

# HANNON

REVUE LIBANAISE DE GÉOGRAPHIE

RECUEIL DES TRAVAUX DU DÉPARTEMENT DE GÉOGRAPHIE

VOLUME XXVIII, 2015-2016



UNIVERSITÉ LIBANAISE  
FACULTÉ DES LETTRES ET SCIENCES HUMAINES

# **HANNON**

## **REVUE LIBANAISE DE GÉOGRAPHIE**

RECUEIL DES TRAVAUX DU DÉPARTEMENT DE GÉOGRAPHIE

VOLUME XXVIII, 2015-2016

UNIVERSITÉ LIBANAISE  
FACULTÉ DES LETTRES ET SCIENCES HUMAINES

CE RECUEIL PÉRIODIQUE EST DESTINÉ A LA DIFFUSION DES RECHERCHES GÉOGRAPHIQUES CONCERNANT LE LIBAN ET, PLUS GÉNÉRALEMENT, LE PROCHE ET MOYEN-ORIENT. LES INSTITUTS ET ORGANISMES INTÉRESSÉS POURRONT LE RECEVOIR PAR ÉCHANGE DE PUBLICATIONS

---

*Comité de rédaction :*

Docteur Adnan Alsayed Hussein	Recteur de l'Université Libanaise
Docteur Mouhamad Toufic Abou Ali	Doyen de la Faculté des lettres
Docteur Ali Faour	Professeur à l'Université Libanaise
Docteur Bahzzad Hakim	Professeur à l'Université Libanaise
Docteur Georges Najjar	Professeur à l'Université Louis pasteur, Strasbourg, France
Docteur Abdelamir Dakroub	Professeur à l'Université Libanaise
Docteur Toni Saba Ghossain	Professeur à l'Université Libanaise
Docteur Tony Sassine	Professeur à l'Université Libanaise
Docteur Elham Makké	Professeur à l'Université Libanaise
Docteur Amal Khoury	Professeur à l'Université Libanaise
Docteur Abdelrahim Ibrahim	Professeur à l'Université Libanaise

---

*Comité de rédaction :*

Messieurs	Docteur salim Dib	Docteur Mehzen Alamine
	Docteur Naji Abdallah	Docteur Miverva Tannoury
	Docteur Dib Aljazzar	Docteur Oussama Chamseddin

Dessin de la couverture: Mme Thérèse Ghaleb-Charaf

© TOUS DROITS RÉSERVÉS À LA REVUE HANNON 2015-2016

Les articles publiés dans la Revue HANNON expriment les opinions de leurs auteurs.  
Ces opinions ne sont pas nécessairement celles de la Revue,  
qui se dégage de toute responsabilité

Views expressed in matter printed in HANNON are not necessarily those of  
the editorial staff, who declines all responsibilities.



## Sommaire

---

<i>Ali T Haidar</i>	<i>Entropy Estimate Of Superpositional Stratigraphic Time For Shuffled Sediment</i>	7
<i>Dr. Haddad Elie Dr. Kayal Youssef</i>	<i>Activité Économique Et Chômage Dans Le Milieu Rural De La Béqaa</i>	35
<i>Dr. Naji Joseph Kehdy</i>	<i>La gestion intégrée quantitative de la ressource en eau d'irrigation - Cas de Caza de Zahlé -</i>	61
<i>Ahmad El-Hajj Michel Bakalowicz Edouard Pesquet-Ardisson Fatima Diab</i>	<i>Approche géologique de l'aquifère karstique Hadath- Hazmiyé (Beyrouth, Liban) en vue de limiter l'intrusion saline par une recharge artificielle</i>	81
<i>Hussein El Hage Hassan, Ahmad El-Hajj, Jamil Tfaili, Abed El Rahim Ibrahim</i>	<i>Rôle d'un SIG et la réflexion géographique dans le suivi des mutations de l'occupation du sol dans la Beqaa</i>	103



# **Entropy Estimate of Superpositional Stratigraphic Time for Shuffled Sediment**

*Ali T. Haidar*

## **Titre**

Estimation de l'Entropie du Temps Stratigraphique Superpositionnel pour Sédiment Mélangé Verticalement par Lamines Entières d'une Façon Discrète.

## **Résumé**

La modélisation de la redistribution verticale du sédiment a une influence majeure sur une multitude de disciplines, y compris la stratigraphie et la paléocéanographie. La régression de la loi puissance est fréquemment utilisée pour décrire la relation entre le coefficient de mélange du sédiment obtenu et les vitesses d'enfouissement. La bioturbation est le mouvement des particules sédimentaires obtenu grâce à l'activité des animaux qui vivent au fond du bassin. Les modèles disponibles indiquent qu'en ajoutant l'effet de la bioturbation à celui de l'accumulation du dépôt, la zone de la concentration maximale d'un marqueur se déplace vers le bas, entraînant plus ou moins un niveau mélangé (mixed layer) homogène. Pourtant, il y a un «divorce» entre l'intensité du mélange et la profondeur à laquelle le mélange se produit.

On introduit ici les aspects géologiques de la redistribution verticale par bioturbation du sédiment en utilisant un modèle de remaniement

---

E-mail address: altalhdr@gmail.com



similaire à celui de cartes à jouer lorsqu'on les bat, et on montre comment ceci s'applique au dépôt où se trouvent des types spécifiques d'ichnofaciès. Par conséquence, on ouvre la voie à l'application mathématique du modèle Gilbert-Shannon-Reeds, originellement conçu pour le mélange à l'américaine d'un jeu de cartes (mélange à la queue d'aronde ou mélange à mitraille), à la redistribution verticale du sédiment conservant une structure laminaire. On essaie de déterminer m le nombre de fois un dépôt doit être mélangé d'une façon similaire à celle d'un mélange à l'américaine d'un jeu de cartes avant qu'on puisse le considérer comme étant proche d'avoir un ordre aléatoire. La comparaison de l'ordre vertical original des lamines sédimentaires avec celui des lamines après bioturbation montre qu'un mélange d'une façon mathématiquement discrète de  $(3/2) \log_2 n + c$  (où  $c$  est une constante réelle) fois produit une petite distance de variation totale (ordre presque aléatoire). On considère aussi la détection de l'ordre des lamines sédimentaires où un changement d'ordre est entièrement situé dans un intervalle stratigraphique à l'intérieur d'une biozone singulière, tout en utilisant l'analogie avec la théorie mathématique relative au mélange à l'américaine d'un jeu de cartes répétées. On discute la possibilité réelle que le processus de remaniement du dépôt puisse se produire suivant le modèle du mélange à l'américaine d'un jeu de cartes. On suggère l'utilisation de la limite entre le Yin et le Yang dans la forme fractale des diagrammes Taiji comme une représentation graphique de la transition d'un modèle similaire à celui du mélange à l'américaine d'un jeu de cartes dans le sédiment à celui d'une diffusion tourbillonnaire entre lamines sédimentaires affectées à travers le temps par des bioturbations multiples. Plus le dépôt est bioturbé à cause d'une action située à des niveaux différents de profondeur dans le sédiment, plus la forme de la limite entre les couches ou les lamines sédimentaires sera analogue à celle donnée par un modèle de diffusion tourbillonnaire. Le comportement asymptotique de l'entropie relative (jusqu'à la stationnarité) pour mélanger  $n$  lamines sédimentaires d'une façon similaire à celle d'un mélange à l'américaine d'un jeu de cartes  $m$  fois est telle, que l'entropie relative décroît approximativement d'une façon linéaire (en  $m$ ) pour  $m < \log_2 n$ , et approximativement d'une façon exponentielle pour  $m > \log_2 n$ .

Finalement, on fait une évaluation de la perte d'information en stratigraphie relative à des cas plus valables de bioturbation du dépôt en utilisant l'analogie avec le modèle (correspondant de plus à la réalité) du mélange à partir de la carte du haut de la pile insérée dans une position choisie par hasard dans le reste du jeu de cartes. L'entropie décroît au début d'une façon linéaire, et après d'une façon géométrique quand  $m$  aura des valeurs encore plus élevées, suivant un taux qui change soudainement pour  $m = n \log n$ . En utilisant encore le modèle le plus général du mélange à partir de la carte du haut de la pile insérée au hasard dans une position  $k$  profonde dans le reste du jeu de cartes,  $n$  lamines sont remaniées suivant une répétition du mouvement de la lamine présente sur la superficie du sédiment vers une des  $k_n$  positions profondes; ces positions ayant une distribution aléatoire uniforme. Ceci permettrait d'appliquer des limites supérieures et inférieures sur la variation totale du temps de mélange, pour ce type de mélange, d'une façon discrète en changeant la valeur de  $k_n$  entre une constante et  $n$ .

Le calcul de l'entropie, même quand aucun événement d'érosion majeure ne s'est produit, a permis de déterminer le degré de fiabilité de l'information stratigraphique, spécialement en cas d'études de stratigraphie à haute résolution. Les vraies valeurs de l'entropie du temps stratigraphique pourraient être supérieures à celles données dans cette étude si d'autres facteurs géologiques, entrant en action, influencent l'ordre de superposition des lamines sédimentaires. Cette étude constitue un point de départ pour le calcul de l'entropie stratigraphique pour les cas où des processus de diagenèse relatifs à un transport non-local affectant une profondeur variable dans le sédiment se produisent.

Ces modèles d'entropie vont clarifier les vraies relations relatives à l'ordre temporel obtenu en utilisant le principe stratigraphique de superposition, et la détermination de la valeur numérique de l'entropie stratigraphique faite dans cette étude aura une influence majeure sur l'étalonnage de détail des reconstructions paléocéanographiques. Ceci ajoutera une valeur de point de vue de la théorie de l'information appliquée à la théorie permutationnelle de corrélation stratigraphique.

## Abstract

Modeling the vertical redistribution of sediment is of fundamental importance to a wide variety of disciplines, including stratigraphy and paleoceanography. Power law regression is commonly used to describe the relationship between sediment mixing coefficient and burial velocities. Bioturbation is the sediment particle translocation driven by the activity of bottom-living animals. Available models indicate that bioturbation plus sediment accumulation move the concentration maximum of a tracer downward, leading to a more or less homogenized mixed layer. However, there is a divorce between mixing intensity and mixed depth.

This paper introduces the geologic background for the vertical redistribution of sediment using shuffle by bioturbation, and shows how this applies to sediment where specific types of ichnofacies are observed. Consequently, it paves the way for the mathematical application to sediment keeping a layered structure of the Gilbert-Shannon-Reeds model, originally conceived for the riffle shuffle of a deck of cards. It attempts to determine  $m$  the number of times sediment must be riffle shuffled before it can be in close to random order. The comparison of the original vertical order of thin layers (or pelagic laminae) with that after bioturbation shows that  $(3/2) \log_2 n + c$  (where  $c$  is a real constant) sediment shuffles produce small total variation distance - or nearly random. It also considers cases of order detection where the order of laminae is changed within stratigraphic intervals covered by single biozones, using the analogy with riffle shuffle of repeated cards. A discussion of the likelihood of occurrence of sediment riffle shuffle process is presented. A visual representation of the transition from sediment riffle shuffle model to that of eddy diffusion applied to the boundaries between different laminae that are subject to multiple bioturbations through time is suggested using the analogy with flattened Yin Yang boundary in the fractal design of the Taiji diagrams. The more bioturbation occurs, following different types of ichnofacies, acting at different depth intervals, the more the transition between the different laminae will follow the model of eddy diffusion. The asymptotic

behavior of the relative entropy (to stationarity) for riffle shuffling  $n$  sedimentary laminae  $m$  times is such that the relative entropy decays approximately linearly (in  $m$ ) for  $m < \log_2 n$ , and approximately exponentially for  $m > \log_2 n$ .

Finally, an estimate of information loss in stratigraphy in more realistic cases of bioturbated sediment is provided using the analogy with the model of top to random shuffling. Entropy decays initially linearly, and for larger  $m$  it decays geometrically at a rate that alters abruptly at  $m = n \log n$ . In the even more generalized model of top to bottom- $k$  shuffles,  $n$  laminae are shuffled by repeatedly moving the top lamina to one of the bottom  $k_n$  positions uniformly at random, with the consequent possibility of applying upper and lower bounds on the total variation mixing time for this shuffle as  $k_n$  ranges from a constant to  $n$ .

Entropy computation, even when no major erosional events have occurred, allows for the determination of a degree of reliability of stratigraphic information, especially when using high resolution stratigraphy. The real entropy estimates of stratigraphic time might be higher than those given in this paper if other geological factors affect the original superpositional order of the laminae. This study is a starting point for stratigraphic entropy computation where nonlocal transport diagenetic processes of variable sediment depth are present. These entropy models will clarify the true time order relationships when using the stratigraphic principle of superposition, and the present determination of the entropy numerical values will have a major influence on the fine-tuning of paleoceanographic reconstructions. This will add an information theoretic value to the permutational theory of stratigraphic correlation.

## Keywords

$\alpha$ -shuffle, Biodiffusion Coefficient, Biological Advection, Bioturbation, Biozone, Burial Velocity, Conveyor-Belt Mixing, Correlation, Deck of Cards, Diagenesis, Dirac Delta Function, Eddy Diffusion, Entropy, Fractal Design, Geologic Time, Gilbert-Shannon-Reeds Model, Head-

Down Deposit-Feeding, Ichnofacies, Laminae, Mixed Layer, Nonlocal Transport Processes, Pelagic Sediment, Permutation, Power Law, Random Order, Principle of Superposition, Reworking Rate, Riffle Shuffle, Separation, Stratigraphy, Taiji Diagram, Top to Bottom-k Shuffles, Top to Random Shuffling, Total Variation Distance, Tracer, Vertical Mixing, Yin-Yang.

## **Vertical Redistribution of Sediment**

### **Overview**

Different factors affect the vertical redistribution of sediment on the sea floor. In addition to vertical mixing, these include deposition, decomposition, dissolution, and re-precipitation (Schink and Guinasso, 1977). Modeling the vertical mixing of sediment is of fundamental importance to a wide variety of disciplines, including stratigraphy, paleoceanography, etc. especially when using high resolution stratigraphy (see *e.g.* Sigman *et al.*, 2010). Vertical mixing of pelagic sediment was monitored in different ways including the redistribution of micro-tektites (see Glass, 1969). To evaluate sediment reworking rates in aquatic environments, radionuclide profiles in sediments were analyzed (Carroll and Lerche, 2003; DeMaster and Cochran, 1982; DeMaster *et al.*, 1985; Guinasso and Schink, 1975; Maire *et al.*, 2008 and references therein; Robbins, 1978). Mathematical models are used to compute sediment reworking coefficients. These models are fitted to the tracer vertical profiles (Berner, 1980; Boudreau, 1997).

Bioturbation was defined as the sediment particle translocation driven by the activity of bottom-living animals, through feeding, burrowing, locomotion and ventilation, benthic fauna modifies the physical, chemical and biological properties of sediments (Aller, 1982, 1994; François *et al.*, 2001; Lohrer *et al.*, 2004; Meysman *et al.*, 2006; Peng *et al.*, 1979; Rhoads, 1974; Wheatcroft *et al.*, 1990). The depth of the bioturbated layer (also called mixing depth or Surface Mixing Layer, SML) depends on the type of benthic population, and the variation of organic matter input (Mauviel and Sibuet, 1985).

The main processes affecting the vertical distribution of radionuclides in the seabed are eddy-diffusive mixing, sediment accumulation, and radioactive decay of excess activity (for a brief review, see Barsanti *et al.*, 2011). These processes are represented in a differential equation using: excess activity of a specific radiotracer, time, bioturbation or mixing coefficient, sediment depth, sediment accumulation rate and the decay constant of the specific radiotracer.

### **Implications for Stratigraphic Correlation**

When there is no sediment mixing model for a given stratigraphic succession related to each depth interval, the methods of stratigraphic correlation currently in use are applied regardless of the physical observations made on the degree of bioturbation the sediment was subject to. Indeed, the graphic correlation, the probabilistic stratigraphy (using RASC and CASC), and the constrained optimization (using CONOP 9) methods of stratigraphic correlation (for an overview, see Gradstein, 2012) do not include a procedure to differentiate between different segments of the stratigraphic depth based on the differential degree of bioturbation observed, but they may consider the position of some types of stratigraphic events to be more reliable than that given by other types (*e.g.* paleomagnetism *versus* biostratigraphy, see *e.g.*, Sadler, 2010).

Standard techniques of stratigraphic correlation neglect therefore, most of the time, the information obtained from the physical observation of the stratigraphic succession, thus assuming that the probability of vertical mixing of the sediment is the same over the whole depth interval of the stratigraphic succession. This could be due to the fact that some models available for the vertical re-distribution of the sediment (after deposition) are merely of diffusion (for a review, see Carroll, 2003) nature (for eddy diffusion, see Guinasso and Schink, 1975). In other words, these models are merely about vertical *mixing* of sediment, thus not allowing for an easy differentiation between the different stratigraphic intervals. Only when models of vertical redistribution of sediment would consider the differential redistribution by bioturbation

over the depth of the stratigraphic succession, may be also taking into account the different *types* of bioturbation present at different stratigraphic intervals, then these may represent a possible tool for the proper assessment of the parameters to be used for the calibration of the stratigraphic correlation methods related to each of these depth intervals. In other words, the methods of stratigraphic correlation could be corrected locally (over specific intervals of a stratigraphic succession) if the order reversals of laminae in the stratigraphic succession are modeled.

### **Available Models of Sediment Bioturbation**

Guinasso and Schink (1975) elaborated a model for bioturbation of a solid tracer that is introduced as a unit impulse into a sedimentary succession. They used three parameters in their model, namely the concentration of particles ( $\text{cm}^{-3}$ ), the sedimentation rate ( $\text{cm kyr}^{-1}$ ), and the biological mixing coefficient ( $\text{cm}^2 \text{kyr}^{-1}$ ). The authors treated the bioturbation process as equivalent to eddy diffusion in an upper mixed layer of sediments. The initial condition was a Delta function at the surface (see Boudreau, 1997 for a discussion of the initial condition). They obtained a time-dependent solution for the redistribution of a tracer pulse, and expressed the intensity of mixing with a dimensionless parameter  $G$ . For low values of  $G$  (*e.g.*  $G = 0.03$ ), bioturbation is relatively less intense and burial of the tracer pulse proceeds as the tracer spreads slightly into almost a Gaussian distribution. Concurrently, bioturbation plus sediment accumulation move the concentration maximum of the tracer downward only slightly faster than it would be moved by sediment accumulation acting alone. Where  $G$  is large (*e.g.*  $G = 3$ ), the relatively intense bioturbation homogenizes the mixed layer and the ultimate distribution of the tracer shows a saw-tooth character, with the concentration maximum displaced by one mixing length below the level that it would have where sediment accumulation is the only process operating. Guinasso and Schink (1975) used the Delta function, which is not a true function in the classical sense. It represents a concentration. At some single depth, an infinite concentration exists at time  $t = 0$ .

This function can be used to simulate the sudden introduction of material at depth, *e.g.* by dumping a very thin, but concentrated, layer of contaminant on the surface of sediment. While the delta function input of a contaminant may produce an infinite concentration, the total amount of mass contaminant in the input is finite (see a brief review of the Delta function in Boudreau, 1997). Bioturbation not resulting in complete homogenization, but which can still be treated as random mixing, is best described in terms of a biological mixing or “biodiffusion” coefficient (Bernier, 1980). Biodiffusion includes both particle and fluid bioturbation.  $D_B$  is the biodiffusion coefficient for solids in terms of area of total sediment squared per unit time. Bioturbation estimates range typically from  $10^{-2}$  to  $10^2 \text{cm}^2 \text{yr}^{-1}$  for fine-grained marine environments (Carroll and Lerche, 2003). There is a power law regression of  $D_B$  and the corresponding burial velocities (Boudreau, 1997). The main factors influencing sediment vertical distribution are resource (food) abundance, its reactivity, and the intensity of bioturbation (Boudreau, 1998). Boudreau (1997) generalized the problem of Guinasso and Schink (1975) from a Dirac Delta function to any initial distribution. The boundary conditions used in his model imply that there is no tracer loss from either the top or the base of the mixed zone by bioturbation. Since no advection was used, the model simply re-arranges the initial tracer distribution through time.

Several models describe the processes responsible for the vertical redistribution of sediment (for a review, see Boudreau, 1997). Biological solid advection is the result of what is commonly known as head-down deposit-feeders. Burrowing animals of a certain macro-fauna have their mouths at depth in the sediment. They ingest solid material in a feeding region around their mouths. The ingested sediment is then carried vertically through the animal’s gut, to a new level where this sediment is defecated or deposited. This conveyor-belt mixing model is a special case of the so-called nonlocal transport (see Aller, 1982; Rice, 1986). Nonlocal transport is the (vertical) material transfer between non-adjacent layers (see *e.g.* Boudreau, 1997).



## Limitations of Available Sediment Diffusion Models

There is a divorce between mixing intensity and mixed depth (see *e.g.* the discussion in Boudreau, 1998). A set of detailed observations of sedimentary successions in different oceanic areas indicate the need for alternative models of vertical sediment redistribution:

a) A poor power law regression of the mixing coefficient and the corresponding burial velocities occurs, even when only  $^{210}\text{Pb}$  analyses are used in curve fitting (Boudreau, 1997).

b) Barsanti *et al.* (2011) shows plots comparing corrected depth (correction for sediment compaction effects) of marine sedimentary cores collected in Western and Eastern Mediterranean basins with the radioactive decay of excess  $^{210}\text{Pb}$  ( $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ ) activity profiles. Even though some slightly irregular trends do occur, with clear breaks consistently present at about 2.5cm depth, these were smoothed using the least squares best fitting model. These sharp boundaries may rather be considered as evidence in favor of the interpretation of a new mixing modality, with major changes at specific depth levels rather than continuous changes.

c) Many atlases of sedimentary structures show bioturbation with sharp boundaries between mixed and non-mixed sediment, possibly due to a small number of passage of organisms in that location after sediment deposition. This observation contradicts the diffusion model of vertical sediment redistribution, as the latter model assumes the presence of vertically randomized sediment even at low intensity of mixing.

## Sediment Riffle Model

### Geologic Background

There are different modes in which the sediment could be vertically redistributed after deposition. In many cases, there is a random vertical redistribution of the sediment around a specific stratigraphic interval, where the diffusion model seems to be applicable. In other cases, however, more complex modalities of bioturbation exist, as it can be

directly observed in the ichnofacies found in a variety of depositional environments (for a review of the ichnofacies, see *e.g.* Knaust and Bromley, 2012).

The presence of layers or laminae was sometimes used as an evidence for the absence of vertical mixing. However, this presence cannot be used as a proof of an ordered succession, as some of these laminae might have been either transported laterally, or vertically bioturbated to specific depth levels. Specifically, sediment bioturbation might occur in a way that a considerable amount of sediment is transported from one specific depth to another only along “vertical corridors” having a very limited lateral areal extent. These corridors might be similar to those produced by head-down deposit feeders, although the nonlocal transport could also be between two depth levels instead of between the sediment-water interface and depth. Once the sediment reaches the new depth interval, it is spread laterally by bioturbation only at this level. Examples of ichnofacies that might produce this type of effect by bioturbation include *Thalassinoides*, *Chondrites*, and *Paleodictyon*. Within this new stratigraphic depth interval, where the sediment is entirely transported to, and having a comparatively limited thickness, the sediment might be randomly mixed. The thickness of the new level and the modality of vertical mixing within it depend on the type of ichnofacies that was mainly responsible for the bioturbation. For example, *Chondrites* might involve a thicker stratigraphic interval in which it “operates” than that of *Thalassinoides*, whereas the single burrows produced by the latter might be thicker than those by the first. Also, different ichnofacies might be related to organisms acting at different depth levels in the sedimentary succession. Except for the position of the burrows constituting the “vertical corridors”, there will be no major mixing of sediment between the different sediment depth levels (depth intervals). The main effect when comparing these different levels is therefore that of vertical shuffling of discrete units of sediment between these levels rather than a chaotic homogenizing vertical mixing, even though these units have a limited lateral extent (few cm to few tens of cm).

Except for glaciers where sedimentation rates are very high (up to  $10\text{m yr}^{-1}$ ), sedimentation rates (see Seibold and Berger, 1996 for a brief review of them in different sedimentary environments) range between  $1\text{cm yr}^{-1}$  (for coral reefs) and about  $1\text{mm kyr}^{-1}$  (deposition of red clay in abyssal regions away from continents). These rates are therefore small when compared to the speed of bioturbation, thus not affecting the activity of the organisms while repositioning the sediment within the new depth level. This in turn will not enforce additional vertical sediment mixing. This is also confirmed by Barsanti *et al.* (2011), where  $^{14}\text{C}$  ages on core upper layers and reference data indicate that sediment accumulation can be neglected when analyzing the vertical distribution of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in the seabed.

An extreme case of sediment shuffle might be approximated to that of riffle shuffle model, by cutting a pack of cards into two halves and then interleaving them. There are many geological situations where this can occur. An example is when a sudden deposition of a layer occurs (*e.g.* a turbidite), with the community that was bioturbating at a certain depth interval makes a stepwise shift upward, with the organisms restarting their bioturbation at a new shallower level (same depth of before measured starting from sediment surface). Where these types of laterally spread ichnofacies are well preserved in the sediment, clearly the diffusion approach of vertical mixing cannot account for the vertical redistribution of sediment, and sediment shuffle approach would better describe the vertical redistribution of sediment. Only when the shuffle of sediment occurs a large number of times within the same (large) depth interval, the new vertical distribution of laminae in sediment would become nearly randomized with respect to the original vertical order.

The vertical “shuffling” of sediment is obviously not produced only following an upward direction. The position of this new depth interval to which the bulk amount of sediment is transported could also be sometimes stratigraphically lower than the original depth of sediment deposition (*e.g.* due to the depth at which the organisms of the new community bioturbate).

The proposed sediment shuffling model is approximately similar to the shuffling of a deck of cards. This paper introduces the geologic background of the sediment shuffle to account for the vertical redistribution of sediment, and consequently estimates the entropy of the superpositional relationships of the laminae. This would also pave the way for mathematical models of the transition between riffle shuffle and diffusion of sediment mixing.

### **Mathematical Basis for Sediment Riffle Shuffle**

Bayer and Diaconis (1992) established how many times a deck of cards must be riffle shuffled before it can be in close to random order. This theory is applied here on the vertical redistribution of sediments (*e.g.* by bioturbation). The goal is to explore the mathematical basis for determining how many times a sediment (*e.g.* originally laminated) must be riffle shuffled before the vertical distribution could finally be in close to random order. To the knowledge of the author, this question was not previously answered. The answer depends not only on the metric (depth, number of laminae, etc.) to be used to measure distance to uniformity, but also on the particular properties of the sediment (grain size, soft or hard sediment, etc.).

Riffle shuffle necessitates that the deck of cards would first be cut into two piles be riffled according to the binomial distribution, and then the piles together by successively dropping cards from either pile with probability proportional to the size of the pile. Even though the vertical redistribution of sediment happens from within the same “pile” of laminae (*i.e.*, the process is mechanically different), the final randomizing effect on the vertical order of the laminae (see the geologic background section of above) might be in some cases approximately the same as that applied on a deck of cards. The sediment will be transported by bioturbation vertically instead of laterally.

The shuffle model, which accurately shows how most people actually shuffle a deck of cards, was introduced by Gilbert and Shannon (Gilbert, 1955) and independently by Reeds (Reeds, 1981). Repeated

shuffles are defined by convolution powers (see Assaf *et al.*, 2009 for a brief overview). The total variation distance is a distance measure for probability distribution. It is an example of a statistical distance metric. Bayer and Diaconis (1992) concluded based on their results that, for a deck of 52 cards, 7 riffle shuffles are enough. Any fewer shuffles are too far from being random, whereas the net gain in randomness for doing more than 7 shuffles is not sufficient to warrant the extra shuffles. However, it was later shown that there is a version of the game “solitaire”, called “new age solitaire”, for which 7 shuffles are in fact too few. Bayer and Diaconis (1992) based their work on a model of riffle shuffling  $n$  cards as a random walk on  $S_n$  (the symmetric group on  $n$ ).  $S_n$  is the standard notation for the group of permutations of  $n$  things (despite the name ‘symmetric group’, these groups are not directly related to ‘groups of symmetries’ of geometric objects). See Garret (1998) for an easy explanation of the symmetric group. Properties of the algebra  $L(S_n)$  play an important role in their analysis (Steinberg, 2012). A number of other card shuffling methods have also been analyzed using the representation theory of  $S_n$  (Diaconis, 1988; Diaconis and Shahshahani, 1981). By applying the results of Aldous and Diaconis (1986) and Bayer and Diaconis (1992) to the vertical redistribution of sediment,  $(3/2) \log^2 n + c$  shuffles are necessary and sufficient to make the total variation distance small, while  $2 \log_2 n + c$  shuffles are necessary and sufficient to make separation small. (Unless an alternate base (which will always be 2) is given, logarithms are assumed to be natural). This is to say, they show that this is the point at which there is a sharp cut-off (from 1 to 0) in the total variation distance between the law of the deck configuration and the uniform distribution, assuming  $n$  is large (see *e.g.* Stark *et al.*, 2002). The parameter  $n$  is the total number of laminae involved in the bioturbation process, and is related to the depth of the Sediment Mixing Layer - SML.

