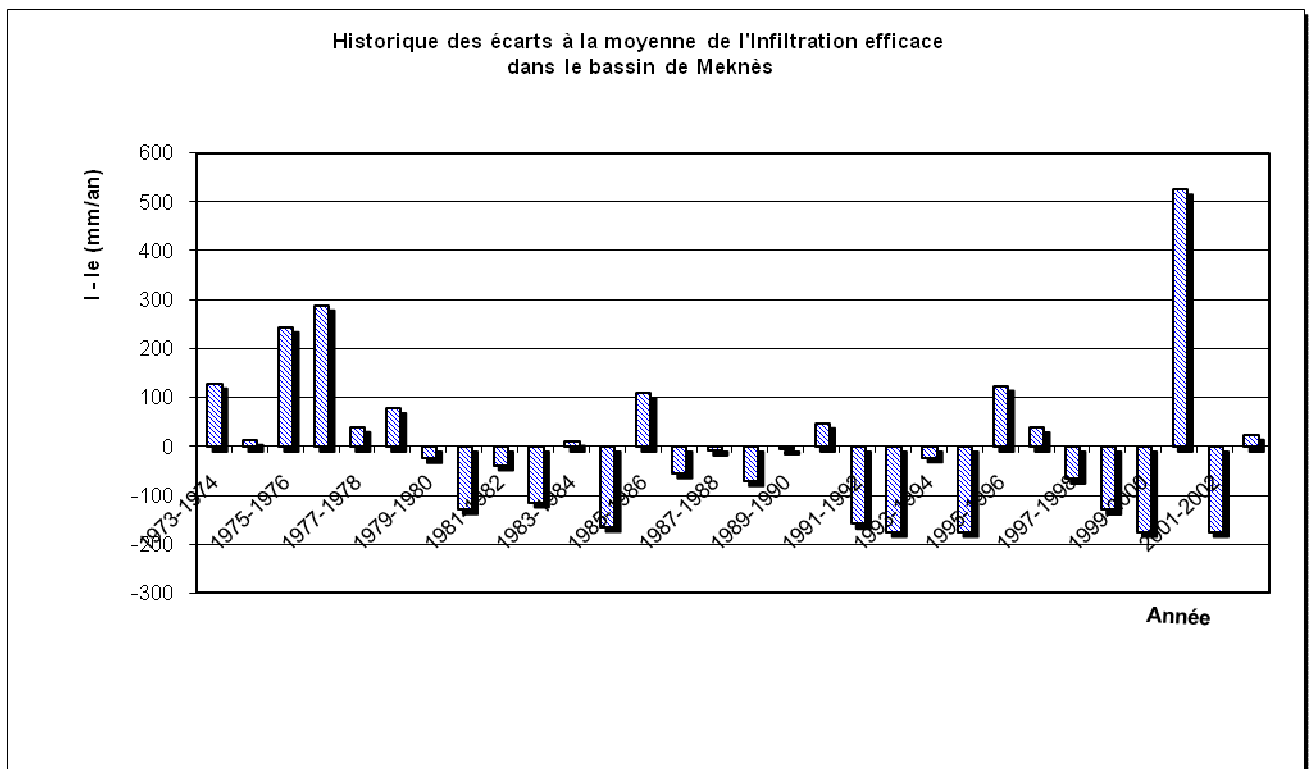


Figure 26 : Historique des écarts à la moyenne de l'Infiltration efficace dans le plateau de Meknès

---

## V. EVAPOTRANSPIRATION

L'évapotranspiration potentielle moyenne (calculée avec la méthode mensuelle de Penman) est assez élevée, variant entre 37 mm au mois de décembre et environ 200 mm au mois de juillet. L'ETP moyenne annuelle dans le bassin varie entre 1270 mm à Meknès et 1343 mm à Fès, soit environ 2.3 à 2.9 fois la hauteur moyenne annuelle des précipitations du bassin ;

L'évapotranspiration réelle moyenne (bilan de Thornthwaite, avec un pas de temps mensuel) varie entre 402 mm/an à Fès et 459. mm/an à Meknès, constituant environ 83.5 % (à Meknès) et 88.4 % (à Fès) des précipitations moyennes annuelles du bassin ;

L'évapotranspiration moyenne est donc de 85,9%

Le volume d'eau qui s'évapore est donc de **1,1 milliard de m<sup>3</sup> par an.**

Si on calcul par la méthode de bilan des eaux on obtient

$$ETP = P - (I + Q)$$

Soient  $ETP = 1247 - (127,4 + 72) = 1050$  millions de m<sup>3</sup>/an soit **1,050 milliard de m<sup>3</sup>/an.**

Les deux estimations sont donc assez proches.

## VI. CALCUL DU BILAN

Les précipitations annuelles sont estimées à **1,247 milliards de m<sup>3</sup> par an.**

Le volume d'écoulement des eaux de surface est de **72 millions de m<sup>3</sup> par an.**

L'infiltration est de **124,7 millions de m<sup>3</sup> par an.**

Et l'évapotranspiration à **1,05 milliards de m<sup>3</sup> par an.**

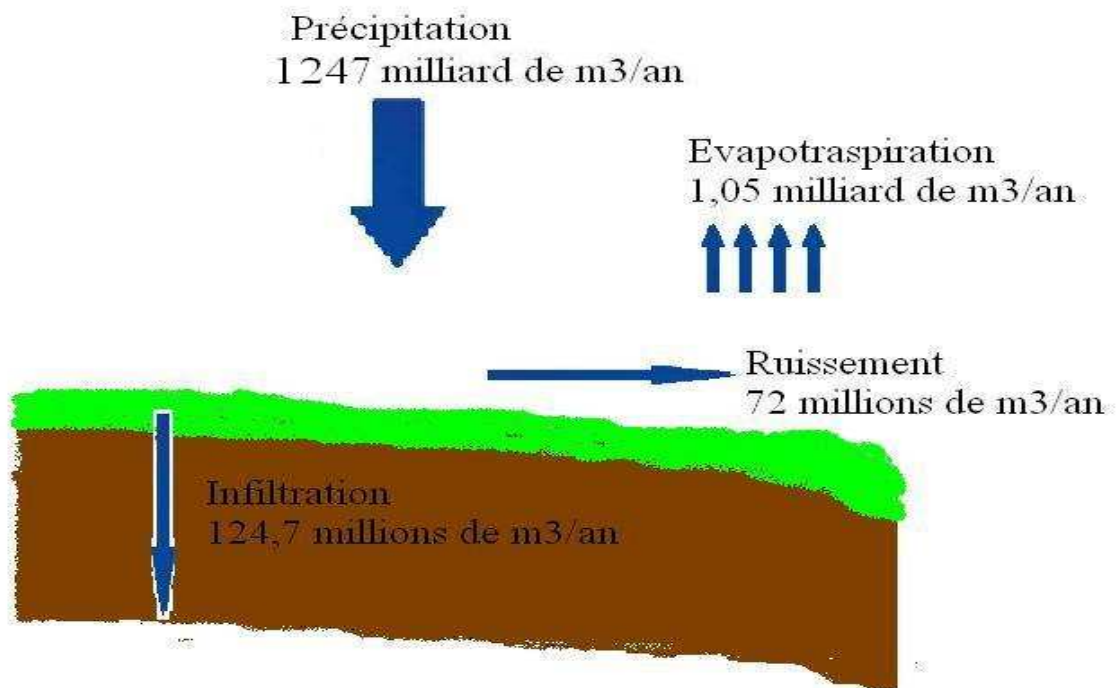


Figure 27 : Schéma récapitulatif du bilan des eaux de surfaces