Bioturbation in marine sediments occurs mainly within a surficial narrow zone with a world-wide, environmentally invariant mean of 9.8cm, and a standard deviation of 4.5cm (Boudreau, 1998). Note also for example that Ekdale *et al.* (1984) found that the surficial Mixed

Layer ranged from 3 to 10cm in thickness, and this was statistically more homogeneous than the underlying Transition Layer. It is therefore possible to have an analogy between laminated sediment and the 52-card deck, with nonlocal diagenesis transporting within the top 52 laminae, especially when the laminae are quite thin (*e.g.* up to 2mm thick laminae). With a mixed layer of about 52 laminae, the overall thickness of sediment becomes large enough to account for most bioturbation cases known (up to 10cm of total thickness of the bioturbated sediment). Based on this analogy, it would be possible to apply the dovetail or Gilbert-Shannon-Reeds (hereafter GSR) model in order to compute how likely it is that a riffle results in a particular riffle shuffle permutation. Statistical experiments presented in Diaconis (1988) show that the GSR model is a realistic description of the way people shuffle cards. This strong relationship between theory and practice is in favor of the application of this model to the shuffling of sediment. It takes therefore 5 riffles before the total variation distance of sediment, with SML of 52 laminae, begins to drop significantly from the maximum value of 1.0, and 7 riffles before it drops below 0.5 (to 0.334; see *e.g.* Assaf *et al.*, 2009) very quickly (a threshold phenomenon), after which it is reduced by a factor of 2 every shuffle.

The basic concept of this paper relies on a discrepancy between the geologic time inferred using the principle of superposition and that used by resetting the clock of the age of sedimentary laminae affected by bioturbation after such a bioturbation has occurred. The concept of entropy as stratigraphic loss of information relies on a comparison between the original vertical order of sedimentary layers or laminae and the vertical order resulting after bioturbation has occurred. So far, there has been extreme reliance on the principle of superposition as well as extreme confidence that the age of a re-deposited sedimentary layer is the time of its re-deposition. Clearly, there is a discrepancy between the two principles, especially in the case of some nonlocal diagenetic effects when some organisms act at depth inverting the original vertical order of sedimentary laminae. If the value of entropy is zero, then there is no change in the original vertical order of the laminae after bioturbation

has occurred. Fiber entropies and limiting processes for several types of card shuffles, including the GSR model, are mathematically defined in Lalley (1999).

Stark *et al.* (2002) studied the asymptotic behavior of the relative entropy (to stationarity) for a commonly used model for riffle shuffling a deck of  $n$  cards  $m$  times. Their results show, loosely speaking, that the relative entropy decays approximately linearly (in  $m$ ) for  $m < \log_2 n$ , and approximately exponentially for  $m > \log_2 n$ . Again, using the analogy of above between the cards and the sedimentary laminae, this rate of entropy decay becomes also directly applicable to sedimentary laminae. Trefethen and Trefethen (2000) observed that, for the GSR model, the threshold at  $m = (3/2) \log_2 n$  shuffles is also observed in relative entropy. Since there is mixing within the laminae transported by bioturbation and possibly no mixing in between, the above given entropy estimates for the sedimentary record constitute a minimum.

Lalley (2000) analyzed the rate of mixing for  $p$ -shuffles, and discussed the related entropy. This model is a natural generalization of the dovetail shuffle. Conditional on the outcome of the cut, the two stacks are “riffled” in such a way that all possible riffles (interleavings) of these two stacks are equally likely. He found an explicit bound on the rate of convergence. For  $p$  sufficiently near  $1/2$  (*i.e.*, for dovetail shuffle), with  $0 < p < 1$ , a conjecture predicts the presence of a cutoff phenomenon occurring at  $C_p \log N$ , for a suitable constant  $C_p$ . Two obstructions to mixing exist when applying the  $p$ -shuffle model to the sedimentary record (applied in detail in Lalley, 2000 on the deck of cards). “Clumping” is the tendency for a large number of laminae at the top or bottom of the bioturbated zone to remain in their original vertical order. This may occur in the  $p$ -shuffle for  $p$  near 0 or 1 because the bioturbated zone is, with high probability, split into separate vertical subzones (so unevenly divided) that laminae near the top or the bottom of the bioturbated zone have little chance to be mixed with those from the remaining part of the bioturbated zone. This can happen for example because of the limited depth distribution of some ichnofacies, or because some depth levels alternately might be richer or poorer in

organic matter (at different time slices there has been more preservation of organic matter). Clumping may explain why in paleoceanography we tend to have a higher confidence in the holocene record. “Cold spots” refers to predictable areas of the bioturbated zone where unusually a large number of neighboring pairs of laminae  $i, i + 1$  tend to remain in their original vertical order. For  $p$  near 2, the existence of cold spots is the obstruction that persists for large values of  $n$ , while for  $p > 0.71$  clumping is the persistent obstruction. Clumping will occur when  $C < 1/\log p^{-1}$ . The presence of these obstruction effects, by preserving the original vertical order of the laminae in some subsets of the bioturbated zone, might give a misleading impression that the whole bioturbated zone has laminae keeping the original depositional vertical order.

Zeeberg (2003) indicated that, when a pack of 52 cards is subjected to 8 or more repetitions of a particular type of shuffle, the ordering of the cards is restored to the original. This “card magic” shuffle consists of dividing the pack exactly in half, and then interleaving cards coming alternatively from each half (see Andrew (2006) for a brief review of the assumptions and technical details and for a related mathematical conjecture). Zeeberg (2003) suggests that the effect explains re-emergence of order after random disturbance. As discussed previously, some sedimentation rates are quite slow, thus allowing for a relatively large number of shuffle repetitions, with the consequence of nearly re-establishing the original superpositional order of laminae. Even a graph showing a linear relationship between sediment depth and its radiometric age (e.g. AMS<sup>14</sup>C dates) using high resolution stratigraphy would not be useful to reveal the presence of such an effect. This opens a question on the reliability of high resolution stratigraphy (e.g. elemental transects) even when the sediment is apparently laminated.

### **Sediment Riffle Shuffle with Repeated Laminae**

If sediment with distinct laminae transported vertically into other distinct laminae is considered, then all aspects of a permutation are taken into account, and  $(3/2) \log_2 n + c$  shuffles are necessary and sufficient to make the total variation distance small. However, if some



of the original laminae could be considered as equivalent, only certain aspects of the permutation matter.

To detect sediment vertical randomization in biostratigraphy (and in all types of stratigraphic studies using tracers), vertical mixing would have to affect a stratigraphic depth interval longer (deeper) than that of the biozone related to this interval. In other words, a shift in the order of the laminae within a stratigraphic interval lying wholly inside a biozone would only shift the order of the (micro)fossils found within it, instead of transporting these fossils from one biozone into the stratigraphically adjacent one. The biozone boundaries would therefore be detected in the same position, before and after bioturbation, as if the laminae within the same biozone become equivalent. In this case, where a change of the order of the laminae within the same biozone would not affect the permutation (becomes irrelevant), only certain aspects of the permutation matter. It would therefore be possible to look at the sediment as if it has repeated laminae. Thus, the total number of shuffles required to randomize sediment would be approximated by that of a deck with repeated cards. See Assaf *et al.*, (2009) and Assaf *et al.*, (2011) for the full mathematical treatment of the theory of repeated cards. The number of shuffles drops therefore from  $(3/2)\log_2 n$  to  $\log_2 n$ . Additionally, it might be possible to apply the model of repeated cards to sediment bioturbation where the same original lamina (or group of laminae) contribute to the formation of more than one new lamina.

Many studies dealt with the number of times it takes certain features of a permutation to become random (for a review, see Diaconis, 2003; Assaf *et al.*, 2011). Examples include the longest cycle, the descent structure, etc. These types of studies are of great importance when applied to the vertical redistribution of sediment. Examples include the possibility of detecting and dating climatic cycles in the sediment even after the latter was subject to bioturbation, etc. Since separation provides an upper bound for total variation, it becomes a good measure to use when total variation is too complicated to compute (see *e.g.* Assaf *et al.*, 2009).

## Modeling Community Bioturbation

Bayer and Diaconis (1992) generalized the GSR shuffle to the a-shuffle, by riffling together different packets of a deck of cards. Let  $a$  be a positive integer. Assuming that all riffle combinations are equally likely, performing a randomly selected a-shuffle followed by a randomly selected b-shuffle turns out to be equivalent to performing a randomly selected ab-shuffle. Thus, a sequence of  $k$  shuffles is equivalent to a single  $2k$ -shuffle. This could be considered as the link between a-shuffles and repeated shuffles. The a-shuffle mathematical treatment can be applied to the vertical redistribution of sediment with more than one organism bioturbating at the same stratigraphic depth interval.

## Limitations of Sediment Riffle Shuffle Model

When ichnofacies are well-preserved in the sediment, many organisms have clearly bioturbated it more in a “pseudo-discrete” way rather than by diffusion. Some of the types of ichnofacies that spread laterally, after going down to a certain depth level in the sediment, occur quite frequently. Kennedy (1975) suggested that the typical ichnofacies in deep-sea carbonates consists partially of *Chondrites*. These are some of the most characteristic traces in ancient carbonate oozes in Deep Sea Drilling Project cores; they are preserved within the sediment rather than on bedding planes. These ichnogenera were also found in the box cores used in Ekdale and Berger (1978). However, the main limitation of the riffle shuffle model is that it may apply in only a limited number of cases. The main relevance of the entropy estimate of shuffled sediment is in the interpretation of geologic processes in instances of past singular, and sudden catastrophic events, such as asteroid impacts and large volcanic explosions, and possibly late pleistocene deglaciation events (Hans Thierstein, personal communication). Indeed, while the sediment is transported vertically to a new depth level by bioturbation, it is sometimes also mixed with that already available at this new level. A model properly describing the vertical redistribution of sediment would necessitate in this case a combination between that of sediment riffle shuffle and that of eddy diffusion.

As for the analogy between a deck of cards and laminated sediment, each card in the deck is basically a “single piece”, whereas the sediment is made of a large number of loose particles. However, since these particles are sometimes *ingested* by the organism, rather than simply being pushed to the side during its passage, they are transported together rather than as single particles.

Another limitation is the application of a set of forceful assumptions (*e.g.* maximum number of laminae within the SML) to transform a sediment shuffle model into that of a riffle shuffle. There is therefore a need for a mathematical treatment of a more generalized riffle model related to each main type of ichnofacies, and to their combination.

It is quite important to understand the effects of the stratigraphic change in the order of laminae when the sediment is vertically redistributed, despite the fact that the riffle shuffle model may apply only to a limited number of cases. This is because this order change would heavily influence any high resolution stratigraphy, thus affecting the fine tuning of the models explaining the Earth as an ecosystem. These effects would basically undermine the current extreme belief in the principle of superposition adopted even at a very small vertical distance of few mm using profiling x-ray fluorescence scanner. This undermining would be true even when shuffling models are only partially realistic.

### **Taiji Diagram as transition from Riffle Shuffle to Eddy Diffusion**

The Taiji diagram is the same as the Yin Yang model. It can be used to represent the bioturbation and the mixing of sediment. The Yin and Yang (different black and white parts of the Taiji diagram) are inter-fingering, and these may be used to visually represent alternate laminae. Sedimentary laminae are usually deposited in a flat horizontal manner. The original Taiji diagram shows how the curvature produces an inter-fingering leading to a reversal in the order of the Yins and the Yangs. Translated into sedimentary laminae, this represents an apparent, small scale model for the inversion of the time-order relationships

of stratigraphic events (we have to imagine Yin Yang boundary as transformed into a flat surface). In other words, these are cases where a straightforward application of the principle of superposition is not possible. Even though the Taiji diagram is more suitable for spherical visualization (see Ohno and Kageyama, 2009), it is possible to use the analogy with the Yin Yang boundary in the fractal design of the Taiji diagrams (*e.g. sensu* Fig. 4 of Browne, 2007) in order to visually represent the transition from sediment riffle shuffle model to that of eddy diffusion. This visual analogy is to be applied to the boundaries between different laminae that are subject to multiple bioturbations through time. The sharp boundaries between the Ying and the Yang acquire more complex fractal geometry after recursive filling. The more bioturbation occurs, the closer the model will be to that of eddy diffusion. The above discussion focused on the boundary between laminae as there could also be real mixing (rather than riffle shuffle) *within* the burrow produced by the organism, with consequent loss of stratigraphic information due to this mixing. Graphically speaking, the model will be such that as if the black parts of Taiji diagrams have mixing inside, whereas the white parts are “discrete units”. For future detailed modeling, this mixing within burrows would constitute a discrepancy from the classical available models of riffle shuffle as every card of the deck of cards is a discrete unit with no “mixing” inside, whereas in the case of the sedimentary record only the surrounding laminae have not been subject to a change in the original position of their particles.

### **Stratigraphic Information Loss in Top-to-Random Shuffling of Laminae**

A more general model, and therefore more applicable to the sedimentary record, is that of the top to random shuffle. It was originally studied in Aldous and Diaconis (1986), where it was shown that a deck of  $n$  cards becomes random (total variation mixing time for this Markov chain) after about  $n \log n$  top to random shuffles. In Diaconis *et al.* (1992), explicit transition probabilities were found for the top to random shuffle and were used to find the limiting total variation distance from the uniform distribution of the distribution of a deck of  $n$  cards shuffled

by an amount equivalent to the floor of (*i.e.* the largest integer less than or equal to)  $n \log n + cn$  times.

In the top to bottom- $k$  shuffles, a deck of  $n$  cards is shuffled by repeatedly moving the top card to one of the bottom  $k_n$  positions uniformly at random. This is a more generalized model than that of top to random shuffles since, for  $k_n = n$ , it is possible to convert to the top to random walk, consequently computing the upper and lower bounds on the total variation mixing time for this shuffle as  $k_n$  ranges from a constant to  $n$  (see Goel, 2006 for details). Given the analogy described above between the cards and the sedimentary laminae, this model is even more applicable to the above-mentioned specific types of nonlocal diagenesis by bioturbation than all the shuffling models previously discussed (riffle shuffle and top to random). This is because specific types of benthic organisms may try to burrow down to a certain depth level that is nearly (but not necessarily exactly) the same every time as, at exactly the same level, the organic matter may have already been largely consumed during a previous “visit”.

A more recent review of the top to random shuffle theory is found in Stark (2002). It explains a step by step information loss when taking the top card of the deck and replacing it in a randomly chosen position of the deck. It finds approximations of the relative entropy of a deck of  $n$  cards after  $m$  successive top to random shuffles. Initially, the relative entropy decays linearly, and for larger  $m$  it decays geometrically at a rate that alters abruptly at  $m = n \log n$ . The procedure proposed here for the application of the entropy originally estimated in top to random shuffle of a deck of cards to the sedimentary record is based on the analogy between the cards of a deck of cards and the laminae, in both cases dealing with discrete units. For complete assumptions and details of this analogy, see those used for the model of riffle shuffle described above. In other words, the top to random in the deck of cards would become equivalent to the transport of the sedimentary material by bioturbation from the surface sediment (or from a specific depth level) to deeper sedimentary depth interval, where this new depth level is chosen randomly (the position distribution of the new level is uniform

over all  $n$  laminae found below and affected by the range of action of the organism). Due to this analogy, the entropy estimate (estimate of information loss) calculated using top to random shuffle model for a deck of cards would be applicable to stratigraphic time in more cases of bioturbated sediment than using the riffle shuffle model.

## Conclusions

I introduced the geologic background for the vertical redistribution of sediment using shuffle by bioturbation, and the mathematical basis using GSR model. I established the number of times sediment must be riffle shuffled before it can be in close to random order under repeated bioturbations, and discussed the likelihood of occurrence of sediment riffle shuffle process. A visual representation of the transition from sediment riffle shuffle model to that of eddy diffusion applied to the boundaries between different laminae that are subject to multiple bioturbations through time is suggested using the analogy with flattened Yin Yang boundary in the fractal design of the Taiji diagrams. This paper clarifies the major assumptions, and sets the basics for future research, for combining mathematical models available for nonlocal transport with those for sediment shuffle, and for applying them specifically to each type of ichnofacies. The asymptotic behavior of the relative entropy (to stationarity) for riffle shuffling sedimentary laminae  $m$  times is such that the relative entropy decays approximately linearly (in  $m$ ) for  $m < \log_2 n$ , and approximately exponentially for  $m > \log_2 n$ . An estimate of information loss in stratigraphy in some cases of bioturbated sediment is provided using top to random shuffling. Real entropy estimates of stratigraphic time might even be higher than those given in this paper due to a set of geological factors.

## References

- 1 Aldous D., and Diaconis P., 1986. Shuffling cards and stopping times. *The American Mathematical Monthly*, v. 93(5), pp. 333-348.
- 2 Aller R.C., 1982. The effects of macrobenthos on chemical properties of marine sediment and overlying water. In: McCall P.L., and Tevesz M.S.S., (editors), *Animal–sediment relations*. New York: Plenum Publishing Co., pp. 53-102.
- 3 Aller R.C., 1994. Bioturbation and remineralization of sedimentary organic matter—effects of redox oscillation. *Chemical Geology*, v. 114, pp. 331-345.
- 4 Andrew A.M., 2006. Two mathematical notes – new homogenised Simpson’s rules and a riffle shuffle conjecture. *Kybernetes*, v. 35(5), pp. 748 – 752.
- 5 Assaf S., Diaconis P., and Soundararajan K., 2009. Riffle Shuffles of a Deck with Repeated Cards. *Proceedings of Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science, Twenty-First International Conference on Formal Power Series and Algebraic Combinatorics, FPSAC 2009*, v. 0(1), pp. 89-102. Nagoya, Japan.
- 6 Assaf S., Diaconis P., and Soundararajan K., 2011. Riffle Shuffles with Biased Cuts. *Proceedings of Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science. Conference on Formal Power Series and Algebraic Combinatorics, FPSAC 2012*, Nagoya, Japan. Submitted.
- 7 Barsanti M., Delbono I., Schirone A., Langone L., Misericocchi S., Salvi S., and Delfanti R., 2011. Sediment reworking rates in deep sediments of the Mediterranean Sea. *Science of the Total Environment*, v. 409, pp. 2959-2970.
- 8 Bayer D., and Diaconis P., 1992. Trailing the Dovetail Shuffle to its Lair. *The Annals of Applied Probability*, v. 2(2), pp. 294-313. doi:10.1214/aoap/1177005705.
- 9 Berner R.A., 1980. *Early diagenesis: a theoretical approach*. Princeton University Press, 241 p.
- 10 Boudreau B.P., 1997. *Diagenetic models and their implementation. Modelling Transport and Reactions in Aquatic Sediments*. Springer, 414 p.

- 11 Boudreau B.P., 1998. Mean mixed depth of sediments: the wherefore and the why. *Limnology and Oceanography*, v. 43(3), pp. 524-526.
- 12 Browne C., 2007. Taiji variations: Yin and Yang in multiple dimensions. *Computers and Graphics, Chaos and Graphics*, v. 31, pp. 142-146.
- 13 Carroll J., and Lerche I., 2003. *Sedimentary processes: quantification using radionuclides*. Elsevier, 1272 p.
- 14 Demaster D.J., and Cochran J.K., 1982. Particle mixing rates in deep-sea sediments determined from excess Pb-210 and Si-32 profiles. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 61, pp. 257-271.
- 15 DeMaster D.J., Mckee B.A., Nittrouer C.A., Brewster D.C., and Biscaye PE., 1985. Rates of sediment reworking at the Hebble site based on measurements of Th-234, Cs-137 and Pb- 210. *Marine Geology*, v. 66, pp. 133-148.
- 16 Diaconis P., 1988. *Group representations in probability and statistics*. Institute of Mathematical Statistics Lecture Notes—Monograph Series, v. 11. Institute of Mathematical Statistics, Hayward, CA.
- 17 Diaconis P., 2003. Mathematical developments from the analysis of riffle shuffling. In: Durham (editor), 2001, *Groups, Combinatorics and Geometry*, pp. 73-97. World Scientific Publishing, River Edge, NJ.
- 18 Diaconis P., Fill J., and Pitman J., 1992. Analysis of top to random shuffles. *Combinatorics, Probability and Computing*, v. 1, pp. 135-155.
- 19 Diaconis P., and Shahshahani M., 1981. Generating a random permutation with random transpositions. *Zeitschrift fuer Wahrscheinlichkeitstheorie und Verwandte Gebiete*, v. 57(2), pp. 159-179.
- 20 Ekdale A.A., 1984. Quantitative Ichnology of Modern Pelagic Deposits in Abyssal Atlantic. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 45, pp. 189-223.
- 21 Ekdale A.A., and Berger W.H., 1978. Deep-sea ichnofacies: modern organism traces on and in pelagic carbonates of the western equatorial Pacific. *Palaeogeography, Palaeoclimatology and Palaeoecology*, v. 23, pp. 263-278.
- 22 François F., Poggiale J.C., Durbec J.P., and Stora G., 2001. A new model of bioturbation for a functional approach to sediment reworking resulting from a macrobenthic communities. In: Aller J.Y., Woodin S.A., and Aller



- R.C., (editors), *Organism-sediment interactions*. Columbia: University of South Carolina Press, pp. 73-86.
- 23 Garret P., 1998. Introduction to Abstract Algebra. <http://www.math.umn.edu/~garrett/>
  - 24 Gilbert E.N., 1955. Theory of shuffling. Technical memorandum, Bell Telephone Laboratories.
  - 25 Glass B.P., 1969. Reworking of deep-sea sediments as indicated by the vertical dispersion of the Australasian and Ivory Coast microtektite horizons. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 6, pp. 409-415.
  - 26 Goel S., 2006. Analysis of Top to Bottom-K Shuffles. *The Annals of Applied Probability*, v. 16(1), pp. 30 – 55. DOI: 10.1214/10505160500000062
  - 27 Gradstein F.M., 2012. Biochronology. In: Gradstein F.M., Ogg J.G., Schmitz M., and Ogg G., (editors), *The Geologic Time Scale 2012*. Elsevier, pp. 43-61. DOI: 10.1016/B978-0-444-59425-9.00003-2.
  - 28 Guinasso Jr. N.L., and Schink D.R., 1975. Quantitative estimates of Biological mixing rates in abyssal sediments. *Journal of Geophysical Research*, v. 80, pp. 3032-3043.
  - 29 Kennedy W.J., 1975. Trace fossils in carbonate rocks. In: Frey R.W., (editor), *The Study of Trace Fossils*. Springer-Verlag, New York, N.Y.
  - 30 Knaust D., and Bromley R.G., 2012. *Trace fossils as indicators of sedimentary environments*. *Developments in Sedimentology*, v. 64, 955 p.
  - 31 Lalley S.P., 1999. Rifle Shuffles and Their Associated Dynamical Systems. *Journal of Theoretical Probability*, v. 12(4), pp. 903 – 932.
  - 32 Lalley S.P., 2000. On the Rate of Mixing for p-Shuffles. *The Annals of Applied Probability*, v. 10(4), pp. 1302-1321.
  - 33 Lohrer A.M., Thrush S.F., and Gibbs M.M., 2004. Bioturbators enhance ecosystem function through complex biogeochemical interactions. *Nature*, v. 431, pp. 1092-1095.
  - 34 Maire O., Lecroart P., Meysman F., Rosenberg R., Duchene J.C., and Gremare A., 2008. Quantification of sediment reworking rates in bioturbation research: a review. *Aquatic Biology*, v. 2, pp. 219-238.
  - 35 Mauviel A., and Sibuet M., 1985. Répartition des traces animales et importance de la bioturbation. In: Laubier L., and Monniot C.L., (editors), *Peuplements Profonds du Golfe de Gascogne*. IFREMER,

- Brest, pp. 157-173.
- 36 Meysman F.J.R., Middelburg J.J., and Heip C.H.R., 2006. Bioturbation: a fresh look at Darwin's last idea. *Trends in Ecology and Evolution*, v. 21, pp. 688-695.
  - 37 Ohno N., and Kageyama A., 2009. Visualization of spherical data by Yin–Yang grid. *Computer Physics Communications*, v. 180, pp. 1534–1538.
  - 38 Peng T.H., Broecker W.S., and Berger W.H., 1979. Rates of benthic mixing in deep-sea sediment as determined by radioactive-tracers. *Quaternary Research*, v. 11, pp. 141-149.
  - 39 Reeds J., 1981. Theory of shuffling. Unpublished manuscript.
  - 40 Rhoads D., 1974. Organism–sediment relations on the muddy sea floor. *Oceanography and Marine Biology: Annual Review*, v. 12, pp. 263-300.
  - 41 Rice D.L., 1986. Early diagenesis in bioadvective sediments: relationships between the diagenesis of Beryllium-7, sediment reworking rates, and the abundance of conveyor-belt deposit-feeders. *Journal of Marine Research*, v. 44, pp. 149-184.
  - 42 Robbins J.A., 1978. Geochemical and geophysical applications of radioactive lead isotopes. In: Nriagu J.P., (editor), *Biogeochemistry of lead*. North Holland, Amsterdam, pp. 285-393.
  - 43 Sadler P.M., 2010. *Biochronology as a Traveling Salesman Problem. Introduction to the Conop9 Seriation Programs*. 79 p. Second PDF Edition. University of California.
  - 44 Schink D.R. and Guinasso Jr., N.L., 1977. Effects of Bioturbation on Sediment-Seawater Interaction. *Marine Geology*, v. 23, pp. 133-154.
  - 45 Seibold E., and Berger W.H., 1996. *The Sea Floor. An Introduction to Marine Geology*. Third Edition. Springer. 356 p.
  - 46 Sigman D.M., Hain M.P., and Haug G.H., 2010. The polar ocean and glacial cycles in atmospheric CO<sub>2</sub> concentration. *Nature*, v. 466, pp. 47-55.
  - 47 Stark D., 2002. Information Loss in Top to Random Shuffling. *Combinatorics, Probability and Computing*, v. 11, pp. 607-627. DOI: 10.1017/S0963548302005382
  - 48 Stark D., Ganesh A., and O'Connell N., 2002. Information Loss in Riffle Shuffling. *Combinatorics, Probability and Computing*, v. 11, pp. 79-95. DOI: 10.1017/S0963548301004990

- 49 Steinberg B., 2012. *Representation Theory of Finite Groups. An Introductory Approach*. Springer. 157 p.
- 50 Trefethen L.N., and Trefethen L.M., 2000. How many shuffles to randomize a deck of cards? *Proceedings of the Royal Society of London A*, v. 456, pp. 2561-2568.
- 51 Wheatcroft R.A., Jumars P.A., Smith C.R., and Nowell A.R.M., 1990. A mechanistic view of the particulate biodiffusion coefficient—step lengths, rest periods and transport directions. *Journal of Marine Research*, v. 48, pp. 177-207.
- 52 Zeeberg B., 2003. Randomization and eventual reordering: a number theoretic approach. *Kybernetes*, v. 32(5/6), pp. 912-916.

## **Acknowledgements**

I would like to thank Prof. Makdisi K.K. (Mathematics Department, AUB) for indicating the work of Persi Diaconis on the riffle shuffle of a deck of cards, even though without relating it to the present geologic application.

I would also like to thank Prof. Elian J. (Geography Department) for the review of the manuscript.

Thanks are due to Prof. Thierstein H. (Swiss Federal institute of Technology in Zurich) for the discussion of some aspects of the manuscript.

Special thanks are due to Dr. Mouawad Y. for the review of the French language of the first part of the manuscript.

This work was funded using a former URB grant for Ali Haidar.

## **Activité Économique Et Chômage Dans Le Milieu Rural De La Béqaa**

*Dr. Haddad Elie<sup>(1)</sup>, Dr. Kayal Youssef<sup>(2)</sup>*

### **Résumé**

L'étude des conditions socio-économiques de la population en général et des actifs en particulier attire des chercheurs travaillant dans plusieurs domaines scientifiques comme les géographes, les économistes et les sociologues. C'est dans cette perspective que nous avons abordé ce sujet d'un point de vue nouveau, se démarquant de la majorité des études antérieures.

Les résultats de l'enquête sur le terrain montrent que le taux d'activité économique dans le milieu rural de la Béqaa est de valeur moyenne, sachant que ce taux est très proche du taux observé au Liban en 2004 ; ceci est dû à la faible participation de la femme dans la vie active. L'étude montre également l'appartenance de la majorité des travailleurs au secteur tertiaire, abandonnant le secteur primaire normalement lié au monde rural, sachant que les niveaux de vie et d'éducation de ces travailleurs sont généralement modestes. La recherche repère plusieurs indicateurs concernant l'accommodation des travailleurs dans leurs milieux de travail et le degré de satisfaction de leurs besoins ; elle dénote que la majorité des travailleurs semblent être bien intégrés dans leur emploi. Enfin, cette recherche renseigne sur le taux de chômage qui s'avère bas, ainsi que sur maints faits liés au chômage ; elle aboutit à déduire le faible impact psychologique du chômage sur un bon nombre de chômeurs, vu la solidarité familiale toujours forte dans le milieu rural de la Béqaa.

---

(1) Professeur Adjoint à l'Université Libanaise – Institut des Sciences Sociales et Faculté des Lettres et des Sciences Humaines (Département de Géographie) Branche IV.

(2) Professeur Adjoint à l'Université Libanaise – Faculté des Lettres et des Sciences Humaines (Département de Géographie) Branche IV.

## ملخص

تجذب دراسة الأوضاع الاقتصادية والاجتماعية للريفيين بشكل عام وللناشطين منهم بشكل خاص، الكثير من الباحثين في مجالات علمية مختلفة مثل الجغرافيين، علماء الاقتصاد وعلماء الاجتماع. لذلك، أتت هذه الدراسة لتعالج الموضوع من منظور مختلف وجديد.

ولقد تبين أولاً، من خلال العمل الميداني، أن معدّل النشاط الاقتصادي في الريف البقاعي متوسط، وهو قريب جداً من المعدل العام في لبنان عام ٢٠٠٤؛ ويعود هذا إلى ضعف مشاركة المرأة بشكل كبير في الحياة الاقتصادية. توضح الدراسة انتماء غالبية العاملين إلى القطاع الثالثي، شارحة أسباب ابتعادهم عن القطاع الأولي المرتبط بشكل كبير بالريف، مع تسجيل انخفاض في المستويين التعليمي والمعيشي لهؤلاء العمال. وتُظهر الدراسة وجود عدة مؤشرات حول تأقلم العمال في مراكز عملهم، ومدى إشباعها لحاجاتهم، حيث تبين أن غالبية هؤلاء لديهم اندماج في عملهم. أُلقت الدراسة أخيراً الضوء على كل ما يتعلق بالبطالة وخاصة معدّلها المنخفض، وأبرز ما خلصت إليه على هذا الصعيد، محدودية التأثير السلبي للبطالة على عدد من العاطلين عن العمل، نتيجة لقوة الترابط العائلي في الريف البقاعي.

## Introduction

Les études des caractéristiques socio-économiques des populations sont d'une grande importance dans la mesure où les gouvernements s'en servent afin d'établir leurs stratégies de développement.

Cette recherche s'intéresse aux aspects relatifs au travail concernant les résidents, dans six milieux ruraux de la Béqaa qui est composée des cazas de *Hermel*, *Baalbeck*, *Zahlé*, *Béqaa-Ouest* et *Rachaiya*. Elle prétend répondre aux questions suivantes :

Quelles sont les caractéristiques socio-économiques de la population active ? A quel point les actifs occupés sont-ils intégrés dans leurs milieux de travail ? Et comment les chômeurs perçoivent-ils et vivent-ils leur situation d'inactivité obligée ?

Le sondage est effectué en deux étapes :

- la première consiste à diviser la région de la Béqaa en trois sites géographiques : le premier au sud englobant les campagnes localisées entre la ligne de *Damas* et les dernières campagnes dans le district de la *Béqaa-Ouest* ; le second au centre depuis la ligne de *Damas* jusqu'à *Hoch-El-Rafka* ; et le troisième site au nord entre *Hoch-El-Rafka* et les dernières campagnes dans le district de *Hermel*.

Deux campagnes ont été choisies, dans chaque site, de manière aléatoire, ce qui a fait au total six campagnes qui sont : *Kfardane* et *Fakéhé* dans la partie nord de la Béqaa, *Ali-En-Nahri* et *Hoch-El-Rafka* dans la partie centre, et *Ain-El-Tini* et *Zallaya* dans la partie sud de la Béqaa.

- La deuxième étape procède à un recensement des unités résidentielles<sup>(3)</sup> occupées de manière permanente<sup>(4)</sup> dans chaque campagne sélectionnée, ce qui a permis d'avoir une base de sondage.

Le choix du nombre d'unités résidentielles, enquêtées dans chaque campagne, dépend du nombre total d'unités qui s'y trouvent : recensement général à *Ain-El-Tini* et *Zallaya*, 1/5 à *Kfardane*, 1/6 à *Hoch-El-Rafka*, 1/10 à *Fakéhé* et *Ali-En-Nahri*.

Le questionnaire est formé de trois parties : la première aborde la situation sociale et éducative des individus qui composent le ménage, la deuxième concerne la situation économique des travailleurs et la troisième étudie la situation économique des chômeurs. Ces parties sont précédées d'une introduction qui présente l'identité de l'enquêteur et éventuellement ses remarques, l'identité du chef du ménage enquêté, ainsi que la date de l'enquête.

Les questionnaires ont été remplis durant la période avril/mai 2012. Les données, recueillies sur 2015 individus, ont été dépouillées et traitées avec l'aide du logiciel SPSS, et les graphiques ont été tracés sur Excel.

---

(3) Ici, l'unité résidentielle est confondue avec le ménage.

(4) Pour une période de plus de six mois.

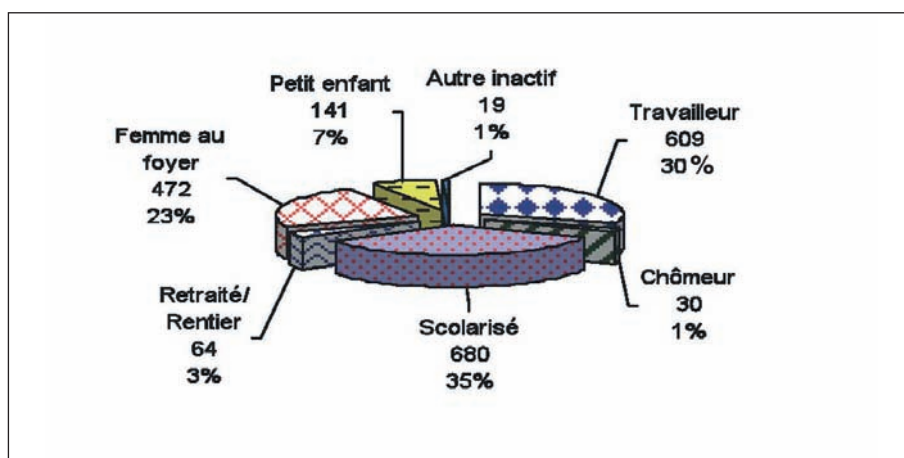
## *1- Occupation de la population*

L'étude de l'occupation des individus permet de retracer le profil de la population dans le milieu rural de la Béqaa en ce qui concerne les différentes activités exercées.

### *1.1- Composition de la population totale et taux d'activité*

Le dénombrement des effectifs des travailleurs, chômeurs, scolarisés et inactifs permet d'étudier la composition de la population totale

**Graphique 1 : Répartition de la population selon l'occupation en effectifs et en pourcentages**



Source : Nos enquêtes, 2012.

Population scolarisée, population occupée et femmes au foyer constituent les trois catégories principales de la population :

- Près du tiers de la population *poursuivent leurs études* dans les écoles, instituts et universités, ce qui indique que la société est en quelque sorte jeune.
- 30% de la population totale *travaillent* et donc subviennent aux besoins des autres membres de la population.

- Les *femmes au foyer* engagées dans la garde de leurs familles et préoccupées par les tâches ménagères représentent 23% de la population totale.

Le taux d'activité est le rapport entre la population active (population occupée et chômeurs) et la population totale. Notons que la différence entre la population totale et la population active constitue la population inactive.

**Tableau 1 : Taux d'activité de la population selon l'âge et le sexe**

		Sexe		Taux d'activité des deux sexes
		Mâle	Femelle	
Tranches d'âge	15 – 19	13.2	2.8	8.8
	20 – 24	57.9	11.3	34.2
	25 – 29	88.2	28	56.6
	30 – 34	94.2	16.5	52.7
	35 – 39	96.1	16.8	51.4
	40 – 44	96.6	24.7	63.2
	45 – 49	84	13.5	51.6
	50 – 54	86.2	16.3	56.4
	55 – 59	86.2	12	51.8
	60 – 64	72	8.7	41.7
	65 – 69	52.6	2.8	20.4
	70 et plus	45.2	0	45.2
Total	51.4	10.7	31.7	

*Source : Nos enquêtes, 2012.*

Le taux d'activité atteint 31.7%. Ce faible taux résulte de la participation très timide de la femme dans la vie économique car les usages et les coutumes dans le monde rural l'empêchent d'exercer nombre de métiers d'une part et lui réservent un autre rôle social d'autre part. En effet, le taux d'activité atteint 51.4% chez les hommes contre 10.7% chez les femmes.



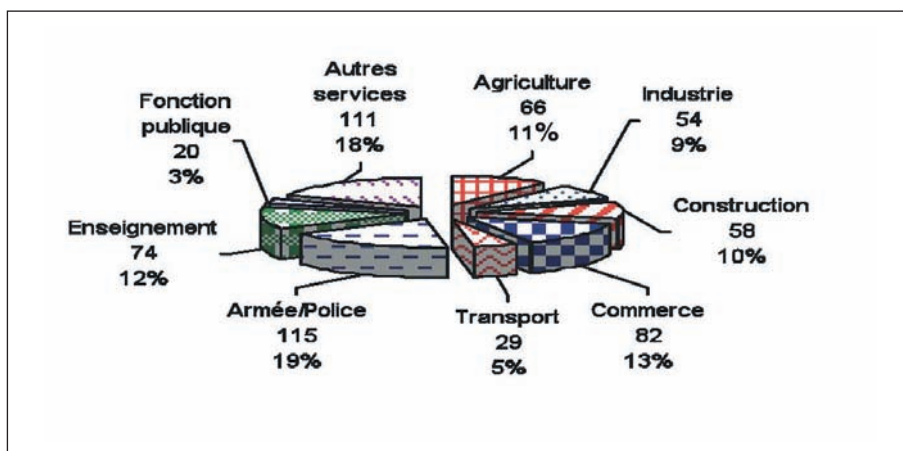
Le taux d'activité varie également selon l'âge :

- Les *hommes* pénètrent tôt le marché du travail (13.2% des hommes âgés entre 15 et 19 ans travaillent ou sont à la recherche d'emploi) et le quittent très tard (45.2% des hommes ayant 70 ans ou plus sont occupés), sachant que le taux maximum est enregistré dans la tranche [35 – 44] ans.
- Les *femmes* entrent plus tard sur le marché du travail (seulement 2.8% des femmes âgées entre 15 et 19 ans travaillent ou sont à la recherche d'emploi). Leur taux d'activité atteint son maximum dans la tranche [25 – 29] ans, et diminue vite avec l'avancement en âge car il incombe, en général, à la femme qui se marie, de s'occuper de sa famille (époux et enfants) ; donc, pour elle, c'est le foyer, c'est le dedans.

### 1.2- Secteurs d'activité économique

Le volume d'emploi de la main d'œuvre dans un secteur déterminé révèle l'importance relative dudit secteur dans les milieux ruraux étudiés.

**Graphique 2 : Répartition des travailleurs selon les secteurs d'activité économique en effectifs et en pourcentages**



Source : Nos enquêtes, 2012.

La population active occupée est inégalement répartie entre les différents secteurs d'activité économique :

- *L'agriculture* emploie seulement 11% ; ce pourcentage est considéré bas pour un milieu rural agricole ; en effet, les fils et les petits fils d'agriculteurs s'orientent vers d'autres professions ; en contrepartie, une minorité d'actifs en provenance d'autres secteurs choisit de travailler dans l'agriculture.

La population qui travaille dans l'*agriculture* se montre vieille, étant donné que 7.5% des travailleurs dans le secteur sont âgés *entre 15 et 29 ans*, 45.5% *entre 30 et 49 ans* et 47% sont âgés *entre 50 et 75 ans* ; la tranche d'âge *70 ans et plus* constitue, à elle seule, 15% de la population travaillant sans l'*agriculture*.

Cette population est plutôt masculine : 95% sont des *hommes* et 5% sont des *femmes*.

- *L'industrie* et la *construction* accueillent 19% ; la vague de construction qui a commencé dans la région de la Béqaa en 2008, ainsi que la multiplication des carrières de pierres et des casse-pierres expliquent l'importance des demandes d'emplois dans ces secteurs. La répartition des actifs dans les secteurs de l'*industrie* et de la *construction* selon l'âge montre une prédominance de l'âge médian ; en effet, 18% sont âgés *entre 15 et 29 ans*, 63% sont âgés *entre 30 et 49 ans* et 19% sont âgés *entre 50 et 75 ans* ; d'autre part, 87.5% sont des *hommes* et 12.5% sont des *femmes*.
- Le *commerce* et *services* (*transport, fonction publique et autres services*) recrutent 39% de la population active occupée ; l'entrée dans ces secteurs est relativement facile puisqu'ils n'exigent ni un niveau d'éducation élevé ni un savoir faire particulier. La distribution selon l'âge montre que 23.5% des travailleurs dans ces secteurs sont âgés *entre 15 et 29 ans*, 51.25% *entre 30 et 49 ans* et 25.25% sont âgés *entre 50 et 75 ans* ; 87% sont des *hommes* contre 13% des *femmes*.
- Le secteur de l'*armée/police* attire le plus grand nombre d'actifs qui représentent 19% de la population active occupée ;

*l'armée/police* est considéré le refuge naturel et parfois unique des jeunes à la recherche d'un emploi ; aussi, par rapport aux autres secteurs, celui-ci présente une rémunération assurée et régulière et des prestations sociales importantes.

38% des actifs dans *l'armée* et la *police* sont âgés *entre 15 et 29 ans*, 57.5% *entre 30 et 49 ans* et 4.5% sont âgés *entre 50 et 75 ans* ; par ailleurs, les *hommes* sont majoritaires (97.5%) et les *femmes* sont minoritaires (2.5%).

- *L'enseignement* scolaire, technique et universitaire, privé et public, recrute 12% des travailleurs ; en effet, la constitution d'un réseau d'écoles privées, dans les zones rurales, liées aux différentes communautés religieuses, ainsi que l'ouverture de nouvelles branches d'universités<sup>(5)</sup> un peu partout dans la région de la Béqaa ont contribué à l'élévation de ce taux.

Les travailleurs dans *l'enseignement* sont répartis selon les tranches d'âges comme suit : 21.5% *entre 15 et 29 ans*, 55.5% *entre 30 et 49 ans* et 23% *entre 50 et 75 ans* ; les *hommes* constituent 44.6% et les *femmes* 55.4%.

## ***2- Profil pécuniaire et éducationnel des travailleurs***

Nous examinons dans ce paragraphe le niveau de vie (relevant du domaine économique) et le niveau d'éducation (dépendant du domaine social) des travailleurs qui sont au nombre de 609.

### ***2.1- Niveau de vie***

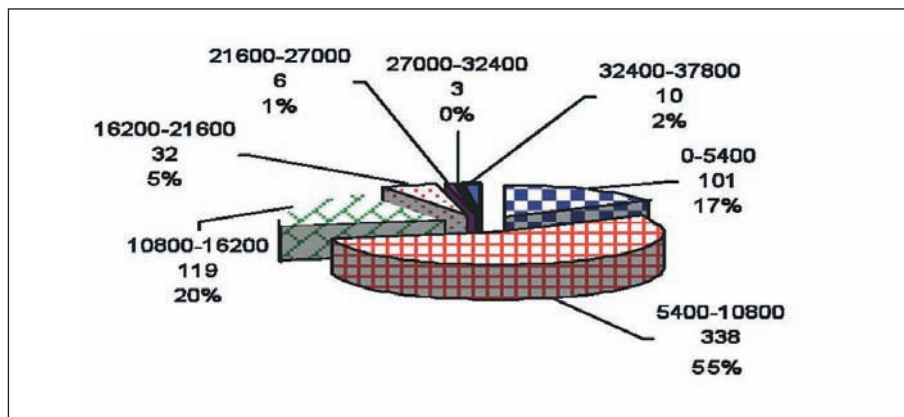
Le niveau de vie, qui détermine la prospérité de la population, dépend du revenu. Ce dernier peut être un revenu du travail, un revenu du capital ou un revenu de transfert. Nous nous intéressons dans ce qui suit au revenu du travail.

La moyenne des salaires atteint 9536 USD par an (795 USD par mois) et l'écart type 5608 USD par an, ce qui montre une forte inégalité des revenus dans le milieu rural de la Béqaa.

---

(5) Comme l'Université Libanaise, l'Université Saint Esprit, l'Université Antonine, l'Université de l'Imam Ouzai, l'Université LIU (Lebanese International University), etc.

**Graphique 3 : Répartition des travailleurs selon le revenu annuel en USD en effectifs et en pourcentages**



Source : Nos enquêtes, 2012.

Le niveau de vie de la population rurale dans la plaine de la Béqaa est relativement bas :

- 17% des travailleurs ont un revenu *inférieur à 5400 USD par an* (inférieur à 450 USD par mois), c'est-à-dire inférieur au salaire minimum. Il s'agit soit de contractuels travaillant à temps partiel, soit d'une exploitation de la part des employeurs frôlant le droit de travail, exploitation appuyée par le consentement du jeune rural à être sous-payé plutôt que de rester inactif.
- 55% des travailleurs ont un revenu compris *entre 5400 et moins de 10800 USD par an* (entre 450 et moins de 900 USD par mois) ; ces travailleurs risquent de ne pas pouvoir subvenir à leurs besoins personnels et à ceux de leurs familles.
- 20% des travailleurs ont un revenu compris *entre 10800 et moins de 16200 USD par an* (entre 900 et moins de 1350 USD par mois).
- 6% perçoivent un revenu annuel compris *entre 16200 et moins de 27000 USD* (entre 1350 et moins de 2250 USD par mois) ; ces travailleurs jouissent d'un pouvoir d'achat qui leur permet de couvrir leurs besoins essentiels de consommation voire même d'épargner.

- Seulement 2% perçoivent un revenu annuel *supérieur à 27000 USD par an* (supérieur à 2250 USD par mois) ; ces travailleurs forment la classe aisée.

L'étude des revenus annuels en fonction des secteurs d'activité économique permet d'identifier les secteurs les moins rémunérateurs.

**Tableau 2 : Distribution conditionnelle des travailleurs selon le revenu annuel lié par le secteur d'activité économique**

		Revenu annuel ( USD)						Total	
		0-5400	5400-10800	10800-16200	16200-21600	21600-27000	27000-32400		32400-37800
Secteur d'activité économique	<i>Agriculture</i>	27.5	47	7.5	12	3	0	3	100
	<i>Industrie</i>	22	63	13	2	0	0	0	100
	<i>Construction</i>	24	62	7	5	0	2	0	100
	<i>Commerce</i>	24.5	46.5	17	3.5	2.5	1	5	100
	<i>Transport</i>	17	62	14	3.5	0	3.5	0	100
	<i>Armée/Police</i>	0	62.5	32	5.5	0	0	0	100
	<i>Enseignement</i>	15	48.5	32.5	4	0	0	0	100
	<i>Fonction Publique</i>	15	60	20	5	0	0	0	100
	<i>Autres services</i>	16	55	18	5.5	2	0	3.5	100

Source : Nos enquêtes, 2012.

Les travailleurs dont le revenu n'atteint pas le salaire minimum sont distribués sur tous les secteurs, excepté celui de l'*armée/police*, mais avec des taux variant d'un secteur à un autre :

- Les taux les plus élevés sont perçus dans l'*agriculture* (27.5%), le *commerce* (24.5%), la *construction* (24%) et l'*industrie* (22%) ; ces travailleurs sont pour la plupart des ouvriers non qualifiés et/ou saisonniers.

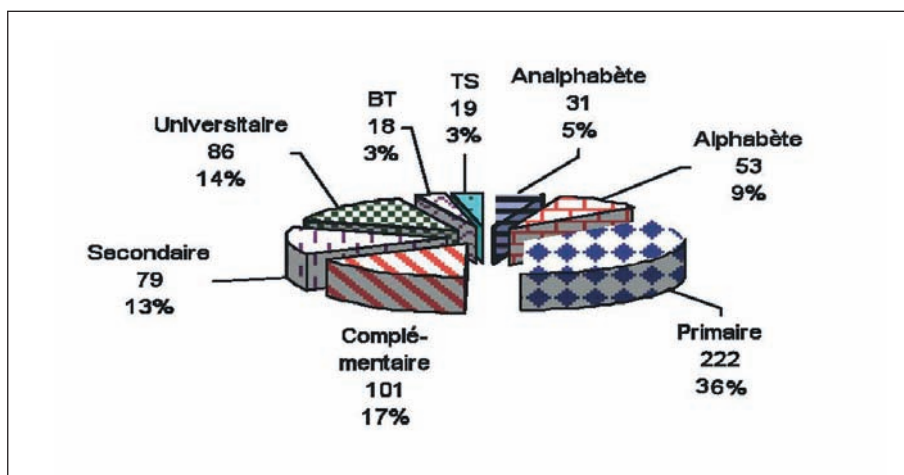
- Dans l'*enseignement*, ce taux est de 15% ; la forte concurrence, entre les diplômés des universités et ceux des écoles techniques pour intégrer ce secteur, a encouragé nombre d'institutions privées à exploiter ces deux catégories d'enseignants en leur payant des salaires aussi bas ; autrement, il s'agit d'enseignants contractuels à temps partiel.
- Dans la *fonction publique*, ce taux est aussi de 15% ; il s'agit exclusivement de travailleurs contractuels à temps partiels.

Les revenus élevés *équivalents ou supérieurs à 21600 USD par an* (équivalent ou supérieurs à 1800 USD par mois) concernent 8.5% des *commerçants* et 6% d'*agriculteurs* ; ce sont des commerçants dont le commerce est de taille moyenne ou grande et des propriétaires de terrains agricoles.

## 2.2- Niveau d'éducation

L'éducation est censée, d'une part, accroître l'employabilité des personnes à la recherche d'un travail, et d'autre part, augmenter la productivité des actifs occupés et améliorer leurs revenus.

**Graphique 4 : Répartition des travailleurs selon leur niveau d'instruction en effectifs et en pourcentages**



Source : Nos enquêtes, 2012.

Le niveau d'instruction des travailleurs ruraux se révèle modeste :

- 5% sont *analphabètes*, ce qui représente, de nos jours, un pourcentage élevé ; ils sont pour la plupart des personnes âgées (42% ont *plus de 64 ans*).
- 45% sont *alphabètes* ou de niveau *primaire*, leur productivité devrait être assez faible ; ceci indique que la déscolarisation fut importante dans un milieu rural où beaucoup de parents se retrouvaient incapables financièrement ou inaptés culturellement à assurer l'enseignement de base à leurs enfants ; les enfants déscolarisés étaient appelés à seconder pécuniairement leurs familles.
- 30% sont de niveau *complémentaire* ou *secondaire*.
- 14% sont de niveau *universitaire* ; l'ouverture des branches de l'Université Libanaise et d'universités privées, dans tous les côtés de la région de la Béqaa, a favorisé l'enseignement universitaire, surtout que les frais universitaires requis par beaucoup d'universités sont acceptables. De plus, beaucoup de ruraux montrent, depuis un temps, une volonté de poursuivre des études supérieures ; certains d'entre eux ayant eu leur baccalauréat depuis une longue durée, ayant commencé à travailler et parfois s'étant mariés et ayant eu des enfants.
- 6% ont poursuivi des études techniques (*BT* ou *TS*), profitant de l'ouverture d'un nombre d'écoles techniques dans la région de la Béqaa.

L'étude du niveau d'instruction en fonction des secteurs d'activité économique permet d'identifier, d'une part, les secteurs qui recrutent le plus de personnes ayant un niveau d'instruction modeste, et d'autre part, les secteurs qui retiennent le plus de personnes instruites.

**Tableau 3 : Distribution conditionnelle des travailleurs selon le niveau d'instruction lié par le secteur d'activité économique**

		Niveau d'instruction							Total
		Analphabète	Alphabète	Primaire	Complémentaire	Secondaire	Universitaire	BT/TS	
Secteur d'activité économique	<i>Agriculture</i>	23	9	41	18	4.5	1.5	3	100
	<i>Industrie</i>	3.7	13	63	7.5	11	1.8	0	100
	<i>Construction</i>	3.5	15.5	67	5	3.5	3.5	2	100
	<i>Commerce</i>	8.5	13.5	46.5	20.5	6	2.5	2.5	100
	<i>Transport</i>	3.5	17	55	10.5	7	0	7	100
	<i>Armée/Police</i>	0	3.5	29.5	29.5	23.5	7	7	100
	<i>Enseignement</i>	0	0	1	6	30	59	4	100
	<i>Fonction Publique</i>	5	5	30	30	15	5	10	100
	<i>Autres services</i>	3	9	24	16	8	25	15	100

Source : Nos enquêtes, 2012.

Les secteurs économiques emploient des actifs de différents niveaux éducatifs. Cependant, dans un même secteur, certains niveaux d'instruction l'emportent sur d'autres pour des raisons inhérentes aux conditions de travail en vigueur :

- Dans le secteur agricole, les *analphabètes* constituent 23% des travailleurs, les *alphabètes* 9% et ceux de niveau *primaire* 41% ; or, il est communément admis que beaucoup de travaux agricoles ne requièrent pas des aptitudes intellectuelles élevées.



- Dans les secteurs de la *construction*, de l'*industrie* et du *transport* la majorité des travailleurs sont *alphabètes* ou de niveau *primaire* ; aussi, dans ces secteurs nombre de tâches sont-elles simples n'exigeant pas un niveau d'éducation élevé.
- La majorité des actifs dans le secteur du *commerce* sont de niveaux *primaire* (46.5%) et *complémentaire* (20.5%).
- L'*armée* et la *police* ne recrutent pas des *analphabètes* ; aussi les titulaires de diplômes *universitaires* (7%) et *techniques* (7%) sont-ils une minorité dans ce secteur ; la majorité étant distribuée sur les 3 niveaux d'éducation *primaire* (29.5%), *complémentaire* (29.5%) et *secondaire* (23.5%).
- Dans le secteur de l'*enseignement*, la plupart des travailleurs sont de niveau *universitaire* (59%) et *secondaire* (30%) ; en effet, le niveau universitaire des enseignants est nécessaire pour enseigner dans les cycles secondaire et universitaire.
- Dans la *fonction publique*, la majorité des fonctionnaires sont de niveau *primaire* (30%) et *complémentaire* (30%).

### **3- Stabilité psychosociale dans le travail**

La stabilité psychosociale dans le travail est déterminée à travers : d'abord l'attachement des travailleurs à leur emploi, ensuite les statuts qu'ils occupent, et enfin le bénéfice dont ils peuvent profiter de point de vue couverture médicale, entretien de relations sociales solides ou aussi sentiment de valorisation de la personne dans le cadre du travail.

#### **3.1- Attachement à l'emploi**

D'une manière générale, les travailleurs ruraux semblent être bien intégrés dans leur travail. En effet, 86% parmi eux déclarent n'avoir *aucune envie de changer de travail*. Cependant, une telle attitude est variable selon les secteurs économiques.

**Tableau 4 : Distribution conditionnelle des travailleurs selon l'envie de changer leur travail liée par le secteur d'activité économique**

		Travailleur et envie de changer son travail		Total
		A envie	N'a pas envie	
Secteur d'activité économique	<i>Agriculture</i>	25.75	74.25	100
	<i>Industrie</i>	18.5	81.5	100
	<i>Construction</i>	29.3	70.7	100
	<i>Commerce</i>	11	89	100
	<i>Transport</i>	10.35	89.65	100
	<i>Armée/Police</i>	4.35	95.65	100
	<i>Enseignement</i>	9.45	90.55	100
	<i>Fonction Publique</i>	20	80	100
	<i>Autres services</i>	11.7	88.3	100

Source : Nos enquêtes, 2012.

Les pourcentages les plus élevés des travailleurs *désirant changer leur travail* apparaissent dans les secteurs de la *construction* (29.3%) et de l'*agriculture* (25.75%), suivis des secteurs de la *fonction publique* (20%) et de l'*industrie* (18.5%). C'est dans le secteur de l'*armée/police* que les travailleurs semblent les plus attachés à leur emploi.

L'insatisfaction relative des laboureurs et des constructeurs dérive de la nature de leur travail considéré dur et peu accommodant ; ajoutons à cela la soumission de l'activité agricole aux aléas climatiques.

Aussi, l'envie de changer son travail est-elle liée d'une part au revenu perçu et d'autre part à la nature des relations sociales au travail :

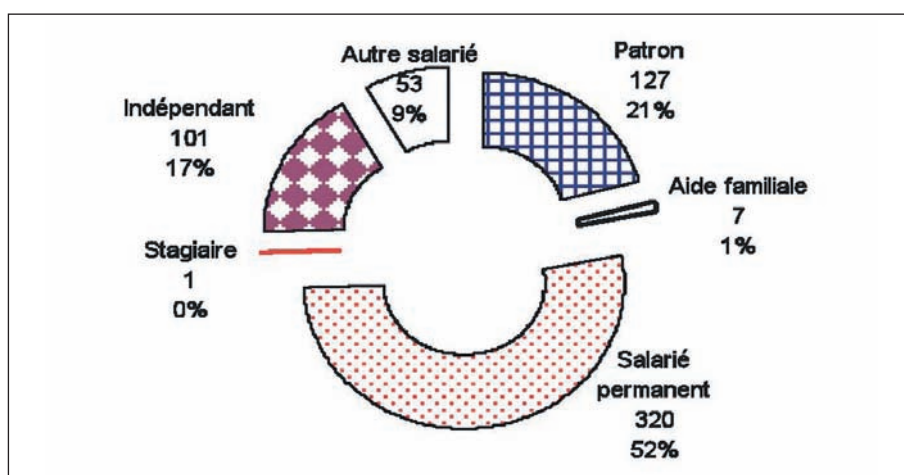
- Parmi les travailleurs qui *ont envie de changer de travail*, 96.5% ont un revenu mensuel *inférieur à 900 USD par mois* (42.35% ont un revenu mensuel *inférieur à 450 USD* et 54.15% perçoivent *entre 450 et moins de 900 USD* par mois).

- Parmi les travailleurs nouant de *très bonnes* relations de travail, seulement 7.5% *désirent changer leur travail* ; ce désir est éprouvé par 17.5% des travailleurs vivant de *bonnes* relations professionnelles et par 24% des travailleurs entretenant des relations professionnelles *moyennes*.

### 3.2- Statuts acquis

Le statut de travail acquis est directement lié à la stabilité de l'emploi : les *patrons* des entreprises et les *indépendants* créent leurs propres opportunités de travail et garantissent leur pérennité sur le marché grâce à la satisfaction des besoins de leurs clients ; alors que les salariés permanents s'assurent un salaire fixe et une continuité dans le travail à condition qu'ils respectent le règlement interne de l'institution dans laquelle ils oeuvrent.

**Graphique 5 : Répartition des travailleurs selon le statut en effectifs et en pourcentages**



Source : Nos enquêtes, 2012.

Le graphique numéro 5 montre les statuts les plus recherchés par les travailleurs :

- Le statut au travail le plus répandu est celui de *salarié permanent* (52.5%) ; en effet, la plupart des actifs recherchent un emploi salarié stable et à plein temps pour la facilité et la sécurité qu'offre ce type d'occupation ; c'est aussi le statut où les *femmes* présentent le pourcentage le plus élevé (20.3%), les *hommes* constituant alors 79.7%.
- Le statut de seconde importance est celui de *patron* (21%) ; il s'agit de chefs d'entreprises employant des subordonnés ; les *femmes* patronnes constituent 7% et les *hommes* patrons 93%, les hommes étant plus prêts à prendre le risque surtout dans le milieu rural.
- Le statut qui suit est celui d'*indépendant* (16.5%) ; il s'agit d'une personne exerçant un métier libéral et travaillant en solitaire ; au niveau de ce statut, les *femmes* constituent 11% contre 89% d'*hommes*.
- Le statut *autres salariés*<sup>(6)</sup> occupe le quatrième rang et comprend 9% des travailleurs ; ce statut est partagé entre les deux sexes comme suit : 13% de *femmes* et 87% d'*hommes*.
- Les *aides familiales* et les *stagiaires* sont minoritaires (1%) ; ils sont tous des *hommes*.

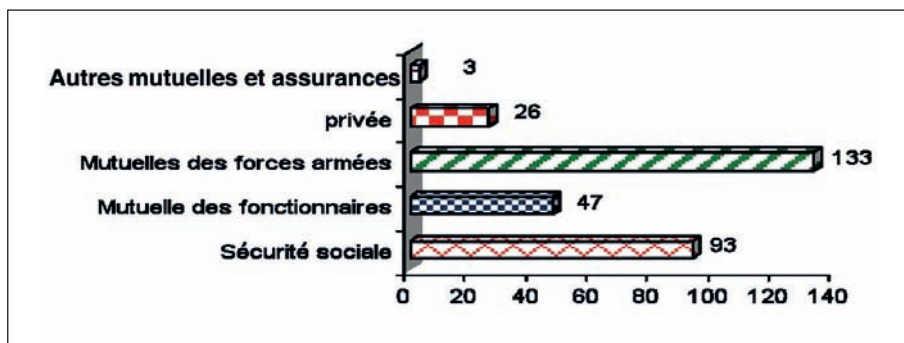
### ***3.3- Satisfaction des besoins sécuritaires et sociaux***

Concernant le besoin de sécurité, près de la moitié des travailleurs bénéficient d'une *assurance médicale* (302 parmi 609). Les assurés sont répartis selon le type d'assurance comme suit :

---

(6) Comme les journaliers, les travailleurs à la pièce ...

**Graphique 6 : Répartition des effectifs des travailleurs, retraités et rentiers bénéficiant d'une assurance médicale selon le type d'assurance**

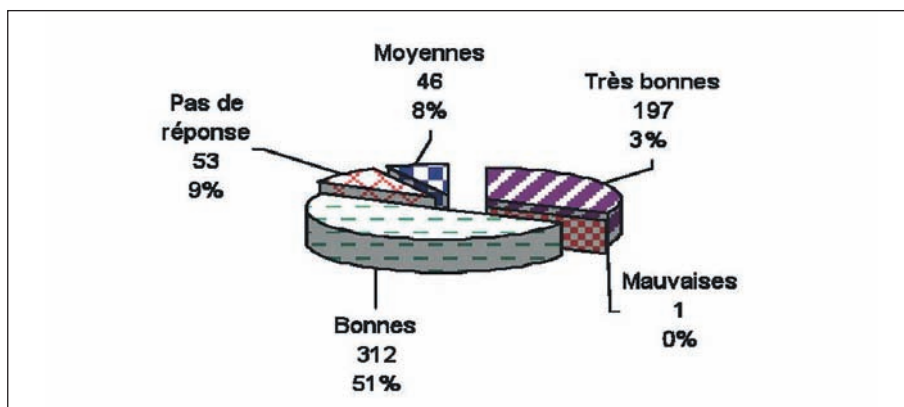


Source : Nos enquêtes, 2012.

Le type d'assurance dépend du secteur d'activité économique dans lequel œuvre le travailleur. Ainsi, la *mutuelle des forces armées* s'accapare-t-elle de la part du lion (43%), suivie de la *caisse nationale de la sécurité sociale* (30%).

Les besoins sociaux sont satisfaits par un sentiment d'appartenance à l'équipe de travail avec laquelle le travailleur entre en interaction.

**Graphique 7 : Répartition des travailleurs selon la nature des relations sociales au travail en effectifs et en pourcentages**

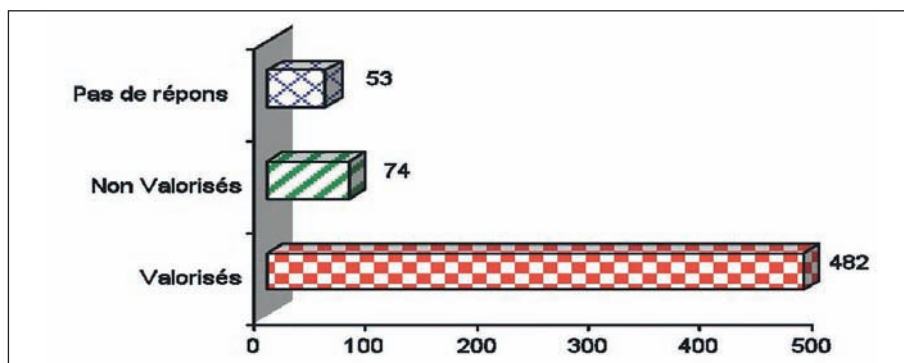


Source : Nos enquêtes, 2012.

Ce sondage montre que la majorité des travailleurs enquêtés entretiennent des relations solides dans leurs mondes de travail : 83% des travailleurs interrogés qualifient leurs relations sociales au travail de *bonnes* ou *très bonnes*, alors que seulement 8% les trouvent *moyennes* ; un seul individu avoue avoir de mauvaises relations sociales au travail ; notons que 9% se sont abstenus de toute réponse.

Le besoin d'estime ou de valorisation s'exprime par le sentiment d'être apprécié et reconnu à sa propre valeur par les autres.

### Graphique 8 : Répartition des effectifs des travailleurs selon la satisfaction de leur besoin de valorisation



Source : Nos enquêtes, 2012.

La majorité des travailleurs enquêtés se sentent valorisés dans leur travail : 79% des travailleurs *éprouvent un sentiment d'estime* au sein de leurs équipes de travail, alors que seulement 9% *ne se sentent pas estimés* dans leur boulot ; 9% n'ont pas répondu à la question.

#### 4- Etat et nature du chômage

Le chômage peut être défini comme l'état dans lequel se trouvent l'ensemble des personnes de 15 à 64 ans sans emploi et qui en recherchent effectivement un. Les chômeurs ont peur de rester longtemps dans cette situation malencontreuse. Nous cherchons à quantifier le phénomène dans un premier temps, et à éclairer la perception des chômeurs et les expériences qu'ils vivent dans un deuxième temps.

#### 4.1- Importance du phénomène

Le chômage touche la population étudiée avec un taux différencié selon le sexe et les tranches d'âges.

**Tableau 5 : Taux de chômage par âge et par sexe**

		Sexe		Taux de chômage des deux sexes
		Mâle	Femelle	
<b>Tranches d'âge</b>	15 – 19	41.7	50	42.8
	20 – 24	10.9	36.4	15.1
	25 – 29	1.7	4.8	2.5
	30 – 34	4.6	15.4	6.4
	35 – 39	1.4	5.8	2.1
	40 – 44	1.1	10.5	2.8
	45 – 49	1.7	0	1.7
	50 – 54	0	0	0
	55 – 59	0	0	0
	60 – 64	0	0	0
	<b>Total</b>	3.6	10.6	4.7

*Source : Nos enquêtes, 2012.*

Le taux de chômage atteint 4.7% avec une différence notable entre les deux sexes : 3.6% chez les *hommes* et 10.6% chez les *femmes*, car les domaines de travail de l'homme en milieu rural sont plus larges que ceux des femmes.

Comparé<sup>(7)</sup> au taux national qui a atteint 8%<sup>(8)</sup> en 2004, ce taux paraît bas ; en effet, l'exode rural dans le but de trouver un emploi en ville réduit le volume de la population active dans les campagnes.

D'une manière générale, le taux de chômage diminue avec l'âge chez les deux sexes. Il atteint son maximum chez les plus jeunes qui sont, pour

(7) Sachant que la comparaison se fait entre deux années différentes 2004 et 2012.

(8) Administration Centrale de la Statistique. Conditions de vie des ménages. Beyrouth, 2009. p. 58.

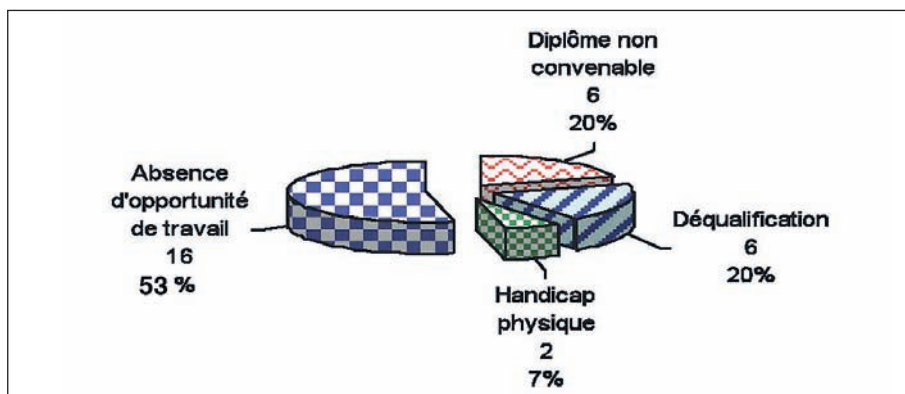
la plupart, à leur première tentative d'entrée sur le marché du travail.

Mais, derrière ces chiffres, quelque part optimistes, se cache une réalité inquiétante indiquant la montée d'un chômage déguisé : le revenu mensuel de 16% des travailleurs n'atteint pas le salaire minimum qui, au Liban, ne permet pas déjà de subvenir aux besoins essentiels des individus ; la productivité de ces actifs se révèle alors très faible et leur situation déclarée de « *travailleurs* » est équivoque.

#### 4.2- Raisons du chômage et recherche d'emploi

Les causes du chômage sont souvent regroupées en trois catégories : économiques, sociodémographiques et structurelles. Mais que seraient les causes du chômage du point de vue des chômeurs eux-mêmes ?

**Graphique 9 : Répartition des chômeurs selon leur opinion sur la cause de leur chômage en effectifs et en pourcentages**



Source : Nos enquêtes, 2012.

Selon les chômeurs, quatre raisons seraient à l'origine de leur situation:

- 53% imputent leur situation de chômeurs à l'*absence d'opportunité de travail* ; ceci renvoie premièrement au ralentissement de la croissance économique (ou à une croissance régressive), deuxièmement au progrès technologique qui fait disparaître des emplois (mécanisation accrue), troisièmement à la défaillance des politiques de création de nouveaux emplois, et quatrièmement à la concurrence de la main d'œuvre étrangère.



- 40% rapportent leur situation de chômeurs à un *diplôme non convenable* ou à une *déqualification* ; donc, pour ces chômeurs, c'est leur formation de base qui aurait affecté négativement leur chance d'acquérir un travail ou bien c'est la longueur de la période passée au chômage qui aurait réduit leurs aptitudes professionnelles.

Dans ce cadre, notons que le niveau d'éducation des chômeurs est assez bas : 44.8% des chômeurs sont *analphabètes*, *alphabètes* ou de niveau *primaire*, 27.6% de niveau *complémentaire*, 13.8% de niveau *secondaire* et 13.8% de niveau *universitaire*.

- 7% relient leur situation de chômeurs à un *handicap physique* ; il est sûr que leur handicap ne les empêche pas de travailler, mais leur candidature pour postuler un emploi présente de faibles chances d'être retenue ; il s'agit d'un chômage d'exclusion.

Les modes de recherche d'emploi sont multiples. Leur croisement avec le nombre d'occupations antérieures des chômeurs permet d'identifier les modes les plus efficaces.

**Tableau 6 : Distribution des effectifs des chômeurs selon le mode de recherche d'emploi et le nombre d'occupations antérieures<sup>(9)</sup>**

		Nombre d'occupations antérieures du chômeur						Total
		0	1	2	3	5	6	
<b>Mode de recherche d'emploi par le chômeur</b>	Presse/Internet	10	3	0	0	0	0	13
	Aide des Hommes au pouvoir	2	2	0	2	1	1	8
	Aide des Parents/Parentés	0	2	0	0	0	1	3
	Visite du terrain	1	1	1	1	1	0	5
	Autres voies	1	0	0	0	0	0	1
	<b>Total</b>	14	8	1	3	2	2	30

Source : Nos enquêtes, 2012.

(9) Aucun chômeur n'a déclaré qu'il a été occupé 4 fois.

D'après le tableau numéro 6, obtenir un emploi par la consultation de *Presse/Internet* est le moyen le moins efficace :

- 43% des chômeurs utilisent la *presse* ou l'*Internet* pour rechercher un emploi ; il s'avère que c'est le moyen le plus simple et le plus accessible pour la majorité, étant donné la multiplication des périodiques proposant des offres d'emplois et vu la facilité d'accès à Internet ; mais c'est aussi le moyen où 77% de ceux qui l'ont utilisé n'ont *jamais travaillé* et 23% ont été *occupés une seule fois*.
- 27% ont recours aux *Hommes au pouvoir*, c'est la méthode traditionnelle puisque demander des services personnels aux dépositaires du pouvoir est un élément culturel typique de la société libanaise ; parmi les solliciteurs de piston, 25% n'ont *jamais été occupés*, 25% ont été *occupés une fois*, 25% *trois fois* et 25% ont été *occupés cinq à six fois*, ce qui montre l'efficacité de ce moyen.
- 17% descendent directement sur le *terrain*, faisant le tour des institutions demandeurs d'emploi ; c'est un moyen très efficace puisque, même si 20% de ceux qui l'ont adopté n'ont *jamais travaillé*, 20% ont été *occupés une fois*, 20% *deux fois*, 20% *trois fois* et 20% ont été *occupés cinq fois*.
- 10% sont assistés par leurs *parents* et leurs *parentés* afin de trouver un emploi ; deux des trois chômeurs qui avaient emprunté cette voie ont été *occupés une fois*, et un des trois a été *occupé six fois*.
- 3% recourent à d'*autres voies*.

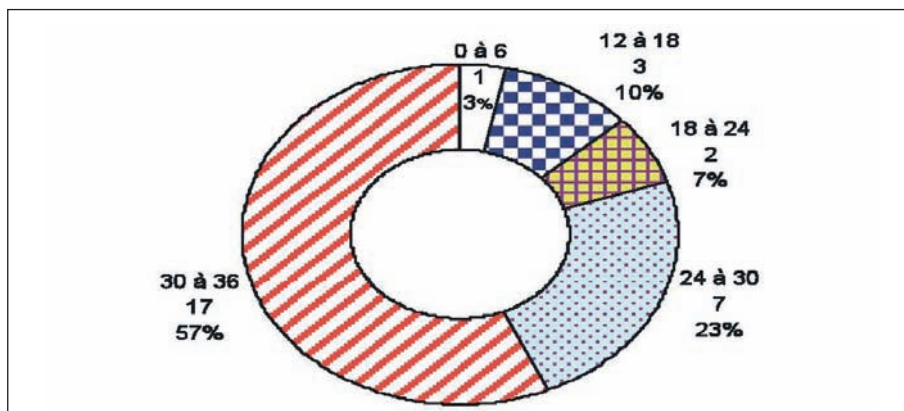
D'une manière générale, la majorité des chômeurs (46.5%) n'ont *jamais travaillé*, 30% ont connu *un ou deux passages* par le marché du travail et 23.5% ont connu *trois à six passages* par le marché du travail.

#### **4.3- Poids du chômage sur les chômeurs**

Le chômage est d'autant plus accablant que sa durée est longue et que le sentiment d'exclusion qui en résulte est fort.

Ce sont les actifs les moins qualifiés ou les moins mobiles qui sont plutôt sujets à l'allongement de la durée du chômage.

**Graphique 10 : Répartition des chômeurs selon la durée du chômage (en mois) en effectifs et en pourcentages<sup>(10)</sup>**



Source : Nos enquêtes, 2012.

La durée du chômage est longue dans la société rurale étudiée à cause de la succession des jeunes générations offrant leur force de travail sur le marché :

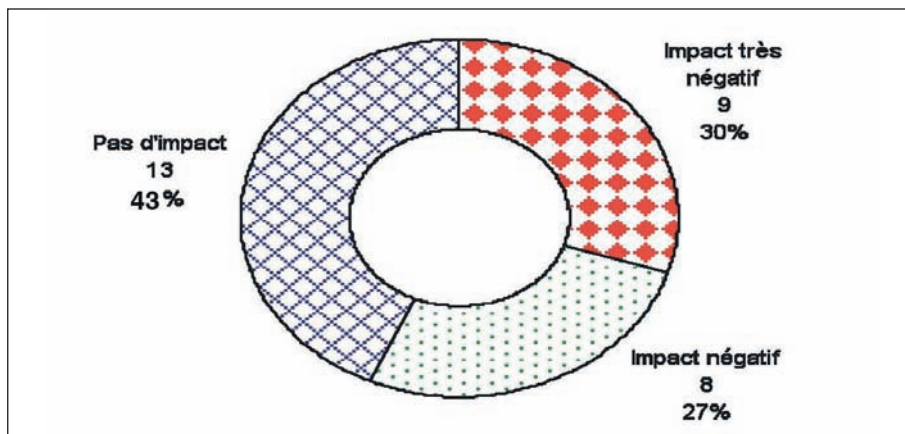
- La grande majorité des chômeurs (80%) sont inactifs depuis *deux ans ou plus* ; ces chômeurs doivent se retrouver dans une situation difficile sur les deux plans économique et social.
- 17% sont au chômage pour une période allant d'*un an à moins de deux ans* ; bien qu'une telle période de chômage ne peut être considérée très longue, surtout dans un milieu rural, mais le souci réside dans le fait que les aptitudes au travail se dégradent au fur et à mesure que la durée d'inactivité s'allonge.
- Seulement 3% sont au chômage depuis *moins d'un an*.

Sans aucun doute, outre les difficultés économiques, le chômage génère des séquelles psychologiques plus ou moins sérieuses. Néanmoins, des facteurs de l'environnement immédiat jouent un rôle prépondérant, dans la mesure où ils sont capables de renforcer l'impact du chômage comme ils peuvent l'alléger.

(10) Aucun chômeur n'a déclaré qu'il a été au chômage durant une période allant de 6 à 12 mois.

Le graphique numéro 11 montre l'influence du chômage sur l'état d'âme des 30 chômeurs identifiés :

**Graphique 11 : Répartition des chômeurs selon l'impact du chômage sur leur moral en effectifs et en pourcentages**



Source : Nos enquêtes, 2012.

La plupart des chômeurs ressentent des troubles psychiques à cause de leur exclusion du marché du travail. Cependant, un bon nombre semble surmonter ces troubles. Dans ce cadre, force est de noter que 29 des 30 chômeurs interrogés (ce qui représente 97%) ont déclaré que leurs *parents* et/ou *parentés* les pourvoient d'un revenu qu'ils n'ont pas ou n'ont plus :

- Pour 57% des chômeurs, l'*impact* est *négatif* ou *très négatif* ; un tel impact dérive d'une chute du niveau de vie, de la privation d'un statut social et d'un sentiment de rejet.
- Dans 43% des cas, les chômeurs ne ressentent *aucun impact négatif* du chômage ; en effet, ceux-ci bénéficient d'un soutien parental, moral et financier, dicté par une solidarité familiale toujours très forte dans la société libanaise en général et dans le milieu rural en particulier ; par conséquent, l'impact psychologique du chômage sur ces individus est faible voire absent.

## Conclusion

Les milieux ruraux étudiés dans la Béqaa (*Kfardane, Fakéché, Ali-En-Nahri, Hoch-El-Rafka, Ain-El-Tini* et *Zallaya*) se caractérisent par un taux d'activité de la population assez bas, alors que le taux de chômage qui y a lieu s'est avéré, contre toute prévision, faible.

Le secteur de l'*armée/police* absorbe le plus grand nombre d'actifs et contribue, par la suite, à la diminution du chômage. Sachant que les jeunes fuient le secteur agricole, ce qui constitue, à long terme, une menace à l'*agriculture*.

Toutefois, en plus des chômeurs involontaires, apparaît une catégorie de travailleurs dont le revenu n'atteint pas le salaire minimum. Cet état des choses nous conduit à les considérer victime d'un chômage déguisé, dans la mesure où le salaire minimum au Liban n'assure pas déjà, à la personne qui l'acquiert, un pouvoir d'achat lui permettant de vivre dignement. Dans ces conditions, la productivité de ces travailleurs peut être jugée très faible.

Bien qu'ils touchent, en général, des revenus modestes, un grand nombre de travailleurs se montrent satisfaits, ne désirant pas changer de travail. Cette satisfaction est une preuve de résignation, de sobriété et d'une capacité d'adaptation dont se caractérisent les campagnards, surtout qu'ils entretiennent, pour la plupart d'entre eux, des relations solides au sein de leurs équipes de travail.

## **La gestion intégrée quantitative de la ressource en eau d'irrigation - Cas de Caza de Zahlé -**

*Dr. Naji Joseph Kehdy<sup>(1)\*</sup>*

### **Résumé**

La ressource en eau souterraine d'irrigation est un problème qui devient de plus en plus épineux dans le monde. Plusieurs études (Plan Bleu, 2005) ont prouvé que la quantité de l'eau diminue à cause de plusieurs facteurs qu'ils soient physiques ou législatifs. Le Liban, considéré comme le deuxième château d'eau du Moyen-Orient, risque de souffrir de ce problème environnemental majeur et, plus particulièrement, dans la plaine de la Béqaa où la moyenne annuelle des précipitations ne dépasse pas le seuil de 600 mm. Cette région est sur le point de connaître une crise hydrique aigue dans un contexte de changement climatique. Par conséquent, il a paru intéressant de se focaliser sur un cas d'étude représentatif du problème de la Béqaa afin de mieux identifier les problèmes qui sont en relation à la crise de l'eau qui menace cette région du Liban et qui empêchent la réalisation d'une bonne gestion intégrée des ressources en eau d'irrigation (GIRE). En outre, pour savoir si nous pouvons mettre en place une bonne GIRE dans cette région, nous avons réalisé un modèle systémique à partir duquel nous avons étudié les interactions entre les différents éléments du système eau. Grâce à cette démarche, il a été possible d'identifier les paramètres majeurs qui créent un frein dans la mise en place d'une bonne gestion de l'eau d'irrigation aussi bien à l'échelle locale qu'à l'échelle nationale.

### **Mots clés**

GIRE - Système - Irrigation - Gaspillage - Interactions - Piézométrie - Productivité

---

(1) \* Université Libanaise, faculté des lettres et des sciences humaines, section 4, Zahlé. Branche de Géographie

## 1- Introduction

Dans le cadre du contexte mondial de changement climatique et de l'épuisement des ressources naturelles, l'eau à utilisation agricole et notamment l'eau d'irrigation se raréfie de plus en plus, dans certaines régions du monde comme celles du Moyen-Orient, entraînant des périodes de sécheresse aigue et causant la diminution du niveau des nappes phréatiques. Ajoutons au problème climatique, la crise de la gouvernance de l'eau d'irrigation qui peut aboutir à une gestion et à une mise en valeur non coordonnées et fragmentées de la ressource, ce qui aggrave la concurrence accrue pour une ressource finie. L'agriculture irriguée est déjà responsable de plus de 70% de toutes les extractions d'eau (plus de 90% de toute l'utilisation à la consommation de l'eau). Même avec une estimation de 15-20% de besoins additionnels d'eau d'irrigation au cours des 25 années à venir, ce qui est probablement minoré, de sérieux conflits sont susceptibles d'arriver entre les différents usages de l'eau.

Ainsi, au XXe siècle un nouveau concept voit le jour ; la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE). La GIRE est employée dans son sens le plus large. La gestion intégrée des ressources en eau est un processus systématique pour le développement durable, l'attribution et le suivi de l'utilisation des ressources en eau dans le contexte des objectifs sociaux, économiques et environnementaux pour les différents secteurs et précisément pour l'irrigation dans le secteur agricole.

Le Liban, pays sous l'influence des zones arides et semi-arides, fait face à une diminution réelle des ressources en eau surtout les ressources en eau d'irrigation formant 73% de la somme des extractions d'eau au Liban. Selon l'analyse de l'offre et de la demande, ce pays devrait se trouver confronté à un déficit annuel de 800 millions de m<sup>3</sup> d'eau d'ici jusqu'à 2025 (Khawlie et al, 1997). Au problème climatique, nous pouvons rajouter le rôle, et non des moindres, des effets gouvernementales : le manque de lois et de règlements réactualisés d'une part, et leur mise en œuvre peu efficace d'autre part, contribuent à la surexploitation de l'eau souterraine pour irriguer les terrains agricoles : Dans la plaine de la Béqaa, la nappe phréatique qui, normalement, se situait à 10 ou 15 m de profondeur est descendue à 50 m ou même plus bas déjà en 1985 (Hakim, 1985).

Le Caza de Zahlé, notre zone d'étude et limite de notre système, est situé dans la plaine de la Béquaa centrale entre les deux chaînes de montagnes du Mont-Liban et de l'Anti-Liban. Cette région s'étend sur 28150 hectares (Figure 1-1).

Cette région peut être considérée comme un cas d'étude intéressant dans le contexte libanais et cela pour les raisons suivantes :

- **Le facteur climatique.** Nous sommes dans une région à proximité des zones arides et semi-arides. Cette contrainte climatique nous aidera à mieux poser la problématique de la ressource en eau d'irrigation dans une région où le risque de pénurie hydrique est omniprésent.

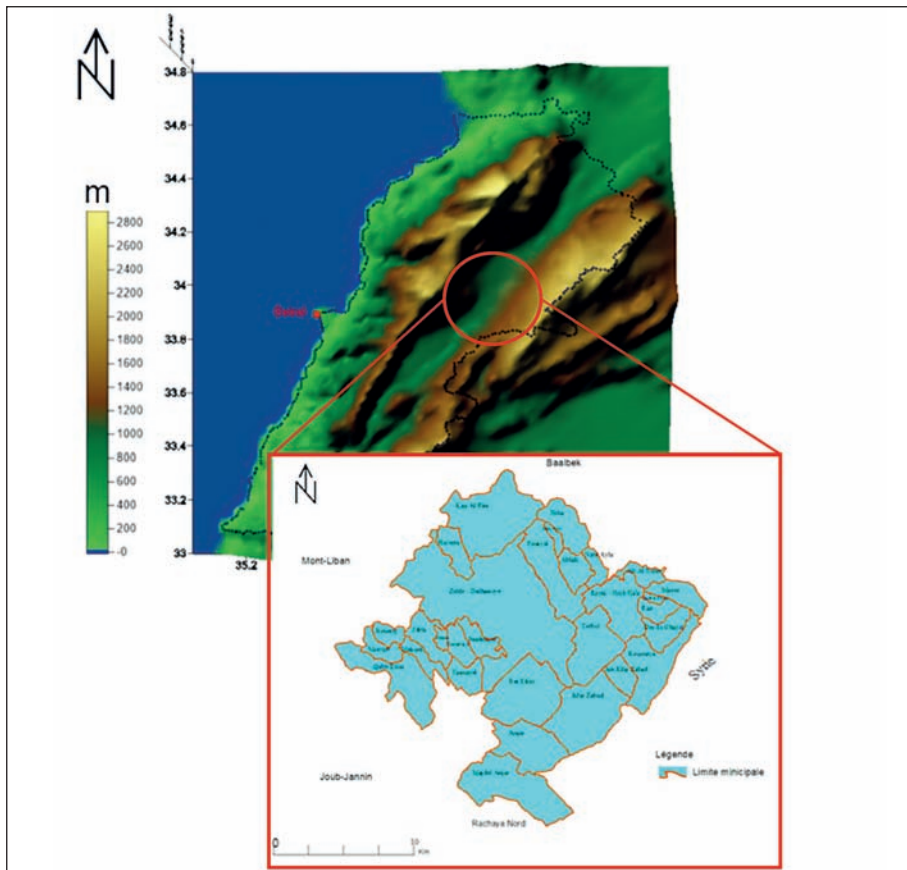


Figure 1- 1: La région d'étude



- **L'alimentation en eau** par l'eau superficielle traduit par le Litani le grand fleuve national pérenne et ses affluents (le Hala à Rayak, le Berdawni à Zahlé). La surface de son bassin versant couvre approximativement 20 % de la surface totale du territoire libanais dont 5% dans notre région d'étude. Son débit moyen est d'environ 700 millions m<sup>3</sup>/m. (Comair, 2008). Et par l'eau souterraine : Notre région d'étude est riche en eau souterraine. Elle comprend plusieurs aquifères contenant des sources émergentes; citons comme exemple, les sources du Berdawni qui jaillissent de l'aquifère cénomano-turonien (Hakim 1985).
- **L'agriculture.** C'est une activité importante dans la Béqaa. Les sols ont été cultivés intensivement pendant ces quatre dernières décennies. On y retrouve des exploitations potagères, fruitières ou encore viticoles.
- **Le facteur gouvernemental.** Il est traduit par les législations. Il existe plusieurs lois depuis l'époque ottomane qui sont encore utilisées jusqu'à nos jours. Les nouvelles lois, plus récentes sont très nombreuses et paraissent être en contradiction avec les anciennes législations ?

Alors, compte tenu du contexte physique et gouvernemental quelles sont les aspects de l'utilisation de l'eau pour l'irrigation dans notre région d'étude ? Quel type d'interaction trouvons-nous entre l'utilisation agricole de l'eau et les autres éléments du système de la GIRE dans cette région (Le climat, la piézométrie et les législations) (Kehdy, 2013)? Existe-t-il des problèmes d'interaction qui pourraient former un obstacle, et qui empêchaient une bonne GIRE d'irrigation?

Par conséquent, notre objectif principal sera d'expliquer les aspects de l'utilisation de l'eau pour l'irrigation dans notre région d'étude. Et d'analyser et de mettre en relation les principaux éléments constituant la structure du système de l'eau d'irrigation afin de reconnaître les problèmes auxquels il faudra faire face pour mettre en place une véritable GIRE d'irrigation et pour s'inscrire dans une démarche prospective.

Limités par le manque de données et ne pouvant traiter le problème à l'échelle du Liban, nous nous focaliserons de manière toute particulière sur la ressource en eau souterraine de la région de Zahlé (dans la plaine de la Béqaa). Cette zone d'étude représentant le cas extrême de l'usage de l'eau.

## **2- Méthodologie**

Cette partie vise à expliquer la manière de la mise en œuvre des aspects de l'utilisation de l'eau pour l'irrigation dans la région de la Béqaa Centrale, afin de les mettre en relation à travers une étude systémique. Cette méthodologie repose sur plusieurs étapes: Les enquêtes, le calcul de l'efficience, l'utilisation du limnigraphe, l'approche systémique, le logiciel « MICMAC », la formule de Turc, et les mesures des paliers de débit de courtes durées.

### **2-1- Enquête**

L'enquête, réalisée à travers un questionnaire, avait pour objectif de recueillir des données fiables sur l'irrigation : méthodes utilisées dans l'irrigation et les divers types de cultures. Cette enquête est inspirée d'un questionnaire utilisé au Canada en 2007. Il a été adapté au contexte agricole de notre région d'étude. Les modifications les plus importantes concernaient les types de culture. Nous avons considéré que le terrain agricole est la base de notre échantillonnage et non pas l'agriculteur parce que celui-ci peut être résidant dans notre région d'étude et dispose de propriétés en dehors de la zone d'étude. Le recensement des parcelles agricoles s'est fait à partir de données cadastrales et des images de Google Earth. Nous avons dénombré au total 445 unités.

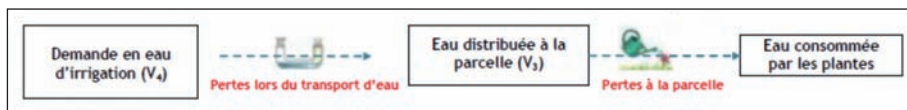
Le questionnaire était formé de trois parties :

- La première concernait les informations générales sur le type d'exploitation et la superficie totale des terrains cultivés. Ces deux indicateurs servant à déterminer les quantités d'eau utilisées pour l'irrigation et consommées par la végétation.

- La deuxième concernait les informations générales sur le type d'irrigation utilisé (Déplacement manuel, système fixe, rampe mobile sur roue, ...).
- La troisième portait sur les méthodes suivies pour la conservation de l'eau (collecte de l'eau, retenue pour limiter les gaspillages,...). Cette question avait le but de savoir si les agriculteurs appliquent une forme de gestion.

## 2-2- Calcul de l'efficience

L'efficience de l'eau d'irrigation est le produit de l'efficience des réseaux de transport et de distribution de l'eau d'irrigation par l'efficience à la parcelle (Al-Azmeh, 2001), :



*Figure 2-1: Le circuit de distribution-consommation de l'eau agricole  
(Source : Thivet, Blinda, 2009)*

Le calcul de l'efficience de l'eau d'irrigation se fait par la formule suivante :

$$E_{irr} = E1 \times E2$$

Avec

- $E_{irr}$  : efficience de l'eau par l'irrigation
- $E1$ : efficience des réseaux de transports et de distribution de l'eau d'irrigation, en amont des parcelles agricoles, mesurée comme le rapport entre le volume d'eau effectivement distribué aux parcelles ( $V3$ ) et le volume d'eau total alloué à l'irrigation ( $V4$ ) (demande en eau d'irrigation), incluant les pertes dans les réseaux (Figure 2-1)

$$E1 = V3/V4$$

- E2 : efficacité de l'irrigation à la parcelle définie comme la somme des efficacités (à la parcelle) de chaque mode d'irrigation (irrigation de surface, irrigation par aspersion, micro irrigation, autres modes d'irrigation), pondérée par les proportions respectives des différents modes et estimée comme le rapport entre les quantités d'eau effectivement consommées par les plantes et les quantités d'eau apportées à la parcelle.

$$E2 = \frac{\sum_1^n S_m \times E_m}{S}$$

Avec

- n : nombre de modes d'irrigation utilisés
- $S_m$  : surface irriguée par le mode m
- $E_m$  : efficacité du mode m
- S : surface totale irriguée selon l'ensemble des modes

Le temps de calcul par parcelle étant relativement long (calcul de surface pour chaque type d'irrigation, estimation du volume d'eau distribué à partir de campagnes de pompage d'une durée de 12 h/jours,...), les efficacités ont été calculées pour 10 parcelles. Celles-ci ont été choisies en fonction de la diversité de leur culture et de leur période d'irrigation.

### 2-3- Limmigraphe

En raison de l'absence de données, nous avons été amenés à lancer une campagne de relevés de niveaux piézométriques dans les terrains agricoles dans notre région d'étude. Ne disposant pas d'appareils de mesures, il a fallu concevoir un piézomètre peu coûteux. Le dispositif a été validé au laboratoire EDYTEM (Université de Savoie, France).

L'importance de cet appareil est qu'il peut mesurer les variations par seconde et par cm contrairement à certains appareils, parfois plus

sophistiqués qui envoient des ondes lasers au pas de la minute au minimum et qui ne peuvent pas résoudre le problème de la torsion de certains puits<sup>(1)</sup>. Les mesures ont été effectuées durant 16 mois : du 1er février 2011 au 1er juin 2012. Soit un an complet + 4 mois communs entre les deux années de mesures pour comparer les variations du niveau à période équivalente.

Deux puits de mesure ont été implantés dans la zone alluviale (zone où l'on retrouve 95% des puits de la région): l'un inutilisé et considéré comme un puits de référence et l'autre un puits à utilisation agricole. Ce nombre limité est lié aux coûts des piézomètres.

## **2-4- Approche systémique**

L'approche systémique n'est pas une science, théorie ou discipline. C'est une méthodologie permettant de rassembler et d'organiser les connaissances en vue d'une plus grande efficacité de l'action. Cette approche englobe la totalité des éléments du système étudié et s'attache à leurs interactions et interdépendances. Alors l'approche systémique est en même temps ouverte en entretenant avec l'environnement des échanges d'énergie, de matière et d'information et complexe du fait d'une grande variété de composants ou d'éléments et de liaisons qui le constituent. (Source : CHARNAY, 2010)

La gestion de l'eau et de ses usages s'inscrit effectivement dans un système complexe d'influences et de relations économiques, sociales, culturelles et politiques. Cette complexité se manifeste dans les relations des paramètres de la gestion de l'eau qui existent à des échelles spatio-temporelles différentes (logique hydrologique amont-aval, effets « retardés » de pollution des eaux souterraines...). La gestion des ressources en eau s'organise en fonction des ressources en eau disponibles, des besoins des usagers à satisfaire, ainsi que du niveau d'aménagement du territoire déterminant à la fois les usages

---

(1) Certains puits ne sont pas droits mais plutôt inclinés à cause du manque de professionnalisme et des puisatiers. Alors, compte tenu de ce problème de verticalité, l'onde transmise ne touche pas directement la surface de l'eau, mais le bord du puits et cela pourrait biaiser les résultats.

et la capacité d'exploitation des ressources disponibles. (Source : CHARNAY, 2010)

le système « gestion de l'eau » est également influencé par plusieurs facteurs (topographiques, géologiques, climatologiques, le contexte socio-économique, l'environnement culturel, le cadre politique et législatif...). Ces facteurs pourront être également les mêmes qui influencent la gestion intégrée en eau dans notre région d'étude, alors il est important de réaliser une telle approche systémique pour faire figurer le système de GIRE dans cette région et établir l'interaction entre ces facteurs.

### **2-5- Logiciel « MICMAC »**

Appliquée à la matrice structurelle, le logiciel « MICMAC » offre la possibilité de décrire un système à l'aide de deux genres de matrice à double entrée appelé matrice d'analyse structurelle (GODET, 2001). Par la suite, il aide à mettre en relation tous les éléments constitutifs de ce système.

Compte tenu que le logiciel est limité à 3 niveaux, nous avons divisé notre matrice en 3 groupes d'influence, (Tableau 6-1) :

- Influence faible si le nombre est égal à 1 et 2.
- Influence moyenne si le nombre est égal à 3, 4 et 5.
- Influence forte si le nombre est au-delà de 6.

### **2-6- Formule de Turc**

Cette formule est utilisée pour calculer l'ETP surtout que les moyennes de la radiation solaire globale ont été disponibles (Cosandey, 2000):

$$\text{ETP} = k \left( \frac{T}{T+15} \right) \cdot (R_g + 50) \text{ (mm/mois)}$$

Tel que :

T: température mensuelle moyenne en °C

R<sub>g</sub>: radiation solaire globale

k= 0,37 pour février

et

0,40 pour les autres mois.

## 2-7- Paliers de débit de courtes durées

Cette mesure sert à connaître la productivité du puits agricole permettant de tracer la courbe de rabattement/débit. Les paliers ont été effectués à débit constant, et pour des pas de temps de 1 à 3 heures. Le palier mesure 2 données : le rabattement en m, mesuré en fin du palier, et le débit constant, en m<sup>3</sup>/h.

Chaque palier est suivi d'un arrêt de pompage d'une durée égale à la durée du palier, permettant la remonté du niveau d'eau et, par la suite, la mesure du rabattement résiduel. Le débit initial pompé doit être égal à celui de la puissance minimum de la pompe. Ensuite ce débit croit selon une progression de 2, 3 et 4. (Castany, 1982).

Notre choix s'était porté sur un puits agricole utilisé pour irriguer un terrain de pomme de terre. 6 campagnes de mesures ont eu lieu au début de chaque saison, de l'hiver 2011 jusqu'au printemps 2012. Ces mesures ont été réalisées grâce à l'aide d'un spécialiste qui dispose d'une pompe puissante à grande capacité.

Le couple de données de chaque palier de débit constant en m<sup>3</sup>/h et de rabattement résiduel en m, est porté sur Excel. Les points obtenus tracent la courbe débits/rabattements ou courbe caractéristique. Sa forme apporte des informations sur le comportement hydrodynamique du complexe niveau piézométrique/prélèvement. La courbe débits/rabattements présente deux parties distinctes par le point critique «A», correspondant en abscisse au débit critique et en ordonnée au rabattement maximum. La place du point «A» est déterminée par l'augmentation de la pente de la courbe. Le débit critique désigne le débit qu'il ne faut pas dépasser durant le pompage. Dans un tel cas, l'eau prélevée, boueuse, indique que le forage pompe les quantités résiduelles se trouvant au fond de l'aquifère. Pour ne pas arriver à cet extrême, les exploiters doivent respecter un débit qui est égale à -10% du débit critique. Ce débit est appelé « le débit maximum à pomper » (Figure 2-2).

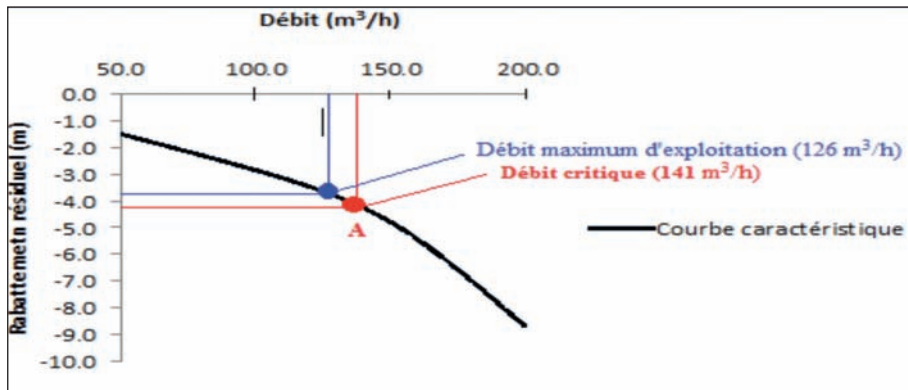


Figure 2-2: La courbe débits/rabattements des puits alluviaux dans la région d'étude

Pour réaliser cette courbe, nous avons calculé la moyenne des rabattements résiduels dans chacun des deux puits expérimentés. Nous avons ensuite calculé la moyenne des résultats obtenues. Les données obtenues ont été représentées graphiquement.

### 3- Résultats

#### 3-1- Usage agricole

Selon les résultats des questionnaires, la surface totale privée pour l'agriculture dans notre région d'étude est égale à 24200 hectares sur un total de 28150 hectares environ. La surface cultivée est égale à 22200 hectares. Ainsi, 14430 hectares soit 65% de la surface cultivée est irriguée et se trouve dans la zone alluviale.

En se basant sur les résultats obtenus par le questionnaire, nous avons pu préciser les facteurs affectant l'usage agricole de l'eau:

##### 3-1-1- Ressources en eau

La ressource principale de l'eau d'irrigation dans notre région est l'eau souterraine provenant des puits. Le nombre des puits forés est d'environ 390 (soit de 0.9 puits/terrain) dont 310 sont dans la zone alluviale irriguée. Ce rapport reflète l'état de l'énorme pression sur les eaux souterraines.



### 3-1-2- Techniques d'irrigation

Les puits sont forés au milieu des terrains agricoles et l'eau pompée est transportée soit par des canaux à ciel ouvert, soit par des canalisations souterraines. D'après l'analyse des questionnaires, nous avons pu relever un gaspillage dû au transport, au mode d'irrigation,...

#### *a-Pertes dues au transport*

Les fuites d'eau, durant leur transport, diminuent l'efficacité. Le résultat de nos calculs a montré que la moyenne de l'efficacité était de 35%. Cette valeur serait inférieure de 11% à la moyenne générale estimée à 46% au Liban (Blinda et al., 2009).

#### *b-Perte d'eau liée au type d'irrigation*

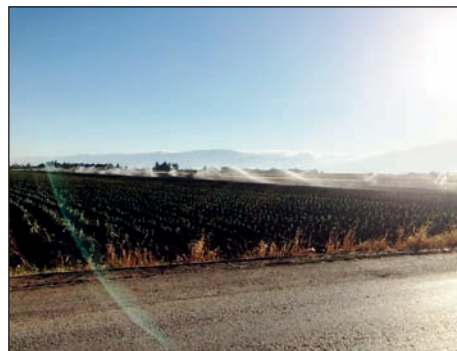
Trois principales méthodes d'irrigations sont utilisées dans le Caza de Zahlé:

L'irrigation par les canaux : Elle cause la perte de l'eau, tout le long du canal, par évaporation. Cette méthode est appliquée dans 15% des terrains agricoles dans notre région d'étude, (Photo 3-1).



*Photo 3-1: L'irrigation par les canaux ; on remarque l'eau excédent du canal d'irrigation, ce qui est un signe de gaspillage*

La deuxième est l'irrigation par aspersion. Elle est utilisée dans 75% des terrains agricoles. Bien qu'économique, son inconvénient majeur est encore la perte d'eau par évaporation, (Photo 3-2).



*Photo 3-2 : L'irrigation par aspersion*

La dernière est l'irrigation par goutte-à-goutte. Appliquée seulement dans 10% des terrains, c'est la méthode la plus adaptée à ce contexte climatique. Nous aurions pu supposer que cette technique était appliquée par souci environnemental. La réalité est toute autre ; les questionnaires ont montré qu'en raison du tarissement des puits, les agriculteurs se sont vus forcés d'appliquer le système du goutte-à-goutte, (Photo 3-3).



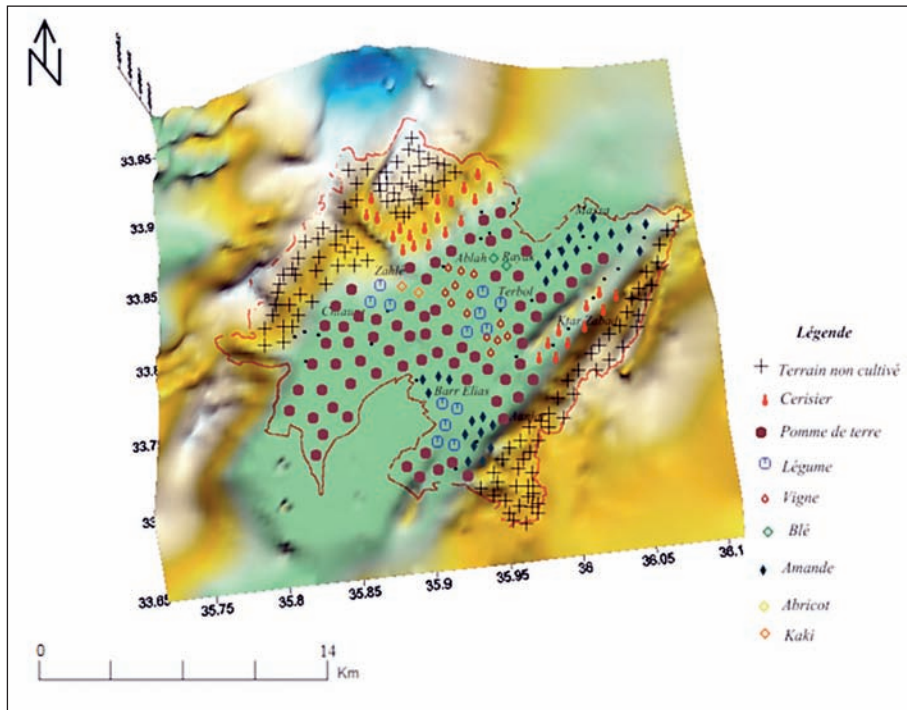
*Photo 3-3: L'irrigation par goutte-à-goutte*

### *c-Espèces cultivées*

On pourrait rajouter un dernier facteur défavorable à la bonne gestion : le type de culture. En effet, les espèces plantées sont fortement consommatrices d'eau.

L'exemple de la pomme de terre est le plus significatif. Elle constitue 65% de la production de la région. Le blé (20%) est irrigué par aspersion notamment en début de la saison estivale. Le reste, comme les légumes ou la vigne (15 % de la production), ne constitue pas des menaces réelles pour la ressource en eau. Les potagers sont irrigués au goutte-à-goutte et la vigne, bien qu'irriguée par des canaux, ne constitue que 4 % de l'activité agricole.

En ce qui concerne les deux contreforts du Mont-Liban et de l'Anti-Liban, les agriculteurs ont transformé leurs versants en des terrasses plantées essentiellement de cerisiers qui ne nécessitent pas d'irrigation. Cette espèce constitue 5% de la surface agricole totale de notre région d'étude, (figure 3-1).



*Figure 3-1: L'occupation du sol dans notre région d'étude*

L'efficacité assez faible, les méthodes d'irrigations utilisées par les agriculteurs non conscients et les espèces végétales consommant des grandes quantités d'eau sont considérées comme des grands indicateurs sur le gaspillage de l'eau dans le secteur agricole.

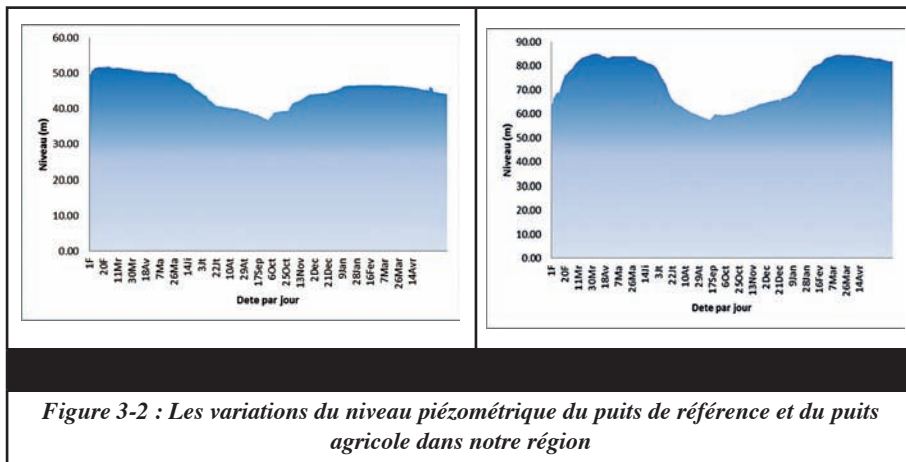
### 3-2-Niveau piézométrique :

Le niveau piézométrique des nappes libres dans les terrains agricoles de notre région dépend principalement de l'infiltration qui est conditionnée par :

- La topographie représentée par les pentes raides des versants est du Mont-Liban et des versants ouest de l'Anti-Liban zone d'étude. Ces pentes favorisent le ruissellement et diminuent l'infiltration

- L'hydrologie représentée par le bassin versant du fleuve Litani qui connaît un régime intermittent dans notre région d'étude, zone dans laquelle l'eau souterraine est fortement exploitée.
- La pédologie représentée par la texture qui montre que 50% environ des sols couvrant notre région sont totalement argileux. Et par la structure qui indique l'absence des fissures qui facilitent l'infiltration de l'eau vers les couches souterraines. Donc, ces sols sont mal ou moyennement drainés.

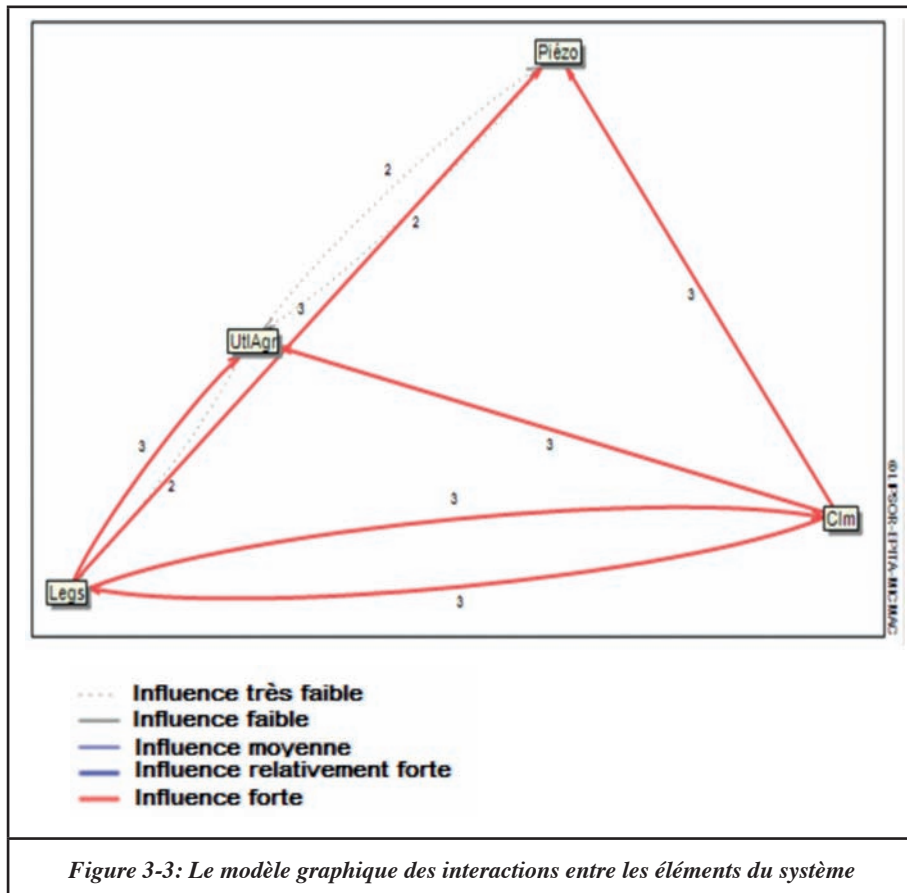
L'observation des courbes de la figure 3-2, nous a permis de présenter les variations du niveau piézométrique du puits de référence et du puits agricole dans notre région.



Le puits de référence a accusé la valeur de chute la plus faible. Elle est de l'ordre de 0.5 m; ce qui n'est pas très significatif. Tandis que le puits agricole a connu une diminution de niveau de 1.6 m (64.82 m le 1 février 2011 et 63.22 m le 1 février 2012). Cette diminution peut être un autre indice sur la pression exercée par les agriculteurs sur les ressources en eau souterraines apparemment liée aux méthodes d'irrigation.

### 3-3-Fonctionnement du système

Grâce au modèle systémique, il a été possible d'analyser le fonctionnement du système en identifiant sur le graphique obtenu le réseau des interactions entre les éléments du système.



Ce réseau (figure 3-3) montre que les législations, les institutions, le climat et la piézométrie influencent fortement l'utilisation agricole de l'eau. Tandis que l'utilisation agricole influence, en majorité, faiblement ces éléments.

### 3-3-1- Législation

Notre analyse a démontré que l'utilisation agricole de l'eau souffrait d'absence de lois adéquates, ou de négligence dans leur application. Pourtant, la publication d'une bonne législation pourrait contribuer à conserver la quantité de l'eau souterraine utilisée pour l'irrigation. Ces lois pourraient aider à la mise en place d'une bonne gestion de l'eau au niveau d'irrigation.

### 3-3-2- Climat

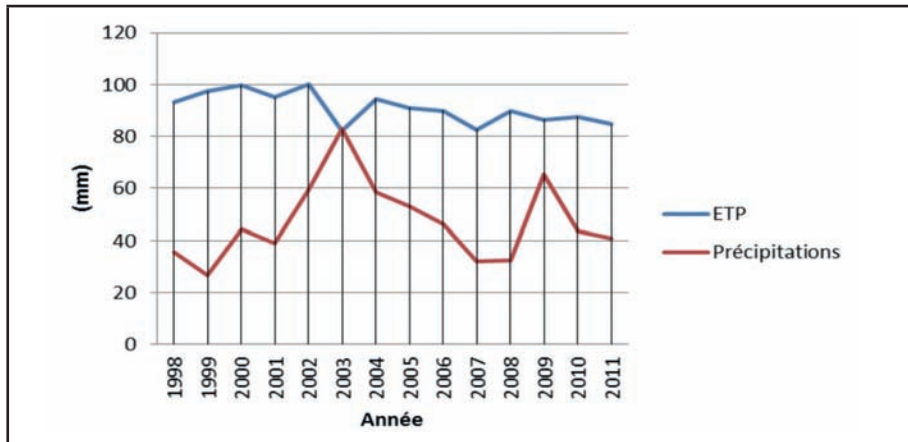


Figure 3-4: L'évaluation de l'ETP et les moyenne de précipitation durant les années 1998 – 2011

Certains éléments du climat peuvent constituer des facteurs limitant la production agricole. L'élément le plus important est l'évapotranspiration.

Selon la formule de Turc, la comparaison annuelle entre l'ETP et les précipitations montre que quelle que soit l'année, la région est en déficit pluviométrique dénotant un besoin continu d'irrigation. Parce que les moyennes annuelles de précipitations pour les années 1998 - 2011 est toujours inférieur à celle de l'ETP (Figure 3-4).

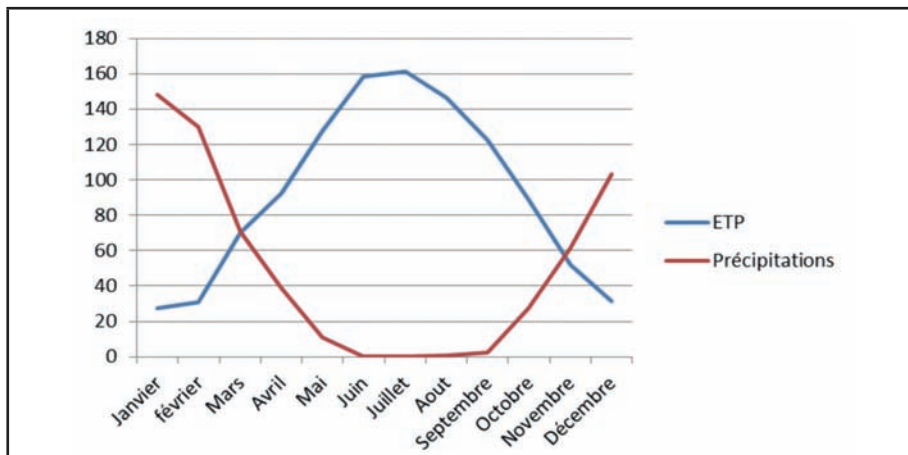


Figure 3- 5: Comparaison entre les moyennes mensuelles de l'ETP et des précipitations durant les années 1998 – 2011

Les résultats de la comparaison mensuelle encore montrent que les mois de sécheresse débutent en mars où la moyenne de l'ETP devient plus grande que celle de la précipitation (Figure 3-5).

### **3-3-3- Piézométrie**

L'analyse de l'influence de la piézométrie sur l'irrigation a pu être faite grâce à l'observation de l'évolution de la productivité(1) du puits agricole tout au long des saisons. Leur variation peut influencer la quantité de l'eau qui peut être pompée et utilisée.

Le rabattement varie selon les saisons ; Il atteint son niveau minimum au début du printemps (10.8 m). Par contre il atteint son niveau maximum au début de l'automne (11.1 m). L'influence des saisons peut être aggravée par la pression exercée par les agriculteurs sur l'eau souterraine.

Le débit maximum à exploiter du puits agricole est de 126 m<sup>3</sup>/h correspondant à environ 5h de pompage par jour moyen chez les exploitants de notre zone d'étude. Le débit critique est de 141 m<sup>3</sup>/h qui correspondent à 4.1 m de rabattement. Dans notre région, l'agriculteur pompe de l'eau pendant 12h par jour. Cela explique le grand nombre de puits qui tarissent. Par conséquent, les agriculteurs sont poussés à forer des nouveaux puits ou bien à approfondir les puits existants.

## **4- Discussion et conclusion**

La GIRE d'irrigation nécessite des approches multiples : elles sont d'ordre législatif, physique et anthropique. La mise en place d'une telle démarche ne peut qu'améliorer une situation qui se dégrade de jour en jour. Aussi, adopter une gestion pertinente de l'eau doit pouvoir répondre aux besoins d'irrigation tout en préservant cette ressource à long terme.

Une telle démarche doit, par conséquent, s'intégrer dans une approche globale car il s'agit de comprendre toutes les dimensions liées à l'eau

---

(1) La productivité d'un puits (Pr) est le débit maximum qui peut être pompé pendant une durée définie sans dépasser le débit critique (Qc), ni le rabattement critique (Sc) (Source : CASTANY Gilbert, 1982). Ce débit est évalué par l'interprétation de la courbe débits/rabtements obtenu par les mesures des paliers de débits de courtes durées

qu'elles soient physiques, humaines, ou législatives. Ce sujet, complexe, doit tenir compte des différentes spécificités de chaque aspect de l'eau et de leur interaction. C'est ce que nous avons tenté de défricher dans le cadre de cette étude : aborder l'eau d'irrigation dans sa dimension systémique. Compte tenu des difficultés à acquérir les données dans un pays comme le Liban, nous nous sommes contentés, dans un premier temps d'analyser la structure du système eau d'irrigation dans ce pays du levant, en prenant comme cas d'étude, une région vulnérable à la raréfaction de la ressource hydrique : le Caza de Zahlé.

Les premiers résultats obtenus sont alarmants : le niveau de l'eau semble baisser, le nombre de puits à utilisation agricole est important laissant peser sur la ressource une pression croissante, les lois floues et contradictoires n'ont aucun impact sur le terrain. Pour faire face à ces problèmes majeurs, les autorités locales se sont substituées au pouvoir central.

La mise en place d'une bonne GIRE d'irrigation est loin d'être facile à réaliser. Les raisons sont multiples car elles combinent des facteurs globaux (changement climatiques) et nationaux (législations).

Le point fort de cette étude réside dans la méthodologie qui a été développée, dans le contexte libanais, pour appréhender la structure du système : enquêtes des agriculteurs, des appareils mesurant les variations du niveau piézométrique de la région, utilisation de certains modèles mettant en lumière les interactions et la mise au point de méthodes expérimentales pour illustrer ces interactions. Cette approche systémique, nous a permis de déduire les éléments les plus influençant et les plus dépendants. Finalement, cette méthodologie peut-elle être appliquée à d'autres régions libanaises ? Les résultats obtenus sont alarmants, sont-ils réellement représentatifs de ceux de l'ensemble du territoire ? Voilà des questions qui devraient nous pousser à appréhender l'eau à l'échelle du Liban. Cet objectif est incontournable au vu de nos résultats

Mettre en place une gestion intégrée de l'eau d'irrigation qui tienne compte de tous ses aspects est une voie qu'il s'agit d'adopter si l'on souhaite une planification sur le long terme afin que le Liban garde sa plus précieuse richesse : l'eau.



## Références bibliographique

1. Al-Azmeh H., (2001). Water use efficiency and economic approach, Plan Bleu, UNEP/MAP Regional Activity Centre, 32 p.
2. Castany G., (1982). Hydrogéologie principes et méthodes, DUNOD, Bordas Paris, 238 p.
3. Charnay B., (2010). Pour une gestion intégrée des ressources en eau sur un territoire de montagne. Le cas du bassin versant du Giffre (Haute-Savoie), Thèse de Doctorat de Géographie présentée à l'Université de Savoie (E.D. SISEO), 504 p.
4. Comair F., 2008 : Gestion intégrée des ressources en eau au Liban, efficience d'utilisation de l'eau réunion d'experts, 44 p.
5. Cosanday C., (2000). Hydrologie continentale, Armand Colin/ HER, Paris, 360 p.
- 6 Godet M., (2001). Manuel de prospective stratégique, Dunod, Paris, 412 p.
- 7 Hakim B., 1985 : Recherches hydrologiques et hydrochimiques sur quelques Karsts méditerranéens, Liban, Syrie et Maroc, publications de l'université Libanaise, Beyrouth, 701 p.
8. GWP, 2000: Integrated water resources management. (TAC background paper; no. 4), Stockholm, Sweden, Global Water Partnership. 67 p.
9. Kehdy N., (2013). La gestion intégrée quantitative de la ressource en eau souterraine, cas du Caza de Zahlé. Thèse de Doctorat, Université Saint Joseph, Beirut.
10. Thivet G., Blinda M., 2009 : Stratégie méditerranéenne pour le développement durable, efficience d'utilisation de l'eau, rapport de synthèse, plan bleu centre d'activités régionales, Sophia Antipolis, 56 pages.s

# **Approche géologique de l'aquifère karstique Hadath-Hazmiyé (Beyrouth, Liban) en vue de limiter l'intrusion saline par une recharge artificielle**

*Ahmad El-Hajj<sup>(1)(2)</sup>, Michel Bakalowicz<sup>(1)(2)</sup>,  
Edouard Pesquet-Ardisson<sup>(2)</sup>, Fatima Diab<sup>(3)</sup>*

## **Résumé**

La recharge artificielle peut être envisagée pour limiter l'intrusion d'eaux salées dans un aquifère côtier. Lorsqu'il s'agit d'aquifères karstiques, ceux-ci présentent des caractéristiques qui imposent une connaissance de leur structure et de leur fonctionnement pour une gestion optimale. Une grande partie des ressources en eaux souterraines au Liban sont réparties dans des aquifères karstiques. La proximité de la mer Méditerranée occasionne souvent des intrusions salines dans ces aquifères côtiers.

C'est dans le cadre d'une demande du centre de recherche sur l'eau et l'environnement (CREEN, Beyrouth, Liban) et en coopération avec Schlumberger Water que cette recherche a été réalisée. L'objectif étant de proposer une approche géologique et hydrogéologique de l'aquifère karstique d'Hadath-Hazmiyé en vue de limiter l'intrusion saline par un recharge artificielle.

## **Mots-clés**

Intrusion saline, recharge artificielle, karst, Liban.

---

(1) CREEN, Université Saint-Joseph, Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Beyrouth

(2) HydroSciences Montpellier, Université Montpellier II

(3) Faculté des Beaux Arts, Université Libanaise.

## **Abstract**

Artificial recharge can be considered to limit the intrusion of seawater in coastal aquifer. Karstic aquifers have special characteristics that require knowledge of their structure and function for their optimal management. Most of the underground water resources in Lebanon are located in karstic aquifers. The proximity of the Mediterranean Sea often causes seawater intrusion in coastal aquifers.

It is in the context, a request from CREEN (Beirut, Lebanon) and in cooperation with Schlumberger Water, this research was conducted. The objective is to provide a geological and hydrogeological approach for the karstic aquifer of Hadath-Hazmié to minimize seawater intrusion by artificial recharge.

## **Keywords**

Seawater intrusion, artificial recharge, karst, Lebanon.

## **Introduction**

L'objectif d'étude étant de justifier l'utilité d'une recharge artificielle en milieu karstique pour contenir l'intrusion d'eau saline et d'accroître l'exploitation de cet aquifère.

Le Liban offre par ses caractéristiques géologiques un terrain favorable à cette étude. Par ailleurs les besoins en eau dans cette région méditerranéenne ne cessent de croître et la surexploitation par pompage accentue la contamination de l'aquifère karstique côtier par de l'eau saline.

Jusqu'à présent, dans le monde, aucun site scientifique d'expérimentation de réalimentation artificielle dans le karst n'est répertorié. Cependant le Liban a déjà « rechargé » artificiellement et recharge encore aujourd'hui l'aquifère karstique de Hadath-Hazmiyé. Des études ont été effectuées dans ce but et un bilan de cette recharge.

Ces études ont abordés cette problématique sous un aspect expérimental et ne tenant peu compte de la structure même de l'aquifère.

Cette étude consiste donc à réunir les informations disponibles sur cet aquifère, proposer une analyse géologique et hydrogéologique de la région et souligner des éventuels axes de recherche.

## 1- Généralités

### • *Localisation*

Le site d'étude se trouve dans la banlieue sud de Beyrouth dans la zone dite Hadath-Hazmiyé. Cette zone est limitée au Nord par la ville même de Beyrouth, à l'Est par le fleuve Nahr Beyrouth, à l'Ouest par la mer Méditerranée et au sud par Choueifate. Ces zones sont résidentielles et assez densément peuplé, ayant connu de surcroît une urbanisation rapide.

L'aquifère céno-mano-turonien de Hadath-Hazmiyé constitue donc une ressource en eau indispensable pour cette banlieue de Beyrouth.

### • *Les travaux déjà réalisés sur l'aquifère Hadath-Hazmiyé*

Une étude a été effectuée par un bureau d'étude en 1996, son rapport comprenait une synthèse des rapports déjà réalisés complété par un programme d'études sur plusieurs années. Actuellement les résultats de ce programme ne sont pas connus.

Les deux études majeures sur ce site sont donc :

- Le projet d'étude des eaux souterraines au Liban, un co-projet Nations Unies/ Gouvernement libanais (1968-70). Le programme d'exécution comprenait une série de cinq forages d'exploitation le long du contact Céno-mano-Quaternaire, des essais de pompages de longue durée pour chaque forage simultanément et un réseau de piézomètres permettant de mesurer l'évolution des niveaux piézométriques de la nappe et de connaître l'évolution des teneurs en sels dissous.
- Des études géophysiques par des compagnies hongroises et yougoslaves (1968-72) mettant en évidence l'intrusion saline.

A noter la simulation de l'aquifère par un modèle mathématique à

trois dimensions en 1972 avec la collaboration des Nations Unies et le Centre National de Recherche Scientifique Libanais.

- *Méthodes et outils utilisés*

Au préalable une étude géophysique était prévue afin de déterminer le développement du karst et le volume de ces ressources en eau (Résonance magnétique protonique), cependant cette technique analyse des réponses de l'ordre de 10<sup>-9</sup> volts. La proximité de Beyrouth occasionne un bruit de fond trop important et rend cette technique inapplicable.

La deuxième méthode envisagée consiste à effectuer une analyse microstructurale<sup>(1)</sup> afin de caractériser précisément l'aquifère calcaire

---

(1) L'analyse microstructurale

Principe.

Le système karstique est assez complexe à modéliser depuis la surface. Il existe pour cela un outil puissant qui est l'analyse des tectoglyphes. A partir de la distribution spatiale des discontinuités en surface on peut déterminer les zones favorables aux écoulements souterrains. La « porosité » d'un aquifère karstique est déterminé par les fractures et fissures qui le composent. Ces études microstructurales sont basées sur deux approches:

- Le réseau de discontinuité stratigraphique et tectonique favorise la pénétration et la circulation de l'eau dans les aquifères fissurés (Drogue).

- Les fractures ouvertes interconnectées permettent le passage de l'eau (Eraso).

Ce qui implique que l'on ne considère que l'écoulement souterrain utilise uniquement tous les plans en distension (Arthaud et Choukr oune 1972) .

Méthode.

C'est donc les plans en distension dont les directions vont nous donner les directions principales maximales et moyenne ( $\sigma_1$  et  $\sigma_2$ ) et sont perpendiculaires à la direction principale minimale  $\sigma_3$ . Eraso considère que c'est la direction du gradient hydraulique par rapport à la direction dominante du plan de drainage qui va déterminer la structure du réseau de conduits. Ainsi selon si les directions sont plutôt parallèles le système karstique sera linéaire et allongé. Au contraire si les deux directions sont perpendiculaires, le réseau de drainage sera plus complexe et le système compact.

Sur le terrain on va donc rechercher :

- Les microfailles,
- Les fentes de traction ou veines.
- Les joints stylolithiques

Il a été démontré empiriquement que les veines appartiennent le plus souvent au plan ( $\sigma_1$ - $\sigma_2$ ), on regarde ensuite l'agencement de ces veines par rapport aux autres tectoglyphes ce qui permet d'établir les positions relatives des 3 directions principales de déformation. Il semble cependant nécessaire d'effectuer beaucoup de mesures, celles-ci devant être bien réparties spatialement.

karstifié. Cette méthode nécessite la présence sur le terrain d'une quantité suffisante de tectoglyphes. Une analyse géologique du site et de son environnement ont été réalisés. L'étude a donc été naturellement axée sur une approche plus théorique des caractéristiques de cet aquifère.

Parallèlement des prélèvements et des analyses d'échantillon d'eau provenant de forage sur le site ont été effectués, afin d'avoir une estimation récente de l'intrusion saline.

## **2- Contexte géologique et géomorphologique**

- **La géologie libanaise**

**L'histoire géologique du Liban peut se décomposer en cinq phases majeures :**

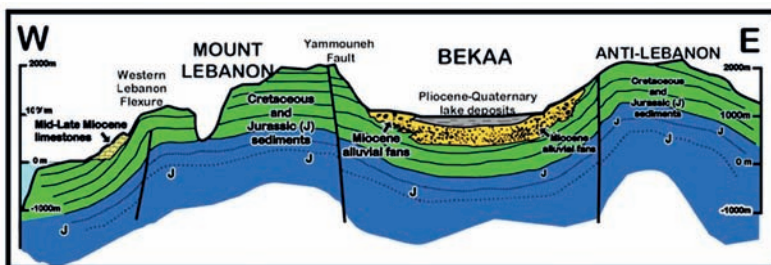
- 1) *La fin du Permien jusqu'au Trias supérieur (250-200 Ma)*: correspondant au premier épisode de rifting. Bien qu'il n'y ait pas de roches datant de cette époque au Liban, les pays environnants nous fournissent des éléments permettant de comprendre cette période. Durant le Permien le niveau des eaux était relativement élevé, la baisse du niveau marin commençant au Trias. Durant cette période vont se déposer des évaporites et des calcaires. Le supercontinent Gondwana va commencer à se « morceler » avec la formation de rifts. Cela va se poursuivre jusqu'au Crétacé moyen.
- 2) *Le Jurassique inférieur à supérieur (200-150 Ma)*: La plupart de la séquence du Jurassique est très épaisse au Liban. On la retrouve surtout au Mont Liban (au Nord de la route pour Damas), au Chouf et au Jebel Barouk et au centre et sud de l'Anti-Liban. Le Jurassique semble avoir été une période de stabilité tectonique au Liban durant laquelle se sont déposés ces calcaires marins. Cependant le niveau de la mer a monté durant le Jurassique inférieur et moyen, les calcaires ont alors progressivement évolué vers des mudstones et des sandstones avec des récifs coralliens.
- 3) *Le Jurassique supérieur au Crétacé moyen (150-100 Ma)*: Période de surrection, d'éruptions volcaniques et de formation de deltas. Au début du Jurassique supérieur une nouvelle phase tectonique a lieu

dans la région. On assiste à une période d'éruptions basaltiques. Ce tectonisme est certainement contemporain de celui observé en Afrique et au sud de la péninsule arabique.

Durant le Crétacé inférieur le Liban était couvert par des marécages, des rivières et des deltas qui sont à l'origine d'une grande séquence de sable et d'argile de plus de 500 mètres d'épaisseur. Durant la dernière partie du Crétacé inférieur le niveau des eaux commencèrent à monter et les incursions marines sont devenues plus importantes.

- 4) *Crétacé supérieur, Eocène supérieur (10050 Ma)*: Au Crétacé supérieur on assiste à un changement de tectonique : l'Eurasie et la plaque Arabo-Africaine se rapproche et induisent la fermeture de l'océan Téthys. S'en suit une compression dont résulte un premier soulèvement du Mont Liban et de l'Anti-Liban. Parallèlement cette période est celle d'un niveau marin très élevé qui a contribué à déposer les épaisses séquences de calcaire et de craie.
- 5) *Eocène moyen à l'actuel (50-0 Ma)*: Ces cinquante derniers millions d'année représentent un changement important dans cette zone. La collision entre les plaques se poursuit et s'intensifie, la surrection induit un plissement NNE-SSW. Le Mont Liban et l'Anti-Liban (anticlinaux orientés NNE-SSW) sont séparés par le synclinal de la Bekaa.

### *Coupe schématique Est-ouest du Liban.*



Le niveau de la mer redescend, « libère » la plaine de la Bekaa et se limite à des incursions marines de faible profondeur le long du rivage actuel.

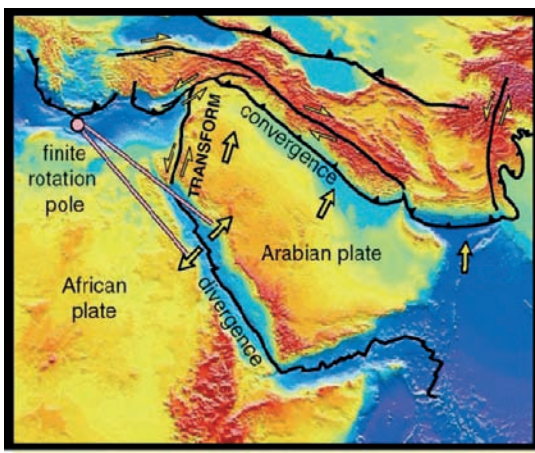
La crise du Messinien<sup>(1)</sup> va, comme pour toutes les régions méditerranéennes, profondément changer la géomorphologie : Du fait de la chute brutale du niveau de la mer les rivières vont entailler plus profondément les formations géologiques.

La fin du Cénozoïque correspond aussi à des changements importants de température (en diminution), les conditions climatiques sont en général plus froides et humides durant le Pléistocène.

### • Tectonique

A l'Eocène (50 Ma) la plaque Arabo-Africaine commençait juste à entrer en collision avec l'Eurasie. Il en résulte la faille transformante de la mer Morte (Dead Sea Transform : DST) qui s'étend de la mer Rouge au Zagros. Cette DST apparaît plus complexe au Nord et particulièrement au Liban où celle-ci se divise en plusieurs autres failles généralement orientées N-S ou NNE-SSW.

#### *Contexte tectonique régional.*



#### (1) La crise du Messinien

Il y a 5 millions d'années la Méditerranée a enregistré une chute importante du niveau marin (début 5.8 Ma et s'achève à 5.32 Ma) ; correspondant à une fermeture des détroits. L'isolement de la Méditerranée a entraîné son assèchement, les apports des fleuves ne compensant pas cette perte par évaporation. Les canyons fournissent la preuve que le niveau marin était 1500 m sous le niveau actuel de la Méditerranée.



Une seule cependant traverse la presque totalité du territoire libanais: La faille de Yamouneh. Elle est aussi la plus continue (Garfunkel et al. 1981).

La portion Sud de la faille de Yamouneh se situe sur le flanc Est du Jabel Barouk (formant le bord Est du Sud de la vallée de la Békaa). Au Nord la faille de Yamouneh rejoint la faille Est Anatolienne (Joffe & Garfunkel 1987).

La région de Beyrouth est quant à elle affectée par la faille de Roum qui diverge de la partie Sud (près de la Vallée de Hula) et se poursuit au Nord jusque dans la vallée de Damour et peut-être jusqu'à Beyrouth même (Dubertret 1955).

Durant les cinq dernier millions d'années un soulèvement local et un plongement continu est observé (en témoigne la séismicité).

- **Géologie et stratigraphie de la région de Beyrouth**

Les roches du Liban sont pratiquement toutes des roches sédimentaires avec une majorité de calcaire. On observe peu de variation dans ceux-ci, les séquences les plus variées dans les sédiments étant celles qui s'étendent du Jurassique supérieur au Crétacé moyen. Les plus vieilles roches observées en surface sont du Jurassique (~ 200 Ma).

Dans la région de Beyrouth on observe:

***Jurassique :***

C'est principalement les 500 mètres supérieurs du Jurassique composé de calcaires que l'on observe ici avec au sommet des calcaires ocre détritiques et oolitique avec des fines intercalations argileuses, brunes ; témoin d'une tendance à l'émersion après une longue période de sédimentation en eau profonde.

***Crétacé :***

- *Inférieur* : Arénacé et néritique. La région de Beyrouth était un littoral sableux et plat. On y observe les Grés de base (220 m) qui présente une stratification en couches lenticulaires.

Durant l'Aptien (150-220m) la transgression se poursuit et le grés

devient de plus en plus argileux avec insertion de bancs calcaires. Parmi ces bancs on peut observer une muraille claire : La falaise de Blanche. C'est le repère du Crétacé et détermine la séparation entre l'Aptien inférieur et supérieur.

- *Moyen* : L'Albien Calcaires finement lités avec intercalations marneuses vertes à la base; le Cénomaniens C4 (660 m) est caractérisé par de fins bancs de calcaires et de bandes marno-calcaires qui témoignent d'une mer assez profonde et étendue.  
Le Turonien C5 (200-300 m) en général montre une modification de la sédimentation (du à un soulèvement ou à une régression) ; cette modification est peu visible dans la région de Beyrouth, on considère alors ici l'ensemble céno-mano-turonien.
- *Supérieur* : Le Sénonien C6 dans la région de Beyrouth est peu représenté, on l'observe entre les calcaires turoniens le long de failles et se caractérise par des marnes à Globigérines. Il correspond à une phase de transgression.

#### ***Tertiaire :***

Le Nummulitique se distingue par des marno-calcaires à bandes de silex. Le Miocène présente des poudingues et des marnes sableuses, on les retrouve notamment dans le cours inférieur du Nahr Beyrouth.

#### ***Quaternaire :***

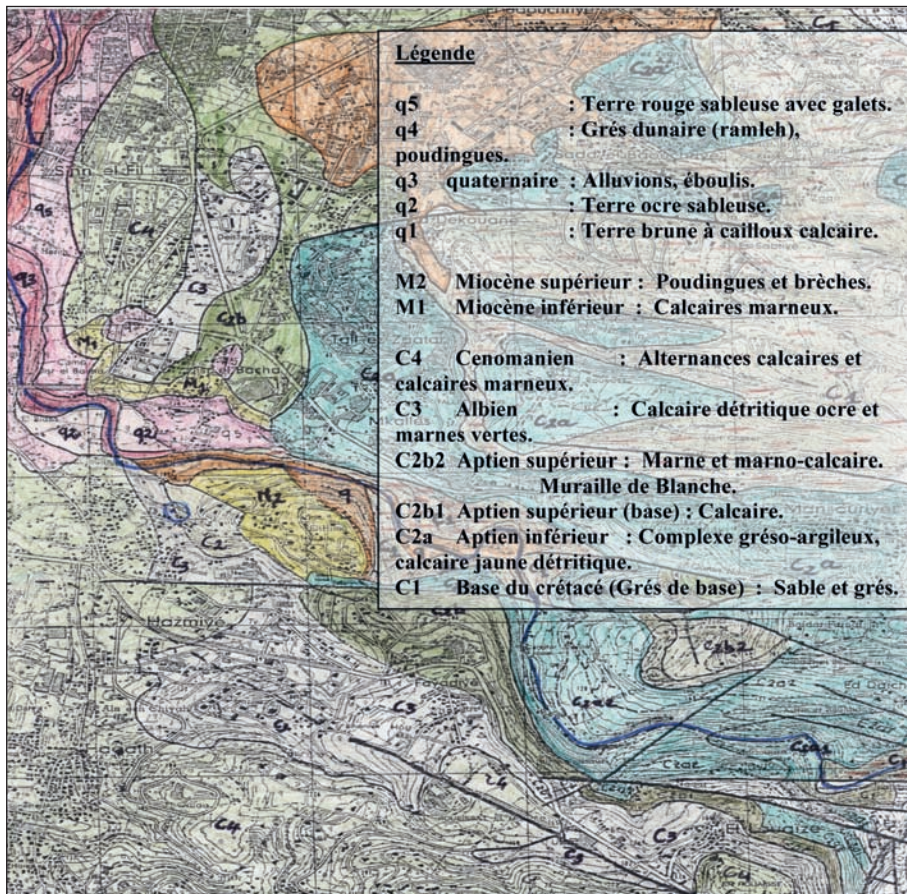
Le littoral a été sous l'influence des variations du niveau de la mer. Le Nahr Beyrouth a déversé ses alluvions sur la plate-forme de Beyrouth.

#### **• Evolution récente du relief et du littoral (Géomorphologie).**

Le Nahr Beyrouth s'écoule en partie dans la plaine de Choueifate. Celle-ci s'étend au sud de la plate-forme de Beyrouth entre le front montagneux et la mer. Le front montagneux est globalement orienté nord-sud en s'infléchissant vers le sud-ouest dans sa partie méridionale, il est taillé essentiellement dans les calcaires du Crétacé moyen (à pendage vers l'Ouest). Le front montagneux est dû essentiellement à l'érosion.

Les analyses des alluvions dans le lit du nahr Beyrouth permet de déterminer (Sanlaville,1977) que la rivière a fortement incisé son lit pendant la dernière régression, par la suite ont alterné des périodes d'accumulation grossière fluviale et des phases de sédimentation vaseuse (ria).

*La carte géologique de la région Hadath-Hazmié.*



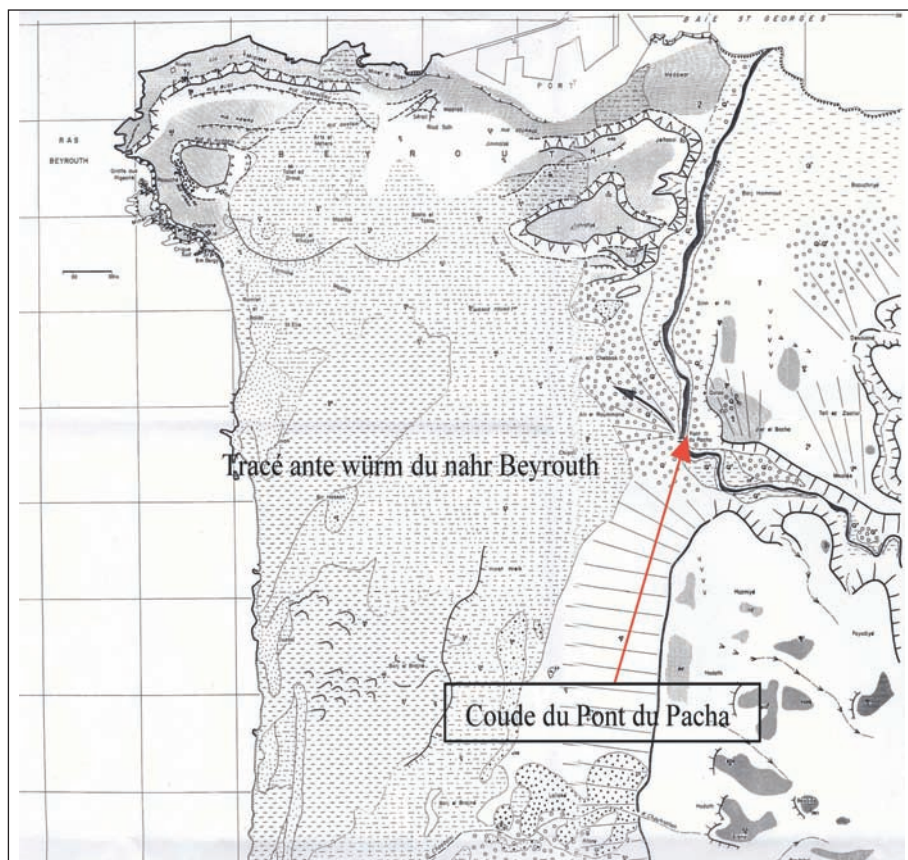
Les phases de karstification et le développement de la structure karstique de l'aquifère de Hadath-Hazmieh dépendent étroitement de la quantité d'eau disponible aux différentes périodes et des éventuelles pertes. On s'intéresse donc particulièrement au « coude » du nahr Beyrouth au lieu-dit le Pont du Pacha. A savoir si le fleuve continuait

son tracé plein Ouest ou si le coude existait. Les dépôts alluviaux quaternaires nous fournissent donc des éléments intéressants permettant de reconstituer le paléo-environnement et l'évolution de la plaine de Choueifate au Quaternaire et en particulier de la basse vallée du Nahr Beyrouth.

On distingue dans ces dépôts quaternaires :

- Une formation grossière cimentée.
- Des alluvions riches en matrice sablo limoneux rougeâtre.
- Un remblaiement fluvio-marin.
- Une basse terrasse holocène.

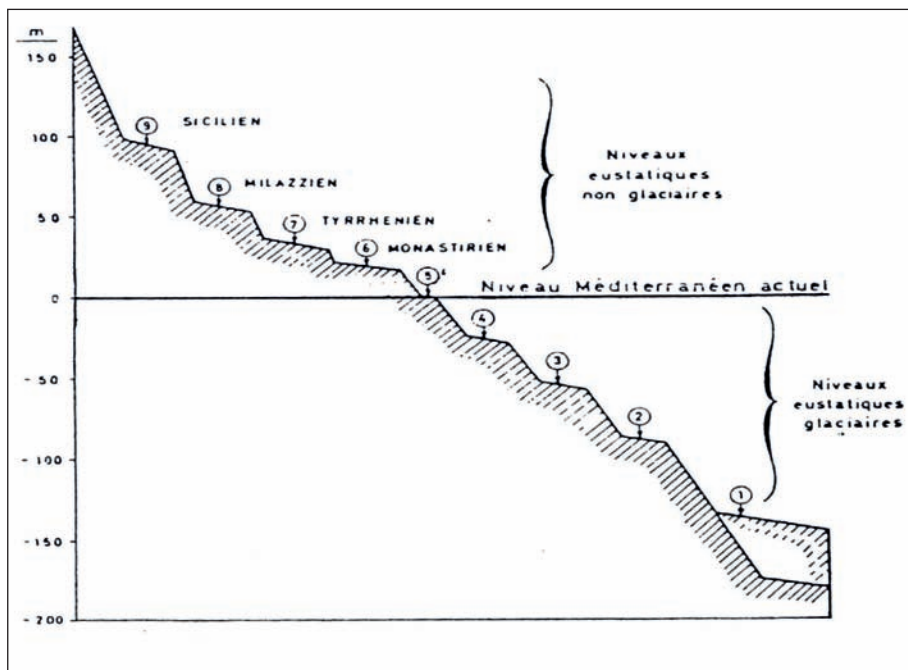
***Le Nahr Beyrouth dans son contexte géomorphologique  
(d'après Sanlaville)***



En effet les sols rouges de Ramleh reposant sur notre formation cenomano-turonienne correspondraient à une nappe d'épandage du nahr Beyrouth.

Le quaternaire a vu plusieurs phases successives de variation du niveau marin. La glaciation du Würm (- 15 000 ans) a montré le minimum du niveau marin (- 120 m par rapport à l'actuel). Durant les phases interglaciaires le niveau marin était sensiblement identique à l'actuel.

*Niveaux de la mer Méditerranée au quaternaire, d'après Dubertret (notice géologique).*



Cela permet à Sanlaville (1977) d'affirmer qu'au Würm (80.000-15.000 avant l'actuel) le coude actuel (Pont du Pacha) n'existait pas, le Nahr Beyrouth s'écoulait alors vers Aïn er-Roummané. La transgression flandrienne rapide a remblayé cette partie par des matériaux fluvio-marins. Le fleuve aurait emprunté son tracé actuel à la fin du Würm

en incisant son lit sur plus de 42m. Sanlaville a noté que les rivières libanaises importantes ont leurs vallées qui se sont prolongées en mer par un canyon étroit et profond ; cependant le Nahr Beyrouth ne présente pas de canyon ni à son embouchure actuelle ni au sud-ouest de Ras Beyrouth (débouché du Nahr Beyrouth würmien).

### **3- La karstification de l'aquifère céno-mano-turonien.**

La gestion d'un aquifère en domaine calcaire ne peut s'envisager sans tenir compte d'une éventuelle karstification. Les projets de recharge artificielle ainsi que parallèlement la lutte contre l'intrusion saline dans l'aquifère calcaire de Hadath-Hazmiyé mérite donc d'envisager l'étude sous un angle qui n'a pas été envisagé jusque là. : La karstification de l'aquifère céno-mano-turonien.

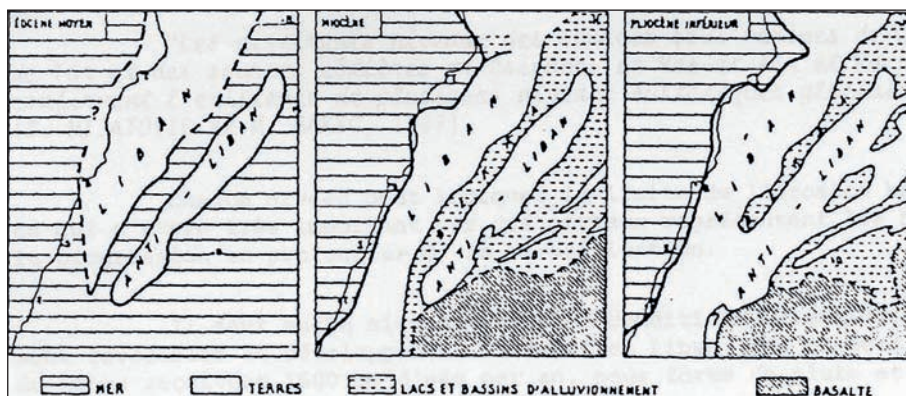
- **Les phases de karstification au Liban.**

Le karst au Liban est représenté tant dans le Jurassique, dans le Crétacé que dans le Tertiaire. Les massifs calcaires du Jurassique ont été les premiers affectés lors de l'émergence du jurassique supérieur. La deuxième grande phase de karstification s'observe à la fin du Turonien après le dépôt de l'ensemble du massif céno-mano-turonien.

Par la suite la couverture imperméable du Crétacé supérieur et éocènes a été érodée et le massif calcaire céno-mano-turonien a connu une karstification prononcée à partir du Vindobonien (16.3 – 6.7 Millions d'années). Le céno-mano-turonien, ainsi que les calcaires du Jurassique, connaissent une évolution de cette karstification tant en surface qu'en profondeur durant le Quaternaire jusqu'à nos jours (les conditions climatiques actuelles étant favorables au développement du Karst au Liban).

En effet le quaternaire a vu se succéder plusieurs phases glaciaires et au cours des périodes interglaciaires c'est de l'eau froide riche en CO<sub>2</sub> du à la fonte des neiges qui circulent dans le karst accélérant considérablement les processus de karstification dans ceux-ci. C'est cette action combinée aux oscillations du niveau de la mer qui va former le karst actuel.

*Eustatisme de l'Eocène Moyen au Pliocène supérieur.*  
(Ext. Notes et Mémoires, t. IV, 1948).



A noter que la présence des différents niveaux des sources sous-marines localisées sur certains points (notamment Chekka) confirment l'existence de plusieurs niveaux eustatiques glaciaires (Mijatovic et Bakic, 1967). Ces paléo niveaux de base indiqués par ces sources actuelles indiquent la progression en profondeur de la karstification.

• **Implications sur les différentes phases de karstification de l'aquifère C4-C5.**

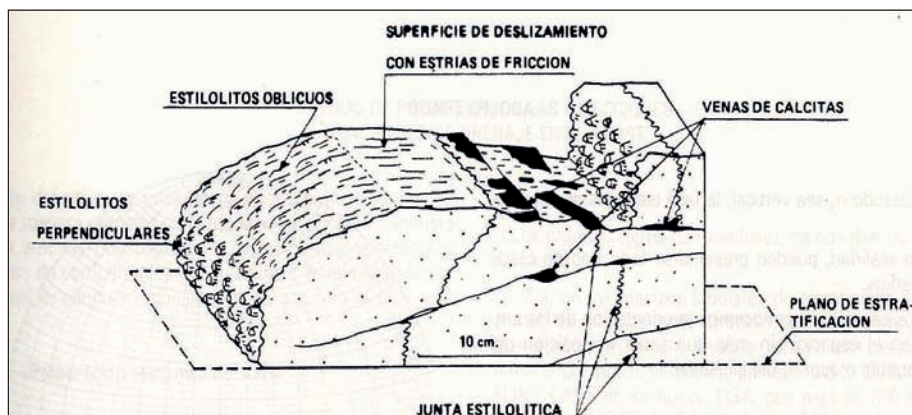
Tous les indices sont présents pour assurer que l'aquifère céno-manoturonien a été karstifié. D'abord la crise du messinien en Méditerranée a profondément touché tous les massifs carbonatés méditerranéens, l'aquifère céno-manoturonien n'a pas de raison d'avoir été épargné. Ensuite la tectonique, encore active aujourd'hui, a eu tendance à développer le gradient hydraulique (par surrection), et favoriser le plongement vers l'ouest de l'ensemble céno-manoturonien.

On a vu par ailleurs les phases d'eustatisme qui correspondraient à autant de phase de karstification. Du fait de ces nombreuses phases, parfois importantes, on peut s'attendre à ce que l'aquifère céno-manoturonien présente une karstification complexe et profonde. Il s'en suit des conséquences sur la compréhension du fonctionnement de celui-ci.

Une autre composante primordiale dans la détermination de la structure du réseau de conduit d'un aquifère karstique est sa fracturation ; en effet les fractures permettent à l'eau de circuler. De l'importance de ces fractures dépend les vitesses de circulation et les quantités d'eau transitant dans l'aquifère karstique. La direction de ces fractures est tout aussi importante. L'eau aura tendance à rejoindre le niveau de base (ici la mer) par le chemin le plus facile. Si les fractures sont perpendiculaires à la mer l'eau s'engouffrera dans ces fractures et rejoindra directement la mer. Au contraire si les fractures sont parallèles à la mer le réseau de conduits karstiques sera beaucoup moins développé et la masse compacte des calcaires formera un barrage « étanche » empêchant l'eau de rejoindre le niveau de base.

La disposition de ces fractures dépend majoritairement des phases tectoniques et de leur nature : compressive, décrochante ou en extension. Les fractures en extension formeront des ouvertures favorisant la circulation de l'eau. Dans le contexte d'une recharge artificielle cette considération prend toute son importance.

### *Les tectoglyphes (Eraso, 1986).*



- **Résultats de l'étude de terrain.**

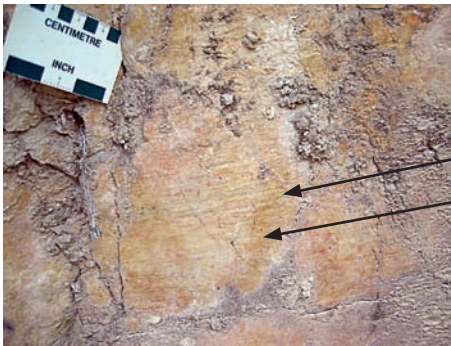
L'étude de terrain vise donc à repérer sur l'ensemble des affleurements du secteur les directions de pendage, la fracturation, les tectoglyphes et tous signes indicateurs d'une karstification (microcavités et conduits, colmatage...).



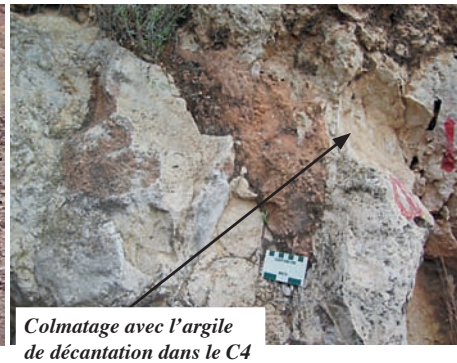
Cependant le Céno-mano-turonien n'affleure qu'à peu d'endroits dans cette région. Les endroits où il est à l'affleurement ne présentent que trop peu de tectoglyphes (photo 1). L'analyse statistique ne peut donc être faite en toute rigueur.

Les observations de terrain ont cependant montré des cavités karstiques colmatées (photo 2).

*Photo1:*  
*Stries dans le C4 (N240, pendage:25°)*



*Photo2:*  
*Colmatage avec l'argile de décantation*



*Colmatage avec l'argile de décantation dans le C4*

Ce colmatage peut être lié à deux facteurs :

- Une modification des conditions climatiques entraînant une disparition du couvert végétal, s'ensuit une érosion intense des sols ; la capacité de transfert des aquifères karstiques ne suffisant pas à évacuer ces matières ; celles-ci s'accumulent alors dans les cavités karstiques.
- Le niveau de base remonte et bloque l'écoulement dans les conduits alors que des particules s'accumulent dans les fissures et cavités.

Une indication temporelle de ce remplissage pourrait être donnée par une analyse géochimique de ces argiles. Toutefois la cavité contenant le remplissage peut avoir été colmaté et décolmaté plusieurs fois, car l'eau a eu tendance à reprendre le même chemin. Ce colmatage par des argiles doit être distingué du colmatage par des éboulis cimentés qui ne sont pas liés à la circulation d'eau (photos 3 et 4).

*Photo 3: Cavité dans le C4, remplie par de l'argile.*



*Photo 4: Dissolution importante dans le C3.*



Sur cet affleurement (photo 5) deux phases successives de karstification: un banc calcaire est colmaté et au dessus un autre banc présente une karstification développée mais non colmatée.

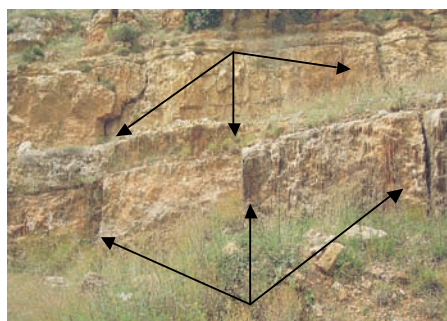
La muraille de Blanche (Aptien supérieur, C2b) présente des similitudes avec les formations céno-mano-turonniennes, la karstification y est très visible. Une étude microstructurale a été envisagée mais pour les mêmes raisons que le céno-mano-turonien, elle n'a pas pu être faite.

Les fractures (indiquées par des flèches sur la photo 6) sont orientées NNW-SSE. La couche présente un pendage de  $8^\circ$  vers l'ouest.

*Photo 5: Deux phases de karstification dans le C2b*



*Photo 6: Fracturation dans l'aptien supérieur.*



On peut observer à plusieurs endroits un concrétionnement repris dans matériel recimenté, témoin d'une ouverture. Ici les mesures de direction donnent NE-SW.

Les mesures de direction de fracturation sur ces affleurements montrent deux directions majeures l'une à tendance plutôt NE-SW, correspondant à la faille de Yammouné. L'autre direction NNW-SSE correspondrait à la faille de Roum.

La surrection du Mont Liban induit un plongement vers la mer favorisant des fractures en ouverture. L'interprétation peut être faussée par des fractures occasionnées par « l'appel au vide » fréquentes en bordure des vallées profondes. C'est le cas de la vallée du Nahr Beyrouth.

L'étude géologique a permis de montrer l'existence de différentes phases de karstification, sans pouvoir les dater, et des directions de fracturation. L'aquifère céno-mano-turonien est donc un aquifère certainement karstifié en profondeur avec un réseau karstique complexe, possédant plusieurs paléosystème de drainage et ayant des fractures en distension orienté globalement à l'ouest favorisant largement l'écoulement de l'eau vers la mer.

#### **4- Eléments hydrogéologiques sur l'aquifère céno-mano-turonien de Hadath-Hazmié.**

- **Quelques considérations sur l'aquifère.**

Les premiers réflexes de l'hydrogéologue karstique sont de se tourner vers les sources de l'aquifère. Il s'agit ici d'un aquifère côtier, donc s'il y a eu des sources c'est en mer qu'il faudrait les chercher. Les images satellites donnent un bon aperçu des sources sous-marines sur le littoral libanais ; mais l'on n'en observe pas aux abords de l'aquifère Hadath-Hazmié. Les rapports géophysiques ont par contre mentionné des « fuites » d'eau douce diffuses tout le long de l'aquifère côtier. A cela s'ajoute des preuves d'intrusion saline. On peut donc supposer à premier abord que le système karstique de cet aquifère est non fonctionnel. Les conséquences quant à son exploitation et sa gestion s'en suivent.

Les caractéristiques de l'aquifère obtenues dans les études faites dans les années 70 tiennent peu compte de la nature karstique de l'aquifère. On peut ainsi y voir entre autre des modèles maillés sur lesquels se

basent les estimations de pompage, de recharge et d'intrusion saline. Rappelons que ces modèles ne s'appliquent que très difficilement au caractère hétérogène du karst et que cette approximation, acceptable pour un aquifère karstique non fonctionnel, n'a plus de sens dans des conditions de pompage et de recharge (forts rabattements, inversion de direction d'écoulement).

- **Données spéléologiques.**

La spéléologie offre des données précieuses et bien souvent là où d'autres techniques s'avèrent inefficaces. Ce type d'observations ne donne pas l'état réel de l'aquifère mais plutôt son activité passée. Les données sont donc à remettre dans leur contexte. L'association d'études spéléologiques au Liban a été contactée afin de voir s'il existe des grottes répertoriées dans le secteur étudié. La réponse a été négative, ce qui ne veut pas dire qu'il n'y en ait pas. Cependant une grotte à Antélias (Nord de Beyrouth) dans les calcaires jurassiques peut fournir des données intéressantes quant au sens d'écoulement préférentiel de l'eau et aux directions de fracturation utilisées.

Le réseau spéléologique d'Antélias est bien développé et est encore bien conservé ce qui signifie que ce réseau est relativement récent (il n'a pas subi toutes les nombreuses phases de déformation tectonique, auquel cas il ne serait pas conservé). Donc les processus à l'origine de sa formation ont en toute logique affecté notre formation cénomano-turonienne quelques kilomètres plus au sud. Le gradient hydraulique ainsi que les conditions climatiques étaient semblables. Pour ces raisons l'étude de cette grotte apporte une meilleure connaissance des écoulements préférentiels passés.

Le réseau a été « morcelé » en plusieurs segments correspondant aux variations d'orientation de ses parties. Ensuite des mesures de direction et de longueur ont été faites. Ces données ont ensuite été représentées dans un diagramme de direction. La direction des conduits la plus abondante en longueur est N 150 ; la seconde en fréquence est N90. La direction générale d'écoulement dans ce secteur est E-W.

Le réseau souterrain de la grotte d'Antélias s'oriente préférentiellement NNO-SSE. Cette direction majeure est en concordance avec les directions trouvées notamment sur l'Aptien supérieur. Cette direction est aussi celle de la faille de Roum. Il y a donc de fortes chances pour que des réseaux karstiques de même ampleur et suivant approximativement la même direction. NNO-SSE se soient développés dans le Cénomano-turonien.

## Conclusion

Cette approche géologique et hydrogéologique a permis de mettre en évidence la complexité de la structure de l'aquifère karstique de Hadath-Hazmiyé. Cependant des études complémentaires pourraient être réalisées pour préciser les phases de karstification de l'aquifère cénomano-turonien. Il serait intéressant notamment :

- Du point de vue de la recherche « fondamentale », de faire des campagnes de cartographie pour réactualiser les connaissances passées à la lumière géologique de la connaissance actuelle, pour répertorier les preuves de l'existence de la crise messinienne (et ses impacts au Liban) notamment par des campagnes de géophysique marine, étudier les paléoenvironnements, dater les colmatages, et enfin, ayant une meilleure connaissance du système karstique, envisager des essais de traçage.
- Du point de vue de la recherche appliquée, exécuter de nouveaux essais de pompage et d'analyses physico-chimiques des eaux souterraines.
- Lors de prochains forages relever l'avancement des outils de forage (afin de déterminer la proportion des vides dans le Cénomano-turonien).

Les essais de recharge artificielle déjà effectués semblent être satisfaisant, cependant la méconnaissance de la structure de cet aquifère risque de poser des problèmes dans sa gestion future. Il semble donc qu'il soit temps d'insérer dans les études d'ingénierie sur l'aquifère d'Hadath-Hazmiyé un volet karstique.

## Références bibliographiques :

1. Bakalowicz, M, 2005. Hydrogéologie Karstique. Cours DEA Sciences de l'eau USJB-ESIB.
2. Butler, R. Fault array evolution and transpression-transension along the Dead sea transform.
3. Carte géologique au 50 000 ème. Feuille de Beyrouth. 1951. Réimprimée février 2000.
4. Desrousseaux, C, mai 2004. Etude microtectonique du massif karstique de la Sierra Almiijara (Espagne). Méthode informatique d'analyse de failles. Rapport de maîtrise. Université Montpellier II.
5. Dubertret, L, 1962. Correlation chart of lithostratigraphic units of Liban and Syria. International Commission on stratigraphy Gradstein & Ogg. 2004.
6. El Asmar, C, Juin 2001. Essai de caractérisation de la qualité des ressources en eau de la région de Beyrouth. Rapport de DEA, Université Saint-Joseph (Beyrouth, Liban).
7. El Kadi, G, Juin 2001. Etude de l'intrusion saline dans les aquifères côtiers ; Application de la modélisation numérique. Rapport de DEA, Université Saint-Joseph (Beyrouth, Liban).
8. Eraso, A, 1985-1986. Metodo de prediccion de las direcciones principales de drenaje en el Karst. KOBIE (serie ciencias naturales). Bilbao. N° XV.
9. Fleury, P., 2005. Sources sous-marines et aquifères karstiques côtiers méditerranéens. Fonctionnement et caractérisation. Thèse de doctorat.
10. Ford D, Williams P, 1989. Karst geomorphology and hydrology. Ed. Chapman & Hall.
11. Hakim, B, 1985. Recherches hydrologiques et hydrochimiques sur quelques karsts méditerranéens. Liban, Syrie et Maroc. Publications de l'université Libanaise. Beyrouth 1985.

12. Karam, F, mars 2002. Optimisation de la recharge artificielle. Rapport de DEA, Université Saint-Joseph (Beyrouth, Liban).
13. Khadra, W, M, 2003. Hydrogeology of the Damour Upper Sannine-Maammeltain aquifer.
14. Khneisser, I., 2003. Contribution à l'étude de la qualité physico-chimique des eaux du Nahr Beyrouth. Rapport de DEA, Université Saint-Joseph (Beyrouth, Liban).
15. Rapport sur la recharge artificielle de l'aquifère des calcaires cénomaniens de Sin El Fil-Hadeth-Hazmiyé-Choueifat. Bureau de l'ingénieur Joseph Meguerdich (1996).
16. Sanlaville, P, 1977. Etude géomorphologique de la région littorale du Liban. Publications de l'université Libanaise.
17. SPELEORIENT, décembre 2004. Revue annuelle de Spéléologie. Editée par l'association Libanaise d'études spéléologiques.

## **Rôle d'un SIG et la réflexion géographique dans le suivi des mutations de l'occupation du sol dans la Beqaa.**

*Hussein El Hage Hassan<sup>(1)</sup>, Ahmad El-Hajj<sup>(2)</sup>,  
Jamil Tfaily<sup>(3)</sup>, Abed El Rahim Ibrahim<sup>(4)</sup>*

### **Summary**

Over the past three decades, technologies and methods of remote sensing have progressed dramatically. Satellite images and aerial photograph play a key role in the study of land use change. These images give an overview that can be repeated over time especially for terrain which are difficult to access. The change in land cover is the result of complex dynamic processes that depend on both physical and socio-economic factors. The Bekaa Valley is a region that has experienced over the last fifty years a significant development in the urban and vegetable cover. The GIS approach provides an objective quantitative study in an area where the field investigation is sometimes impossible.

### **Key words:**

Bekaa, GIS, Land cover evolution, Lebanon.

---

(1) Université Libanaise, Laboratoire de recherche : CEDETE EA 1210. Université d'Orléans.

(2) Université Libanaise, Laboratoire de recherche : HydroSciences. Montpellier II.

(3) (4) Université Libanaise, Faculté de Littératures et des Sciences Humaines.



## Résumé

Au cours des trois dernières décennies, les technologies et les méthodes de la télédétection ont évolué de façon spectaculaire. Les images satellitaires et les photos aériennes jouent un rôle primordial pour l'étude du suivi des évolutions du mode d'occupation du sol. Ces images donnent une vision globale qui peut être répétée dans le temps surtout pour les terrains dont l'accès est difficile.

L'évolution du couvert des sols est le résultat de processus dynamiques complexes dépendent à la fois de facteurs physiques et de facteurs socio-économiques. La plaine de la Bekaa, est une région qui a connu au cours des cinquante dernières années une évolution importante dans le couvert urbain et surtout dans le couvert végétal. L'approche par SIG permet une étude quantitative objective dans une région où la pratique directe du terrain est parfois impossible.

## Mots clés :

**Bekaa, Evolution du couvert du sol, Liban, S.I.G.**

Dans la seconde moitié du vingtième siècle, le Liban a connu un véritable changement du mode d'occupation du sol. En effet, les surfaces urbanisées ont considérablement augmenté et ce, de façon chaotique, au détriment du couvert végétal (Masri et *al.*, 2001). La présente étude vise de développer une méthode basée sur l'intégration des images satellitaires et des photos aériennes, dans un système d'information géographique (SIG). Celui-ci a pour but de nous guider dans la quantification des changements qui ont touché les terres agricoles dans la Bekaa Ouest, pendant une longue période allant de 1962 à 2005.

Pour la région d'étude, nous avons choisi, à l'intérieur du Liban, la Bekaa Ouest. Celle-ci est une surface quasi plane insérée entre les chaînes occidentales et orientales (El Hage Hassan et *al.*, 2011). C'est une région peuplée, agricole, importante pour l'économie libanaise ; de ce fait elle est particulièrement intéressante pour les enjeux socio-économiques qu'elle constitue (figure n°1).

## **Méthode de travail**

### **1-Traitement des données.**

#### **1. Les photographies aériennes et l'image satellitaire Ikonos.**

Avant les années 1960, ce sont les photos aériennes, dont le vecteur d'enregistrement est l'avion, qui ont permis d'acquérir des informations à distance pour certains secteurs de la surface de la terre, et d'en retirer des renseignements sur leur organisation.

En 1962 la Direction des Affaires Géographiques et Géodésiques (DAGG) a effectué une couverture aérienne sur l'ensemble du territoire libanais à des échelles variant de 1 :10 000 à 1 :20 000. A partir de ces photos, la DAGG a établi les cartes topographiques du Liban à l'échelle de 1 :20 000.

Nous avons vectorisé les cartes qui couvrent la région d'étude (figure n°2), tout en créant plusieurs couches comme le couvert végétal, l'urbanisme, le réseau de transport.

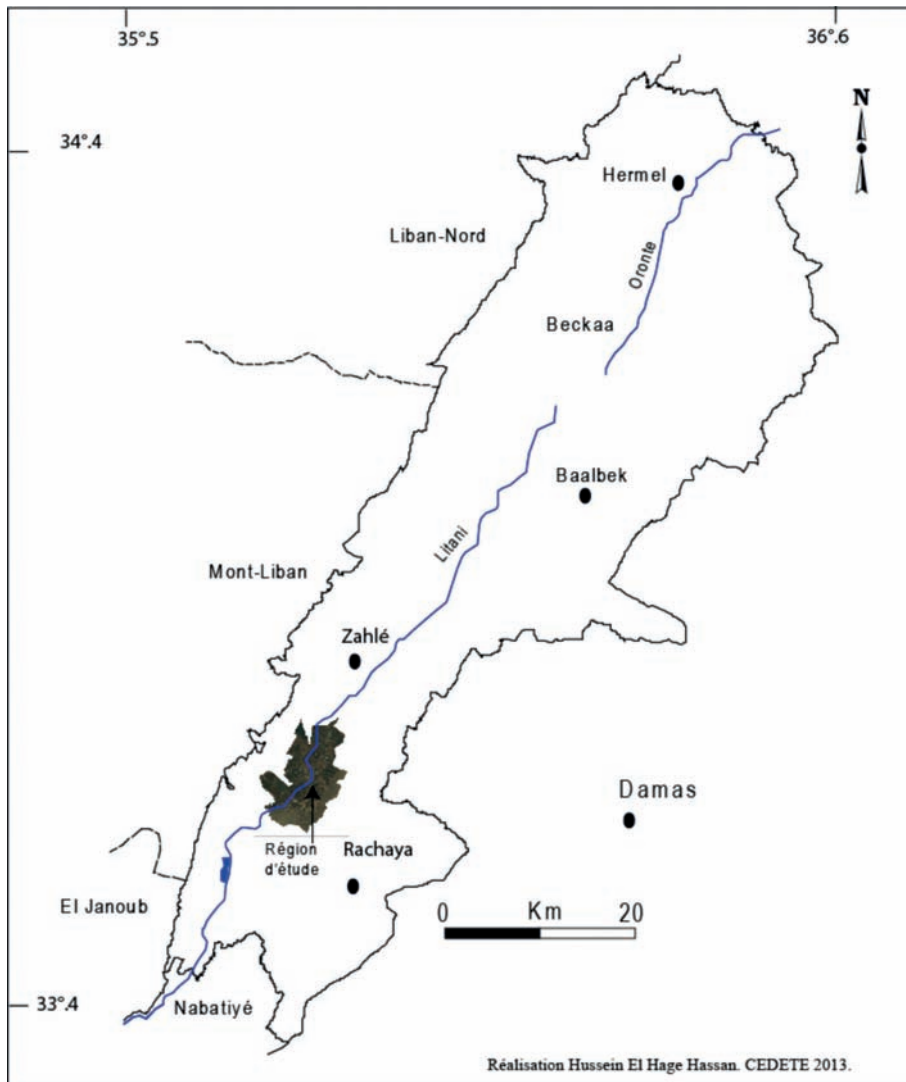
Les images satellitaires permettent d'accéder à une vision particulière de la surface terrestre. Cette vision semble être adaptée à la détection de grandes étendues et à l'interprétation de paysages parfois complexes. La répétitivité permet de comparer différents stades d'évolution d'une région au cours du temps, et d'élaborer des analyses diachroniques à l'aide de traitements numériques.

En 2005 le CNRS libanais, a produit la carte d'occupation du sol du Liban à l'échelle de 1 :20 000, à partir d'une image satellitaire Ikonos avec une résolution spatiale de 1 mètre. La légende de cette carte a été prise en compte pour l'interprétation des autres données. La photo-interprétation assistée par ordinateur a été utilisée afin de produire cette carte.

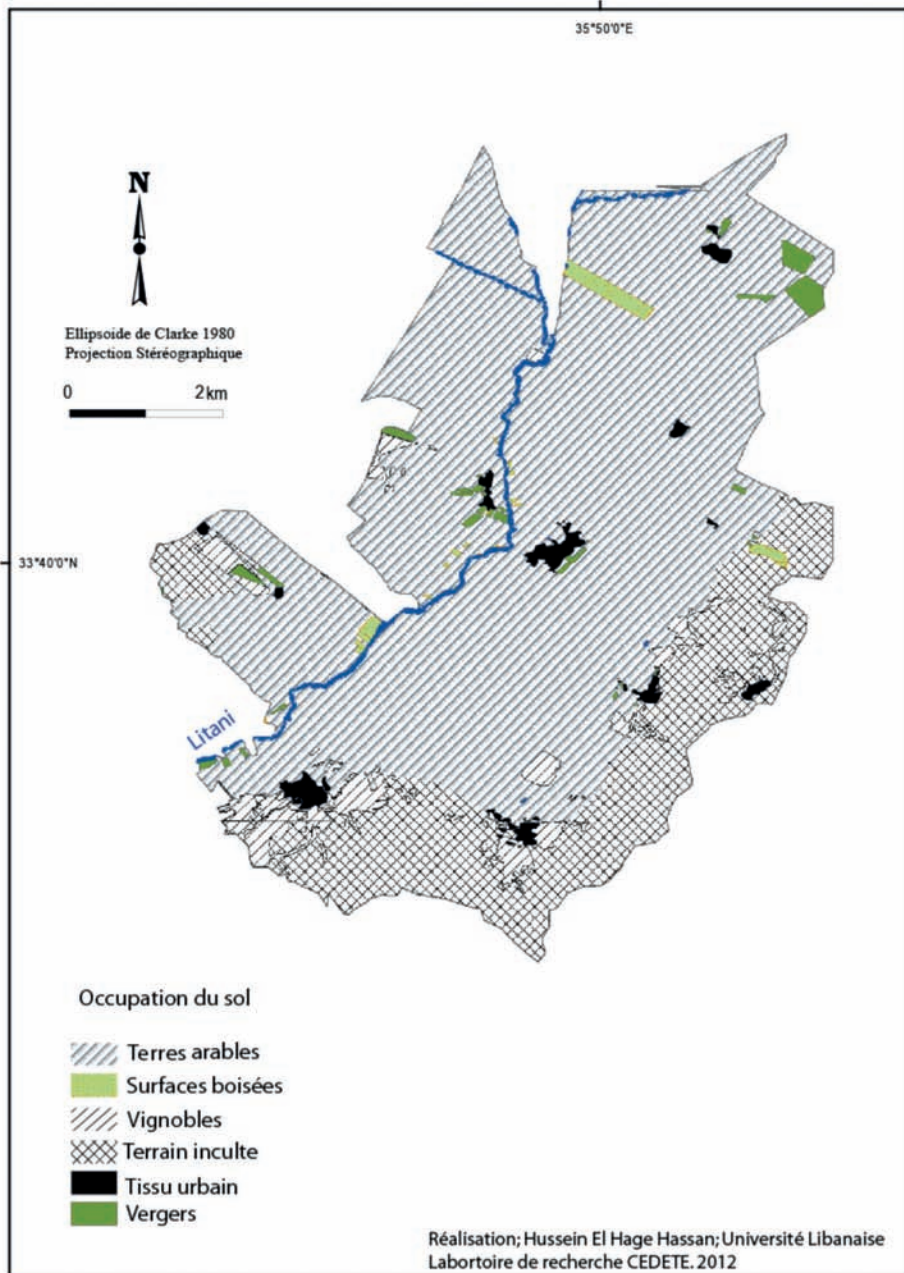
L'absence d'une nomenclature unifiée des modes d'occupation du sol pour les cartes relevant des différentes années étudiées, ce qui a nécessité une réinterprétation des classes de manière à homogénéiser les nomenclatures.

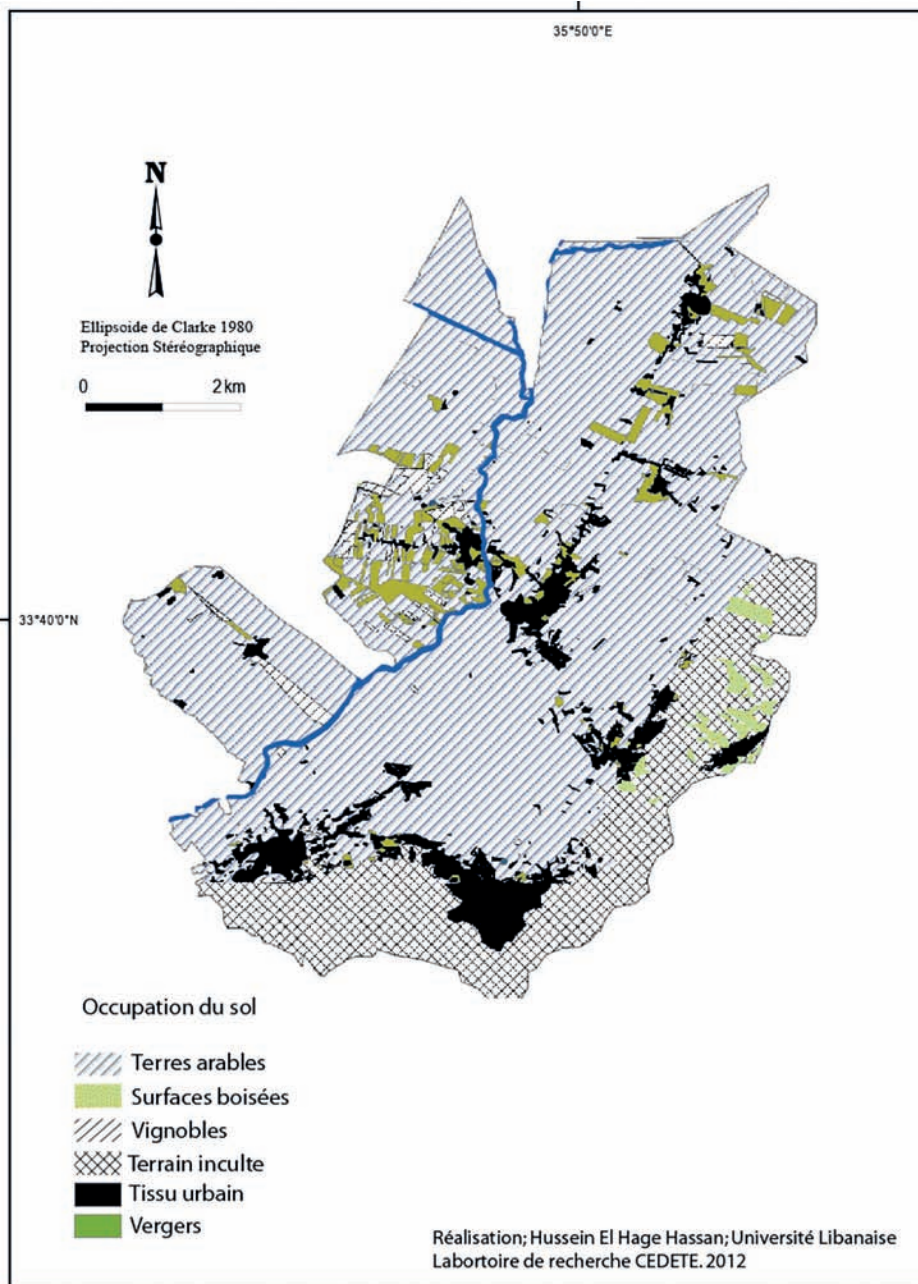
L'échelle de la cartographie (1:20 000) de terrain conditionne la taille minimale des objets cartographiables. On considère comme « cartographiable » un objet qui représente à l'échelle minimale de travail de terrain, un polygone d'une surface de 0.1 hectares (figure n°3).

**Figure n ° 1 : Localisation de la région d'étude.**



**Figure n ° 2 : mode d'occupation du sol en 1962.**



**Figure n ° 3 : mode d'occupation du sol en 2005.**

## **2- Les mutations de l'occupation du sol entre 1962 et 2005.**

A l'aide d'un SIG, nous avons croisé les cartes d'occupation du sol des années 1962 et 2005. Ceci nous a permis d'extraire des matrices de changement, dont nous pouvons identifier des indicateurs sur les transformations dans la région d'étude.

Cette approche permet d'étudier les transformations de l'occupation du sol, qui évolue dans le temps et dans l'espace, résultant de l'interaction entre l'homme et son environnement.

La photo-interprétation consiste à identifier l'occupation du sol en utilisant la numérisation sur fond d'écran. Le principe consiste à délimiter les zones qui représentent une structure d'occupation identifiée dans la nomenclature MOS-L.

En vectorisant l'image satellitaire Ikonos, nous avons suivis les étapes suivantes :

- Référence à la carte de l'occupation du sol de 2000 pour mettre à jour la nouvelle carte.
- Affichage des étiquettes (en l'occurrence les codes de chaque polygone) au moment de la photo-interprétation, ce qui facilitera la tâche surtout en ce qui concerne le découpage et la combinaison des polygones.
- Utilisation de la même échelle d'affichage des images (en l'occurrence 1 :10 000), ce qui n'empêche pas de l'agrandissement.
- Définition de la taille du plus petit polygone à 0,1 hectare.
- Travail dans le niveau 4 de la nomenclature MOS-L, avec quelques modifications.

A partir de la carte d'occupation du sol de 1962, issue des photographies aériennes, et de l'image satellitaire de 2005 transformée en carte vectorielle de 1 :20 000, nous avons étudié le changement du couvert du sol (vergers, terres arables, urbanisme...) pendant 43 ans.

Il été important de géoréférencer (projection conique conforme de Lambert) et de caler (le système de coordonnées de référence de la zone) les données cartographiques afin d'effectuer le croisement spatial des facteurs de l'érosion. De plus, des campagnes de terrains ont permis de valider les résultats des analyses issues des traitements des images satellitaires. Nous attirons l'attention sur le fait que les documents, qui ont servi à ce travail, ne sont pas répartis régulièrement dans le temps, ce qui rend plus difficile l'interprétation et augmente la marge d'erreur. Mais nous avons pu nous faire une idée sur la variation du couvert du sol au niveau de la région d'étude.

### **2.1-Les terrains incultes.**

La surface des terrains incultes, qui a presque gardé sa taille au fil des années, n'a connu qu'une diminution de 346 hectares. Le suivi de l'évolution des terrains incultes, note la présence de 2724 hectares en 1962. En revanche, le traitement de l'image Landsat de 2005, montre que cette surface avoisine 2378 hectares. Les principales pertes se sont faites au profit des céréales et des surfaces boisées. Malgré les pertes la carte de 2005 montre que certaine culture ont régressée au profit des terrains incultes comme les vignobles qui ont perdu 60 hectares.

### **2.2-La surface cultivée en arbres fruitiers (vergers).**

Elle représente l'une des cultures les plus importantes au Liban, et joue un rôle important dans l'économie libanaise, surtout pour l'exportation et l'industrie alimentaire. Cette surface, de 116 100 hectares, comprend les oliviers, les agrumes, les bananiers, les arbres fruitiers à pépins ou à noyaux, et les arbres à feuilles caduques comme les pommiers, les poiriers, les amandiers et les pêchers (Montigaud et *al.*, 2004).

Ces cultures, qui se répartissent inégalement sur le territoire Libanais, sont influencées par le climat et l'altitude. Les agrumes se cultivent sur le littoral, là où la température et l'humidité sont plus élevées. En revanche, cette culture n'existe pas dans les hautes altitudes du Mont Liban et dans la plaine de la Bekaa qui possède d'autres espèces fruitières, comme les pommiers et les poiriers.

La surface cultivée en arbres fruitiers dans notre région d'étude en 1962 avoisine les 136 hectares. En 2005, cette surface avoisine les 420 hectares, ce qui montre que cette culture a connu un progrès. Selon les croisements des couches agricoles, nous avons remarqué que les surfaces cultivées en arbres fruitiers, dans certains villages, ont perdu quelques dizaines d'hectares au profit d'autres cultures, comme les terres arables (87 hectares). Malgré les pertes, les arbres fruitiers ont connu un développement dans d'autres parties de la région et ceci majoritairement au détriment des terres arables (275 hectares).

Malgré ces pertes et ces gains, nous remarquons que le bilan est positif pour les arbres fruitiers. Il est important de signaler que 30 hectares sont restés stables, ce qui signifie que ces champs ont connu une restauration de leurs surfaces.

### **Photographie n°1 :**

#### **Les vergers dans la région d'étude.**



*Aperçu des vergers (pêchers) exploités par son propriétaire dans le village d'Al Khiara. Cette photographie montre le mode d'entretien de ces vergers, qui a pour but de maximiser la production. Prise au printemps, elle montre clairement le fleurissement des vergers.*



### **2.3-La surface cultivée en vigne.**

L'analyse des deux cartes (1962 et 2005), concernant la culture de la vigne, nous montre qu'en 1962, la surface cultivée en vigne avoisinait les 448 hectares. La carte de 2005, note la présence de 163 hectares, ce qui montre que cette culture a connu une perte de 285 hectares.

Mais si nous examinons les analyses, nous remarquons qu'il y a eu des gains et des pertes de vignes et une redistribution de cette surface agricole. Les deux principales surfaces qui constituent des gains pour les vignes sont les terres arables, qui représentent respectivement 80 % des gains de vignes dans la région en question.

En revanche l'analyse des cartes montrent qu'il y a eu des pertes des surfaces cultivées en vignes dans plusieurs villages. Nous remarquons que ces pertes sont faites majoritairement au profit des terres arables (38%), suivies des tissus urbains (27%) et des terrains incultes (24%).

### **2.4-Les terres arables**

Selon la nomenclature CORINE Land Cover Europe, les terres arables sont définies comme les: « Céréales, légumineuses (maraîchères) de plein champ, cultures fourragères, plantes sarclées et jachères... ». Dans notre travail, nous désignons par terres arables les surfaces agricoles qui sont cultivées par les céréales ou les cultures maraîchères.

Le choix de cultures entre les céréales et les cultures maraîchères dépend de plusieurs facteurs, comme la disponibilité des ressources en eau et la demande de marché. Cela est valable pour le Liban comme pour la région d'étude.

La superficie exacte de chacune de ces cultures est variable d'une année à l'autre compte tenu des facteurs précités. Les données issues de l'Atlas agricole du Liban, nous montrent que la superficie des cultures maraîchères varie de 20 à 30% et que les céréales varient de 5 à 20 % sur

la superficie de la région de la Bekaa ouest. Mais selon les travaux de terrain qui se sont déroulés entre 2004 et 2010, nous avons constaté que les cultures maraîchères et les céréales couvrent 70% de la superficie de la région d'étude. Les céréales sont les cultures dominantes surtout qu'elles n'ont pas besoins d'être irriguées. De plus, elles bénéficient du soutien de l'état libanais.

En revanche, les cultures maraîchères ont besoin d'être irriguées, et souvent leur production n'est pas protégée par la concurrence des pays voisins.

Les terres arables (céréales, cultures maraîchères) occupent la surface la plus importante de la région étudiée. Malgré les pertes et les gains qui influencent la surface des terres arables, le croisement des deux cartes montre que la surface qui avoisine les 7106 hectares est restée stable, mais en revanche cette culture a connu une légère perte qui avoisine les 367 hectares. Les analyses nous donnent une idée sur les surfaces qui ont augmenté au profit des terres arables, comme les tissus urbains qui ont gagné 434 hectares, des arbres fruitiers (275 hectares). Pour les gains, les principales surfaces qui ont connu des pertes au profit des terres arables sont les terrains incultes, qui ont perdu 260 hectares suivis par les vignes et les arbres fruitiers.

## **2.5-L'urbanisation**

Le développement des tissus urbains résulte de la croissance de la population résidente ainsi que de l'immigration. La population, qui avoisinait au Liban les 500 000 habitants en 1920, a atteint les 4 000 000 en 1997 (SDATL 2004). Cette augmentation est issue de la croissance naturelle et de l'immigration vers le Liban.

Selon les données statistiques, nous remarquons que le taux d'urbanisation a augmenté dans tout le Liban. Certes, la capitale et le Mont Liban ont connu le pourcentage le plus élevé par rapport aux autres départements, mais d'autres régions ont connu une évolution de surfaces urbanisées qui varie de façon plus ou moins importante.

L'analyse des cartes montre que la surface urbanisée en 1962 couvrait 167 hectares, tandis que la carte de 2005 note la présence de 895 hectares : ce qui révèle une évolution de 728 hectares. L'analyse des cartes nous montre que la surface urbanisée a gagné 434 hectares au détriment des terres arables et 171 des terrains incultes et des vignobles qui, eux, ont perdu 119 hectares. Ces derniers constituent la majorité des gains de la surface urbanisée. Sans oublier qu'une surface urbanisée est restée stable entre 1962 et 2005, celle-ci avoisine les 149 hectares.

Sur le plan global de notre région d'étude, selon les analyses du changement agricole (issues du système d'information géographique), et à partir des deux couches de 1962 et 2005, nous constatons une augmentation importante de diverses cultures telles que : les arbres fruitiers. En revanche, nous remarquons une diminution des terres arables et des vignobles. Il est important de noter beaucoup des cultures sont redistribuées différemment entre 1962 et 2005.

Au plan de chaque village, nous constatons qu'il y a eu des pertes et des gains en surfaces agricoles et boisées. Plusieurs villages ont subi une diminution de leurs surfaces agricoles et boisées. En revanche d'autres villages ont connu une augmentation des surfaces cultivées.

### **3- Les causes du changement.**

Plusieurs facteurs physiques et humains peuvent être à l'origine de ces évolutions. Pour cela nous allons traiter quelques facteurs qui peuvent avoir un rôle direct ou indirect dans ce changement comme les facteurs climatiques, la guerre civile, l'urbanisme...

#### **3.1- les variations climatiques.**

Les précipitations sont les facteurs principaux qui alimentent les sources en eaux, par la pluie, la grêle ou bien encore la neige. La situation du Liban dans la partie Est du bassin méditerranéen fait de lui un pays dominé par le climat méditerranéen. Ce climat se distingue par

une longue période sèche (5 mois), en allant du mois de Mai au mois de Septembre, et une période pluvieuse le reste de l'année.

Les précipitations dans la région d'étude ont été étudiées à partir d'une carte pluviométrique à l'échelle de 1/200 000. Nous avons pu noter que la pluviométrie de notre région d'étude variait entre 600 et 1 200 mm, et peut même dépasser les 1 200 mm dans les hautes altitudes. Si nous changeons d'échelle (de 1 /200 000 à 1/20 000), et selon les statistiques de l'Institut National des Recherches Agronomiques de Tall Amara et du CNRSL, nous constatons que la quantité des pluviométries, dans notre région d'étude, varie entre 600 et 700 mm. Cette quantité est distribuée sur une moyenne qui avoisine les 70 jours/année.

D'après les données de pluviosités, de plusieurs stations météorologiques (Tall Amara...), nous constatons une diminution remarquable de la pluviosité dans la plaine de la Bekaa. Cette diminution influence négativement les sources d'eau et les nappes phréatiques. Cela contribue à un changement dans le couvert du sol et surtout dans l'agriculture. C'est pour cela que les agriculteurs s'orientent vers des cultures qui consomment moins d'eau et évitent surtout les cultures qui exigent un système d'irrigation pendant les mois secs. Nous avons remarqué que pendant les années où les précipitations diminuent, les agriculteurs cultivent de l'orge, qui exige moins d'irrigation que les pommes de terre ou le blé.

En ce qui concerne la température, selon la comparaison de ces données, nous avons constaté une augmentation de température qui varie entre 1 et 2 °C.

Après avoir enquêté auprès de certains agriculteurs, nous avons constaté que ces derniers, au cours des années passées, ont commencé à éviter les maladies de certains types de cultures (pommes de terre), causées par une température élevée, en les remplaçant par d'autres cultures plus résistantes, afin d'éviter toutes pertes de récoltes et ainsi maximiser la production.

### 3.2- l'extension des tissus urbains.

L'urbanisme a joué un rôle remarquable dans le changement du couvert du sol dans notre région d'étude. Il est important de noter que les 728 hectares d'augmentation des surfaces urbanisées exigent d'autres surfaces, comme les réseaux routiers, les égouts, et d'autres constructions, qui contribuent à diminuer encore davantage les surfaces agricoles. Sans oublier que cette évolution posera des problèmes de capacité d'infrastructures (SDATL, 2004). Ce développement est le résultat de l'accroissement démographique et de la migration (notamment les nomades qui se sont installés avec leur bétail), du développement des services, des constructions et des activités économiques. Mais ce développement urbain, qui signifie l'intégration de nouvelles structures et de nouveaux habitants, ainsi que le développement du logement, n'est pas toujours positif, surtout en ce qui concerne l'utilisation du sol et de l'agriculture.

Dans la région d'étude les processus socio-économiques conduisent à des situations nouvelles :

- Les conflits d'usages des sols : une consommation d'espaces au détriment d'activités existantes (agricole notamment) (Jenkins *et al.*, 2005), comme pour les constructions des nouvelles routes qui traversent des parcelles agricoles. Cela n'est pas toujours avantageux pour les propriétaires qui louent leurs parcelles.
- les transformations du paysage : La disparition des surfaces agricoles, pour être remplacées par des usines, des bâtiments ou des maisons. C'est une menace sur la qualité paysagère, la biodiversité, la qualité de l'eau ; ce qui entraîne donc des coûts environnementaux et les problèmes d'érosion des sols mal stabilisés par des nouvelles activités.
- Le développement et la croissance de la population paysanne vont créer, tôt ou tard, une pénurie de terre, surtout à usage agricole (Jenkins *et al.*, 2005).

D'après cela, nous constatons que l'urbanisation a joué un rôle essentiel dans le changement du couvert du sol dans notre région d'étude. Il est important de noter que l'augmentation des surfaces urbanisées doit se doter d'infrastructures, comme les réseaux routiers, et d'autres constructions, qui contribuent à diminuer encore davantage les surfaces agricoles.

### **3.4- Rôle des régimes fonciers.**

Les exploitants agricoles varient entre locataires et propriétaires. Une grande partie de cette région agricole appartient à différentes grandes familles, qui louent ces parcelles à des exploitants agricoles. D'autres propriétaires sont eux-mêmes les exploitants (El Hage Hassan et *atl.*, 2011 ; 2012). Les parcelles agricoles exploitées par des locataires ont tendance à évoluer d'une année sur l'autre selon le changement des gérants, ce qui implique un changement du couvert végétal.

Nous remarquons aussi que les exploitants locataires avec un bail annuel, font des cultures de courte durée pour récolter dès les mois suivants : ceci afin d'amortir au maximum le coût de cette location. Nous remarquons également que souvent, ces derniers cultivent des cultures maraîchères et des terres arables, en cultivant la parcelle agricole deux fois dans l'année, afin d'optimiser le rendement et vendre plus.

En revanche, les propriétaires - exploitants agricoles, ont tendance à cultiver des horticultures, qui donnent des productions quelques années suivant la plantation, ainsi qu'une seule saison de récoltes (pommes, vigne...).

### **3.5- Rôle de la guerre.**

Durant la période de la guerre libanaise, de 1975 jusqu'à 1990, le secteur agricole au Liban a subi divers problèmes comme l'absence d'investissement et la perte d'une grande partie de son infrastructure. Les pertes ont été estimées à 600 millions de dollars en 1982. A ce

moment là, le nombre de terrains incultes a atteint son apogée, les terrains abandonnés ont été estimés à 215 000 hectares. Jusqu'en 1975, la surface cultivée était de 360 000 hectares. En 1984, elle est réduite de 145 000 hectares, pour atteindre les 215 000 hectares (Hamzé, 1991).

Cette diminution en surfaces cultivées a entraîné une chute dans l'exportation et une augmentation dans l'importation des produits agricoles. A partir de l'année 1990, date de la fin de la guerre civile au Liban, le développement du secteur agricole a été remarqué à partir des traitements de l'image satellitaire, qui montre la diminution des terrains incultes et le changement du mode d'occupation du sol. C'est pour remédier à ces carences en cultures, que le nouveau gouvernement, a décidé de revaloriser l'agriculture, afin de diminuer les importations et augmenter les exportations, et ainsi mieux subvenir aux besoins de la population.

#### **4- Conclusion**

Le système d'information géographique et les images satellitaires sont capitaux pour notre étude. Sans ces méthodes, nous aurions été dans l'impossibilité de faire ces croisements et de voir les évolutions du couvert du sol. La région d'étude a connu un développement de certaines cultures comme les vergers, et une perte des terres arables (céréales) et des surfaces cultivées en vignes. Plusieurs facteurs socio-économiques associés ont contribué majoritairement à l'évolution du couvert du sol, sans oublier le facteur climatique. Parmi ces facteurs, nous pouvons citer le développement des surfaces urbanisées qui s'étendent de plus en plus au détriment des terres agricoles. En revanche, les autres facteurs comme la demande du marché national ou international, le régime foncier, le rôle de l'Etat et le coût de la main d'œuvre, jouent un rôle primordial dans le changement du type de culture.

Selon la différence entre propriétaires exploitants et locataires exploitants, nous remarquons une variation dans l'évolution du couvert du sol. Tandis que la rotation agricole suivie par les locataires implique

une évolution permanente dans le couvert végétal, nous remarquons qu'un certain nombre de parcelles agricoles gérées par leur propriétaire a tendance à être moins dynamique à court terme dans l'évolution du couvert végétal. Mais ce qu'il est important de noter, c'est que les vergers ont une durée de vie qui varie entre 5 et 8 ans. Les exploitants agricoles propriétaires réagissent selon leurs projets: soit ils modifient leurs types de cultures selon la demande du marché, soit ils poursuivent les mêmes cultures, si la demande du marché existe toujours, comme le raisin de cuve pour la fabrication du vin. Certains d'entre eux préfèrent louer leurs terres.

Il apparaît aussi que dans les moments de crise de marché, les exploitants ont souvent tendance à changer de type de culture afin de limiter les pertes financières.

Les grands changements dans l'occupation du sol et notamment pour l'agriculture, confirment l'évolution rapide des besoins du marché et l'ouverture aux échanges vers l'extérieur. Le contexte interne, propre à la situation économique et politique du Liban, intervient aussi dans ce sens. Le processus lié à la production agricole et à l'emprise de l'agriculture sur l'espace rural nous conduit à proposer plusieurs types de situations pour optimiser le potentiel agricole.

Enfin, nous dirons que nous observons de grands changements dans le couvert du sol : le Liban est en perpétuelle évolution et c'est pour cela il serait utile de proposer plusieurs cartes d'optimisation des cultures et de choisir parmi ces cartes la plus convenable, selon nous, et qui prend en compte les facteurs socio-économiques précités ainsi que la rentabilité et la protection de l'environnement.



## Bibliographie

- **Nomenclature CORINE Land Cover Europe, 2006** - produite dans le cadre du programme européen de coordination de l'information sur l'environnement CORINE.
- **El Hage Hassan H., 2011**- Les apports d'un S.I.G. dans la connaissance des évolutions de l'occupation du sol et de la limitation du risque érosif dans la plaine de la Bekaa (LIBAN). Exemple d'un secteur du Bekaa el Gharbi. *Thèse soutenue le 27 juin 2011. Université d'Orléans*. 381p.
- **El Hage Hassan H., 2012**- Optimisation des cultures à l'aide d'un Système d'Information Géographique afin de limiter la sensibilité du sol à l'érosion hydrique dans la plaine de la Bekaa (Liban). *Communication publiée dans la revue Géoscience*. 26p.
- **Hamzé M., 1991**- L'impact des biotechnologies sur l'agriculture au Liban. *CIHEAM-IAMM-Options Méditerranéennes* n°14, pp.137-140.
- **Jenkins C., Kempf M., Tournier A., Barrere B., Moutet P., Sanaa N., 2005**- Qu'est ce que l'urbanisme durable? Séminaire Technique des 17 et 18 mai 2005, Munster, *Maison du Parc, Parc naturel régional des Ballons des Vosges*. 66 p.
- **Masri T., Khawli M., Faour G. 2001**- Les facteurs de changement d'utilisation et de couvert des sols et les ressources en eau au Liban, étude sur 40 ans. *CNRSL*, 9p.
- **Montigaud J.C., Sabra R., Chahine H. et Henri P., 2004**- Les filières fruits et légumes frais au Liban : structures, fonctionnement et perspectives. *AGRO.M et INRA, 2 place Viala, 34060 Montpellier cedex 1, F* .ISBN : 2-7380-1172-1.60 p.
- **SDATL, 2004** - *Schéma* directeur d'aménagement du territoire libanais (SDATL), *Rapport final*, mai, IAURIF-Dar al-Handasah, 233 p. + cartes hors texte.