



Effect of complexing agent on the structural properties of Bi_2S_3 thin films prepared by CBD technique

N. SELMANE ^a, N. E. HAMDADOU ^b, M. BOUHMDI ^b, D. CHALABI ^a, A. SAIDANE ^a

a - CaSiCCE Laboratory

b - Materials and Thin Films Physics of Electronic Laboratory. ENSET, BP 1523 EL-M'naouer, Oran 31000, Algeria

**Corresponding author: naceur_af@yahoo.fr

Abstract - Bi_2S_3 thin films have been prepared by chemical bath deposition method using bismuth nitrate $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$ and thioacetamide $\text{CH}_3\text{-CS-NH}_2$ (TAM) as a sulfide ion source, The various preparative parameters were optimized to obtain good quality thin films, Bi_2S_3 thin films were prepared without complexing agent and with the Na_2EDTA as a complexing agent on an amorphous glass substrate, The structural characterization and the effect of the complexing agent on the properties of Bi_2S_3 have been carried out by the X-ray diffraction analysis (XRD)., X-ray diffractograms indicate that the films are polycrystalline in nature.

Index Terms - Bismuth, Chalcogenides, Chemical deposition Thin films, Thioacetamide.

I. Introduction

A large amount of work has been devoted to the study of binary semiconductors of the type V-VI in view of their potential applications in field of optoelectronic devices, thermoelectronic power. Bismuth sulphide appears to be a suitable material, whose band gap energy $E=1.7$ eV, for solar applications [1] particularly solar energy conversion devices.

The study of structural properties of Bi_2S_3 thin films is interesting in view of the importance of this material for photoconductor devices. Recently there has been considerable interest in developing new polycrystalline thin film semiconductors using various techniques. Amongst them, chemical bath deposition method has a special significance, as this method has been proved to be the least expensive, low temperature method and also non-polluting. No sophisticated technologies such as photolithography, diffusion, ion implantation etc. are required to achieve a material with the desired properties.

The method is also suitable for making films of any configurations. Chemical deposition of metal sulfide thin films can be carried out using different sulfide ion sources, namely, inorganic sources such as sodium thiosulfate or organic sources such as thiourea, thioacetamide (TAM) and its higher derivatives.

The rate of release of sulfide ion changes from source to source and, accordingly, thin film morphology and crystallinity are affected [2]. In many works sodium thiosulfate was used as sulfide ion source for Bi_2S_3 film deposition from aqueous [3] and non-aqueous [1] acidic baths. It was found that all the films were amorphous in nature.

In this present investigation, room temperature preparation of Bi_2S_3 thin films from an aqueous bath has been carried out using TAM as sulfide ion source. The disodium salt of ethylene diamine tetraacetic acid (Na_2EDTA) is used as complexing agent. Preparative parameters such as pH, bath composition and deposition time are optimized. Characterization of the films has been carried out using X-ray diffraction (XRD),

II. Equation Aux Dérivées Partielles En Traitement D'images

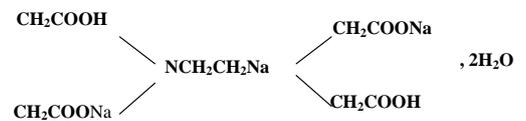
1.Preparation of Bi_2S_3 thin films

a. Without the complexing agent

A 10 ml of 0.1 M $Bi(NO_3)_3$ solution is taken in test tube and volume of TAM (0.1 M) are added to them. The solution mixture is stirred for 1-2 min; the pH of the mixture is between 1 and 2.

The glass substrates are dipped vertically in the solutions. The depositions are then carried out under unstirred conditions for 6 h.

The colour of the solution changes from pale yellow to brown and then brown black gradually. After depositions, the films are washed with doubly distilled water and dried in air.



a. With the complexing agent

Similarly with the precedent 0.1M $Na_2EDTA(10ml)$ is added for 0.1 M $Bi(NO_3)_3$ (10 ml), 0.1 M TAM (12 ml), The solution mixture is stirred for 1-2 min The glass substrates are dipped vertically in the solutions and the deposition is carried out under unstirred conditions for 6 h (Fig.1)

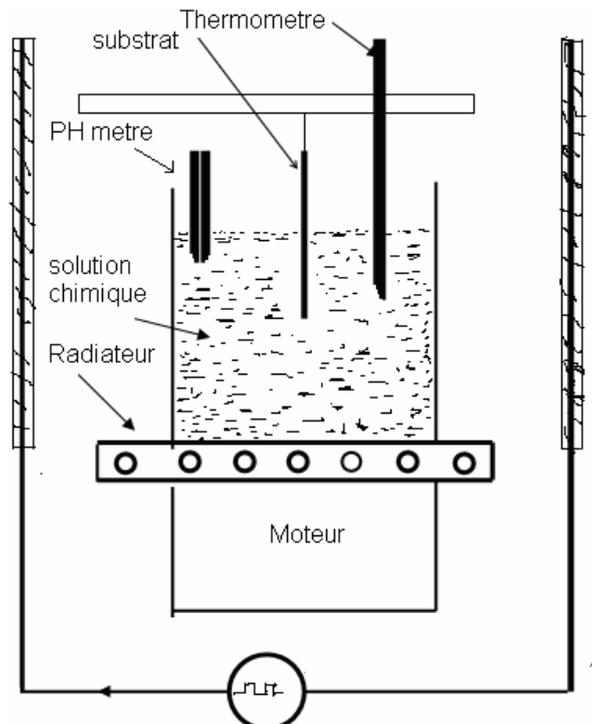
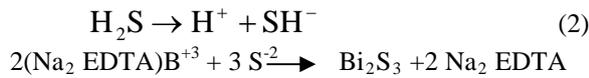
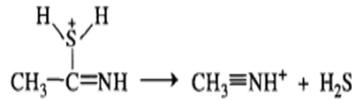
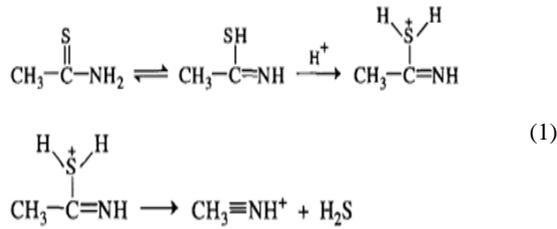


Fig.1. Schematic representation of the CBD method.

III. Results and discussion

a. Formation film mechanism

A reaction mechanism for Bi₂S₃ films deposited from an alkaline TAM bath is:



The formation of Bi₂S₃ films is based on the slow release of Bi³⁺ and S²⁻ ions in aqueous medium and then subsequent condensation on the substrate. In this study Bi³⁺ is supplied by the ionization of Bi(NO₃)₃ and S²⁻ by the decomposition of thioacetamide in a non-aqueous acidic solution. The deposition of Bi₂S₃ occurs when the ionic product of Bi³⁺ and S²⁻ exceeds the solubility product of Bi₂S₃. Ions form the Bi₂S₃ nuclei condense onto the substrate and in the solution and grow with time to give film and precipitate respectively. The main factors which affect the solubility product are temperature, solvent and particle size [4]. In the present case, the bath temperature and solvents are constant and therefore the change of solubility product is due to the change in particle size of the deposited material.

The formation of a solid phase from a solution involves two steps; which are nucleation and particle growth. The size of the particles of a solid phase is dependent upon the relative rates at which these two competing processes take place. A state of supersaturation (S solubility product/ ionic products) may be obtained by lowering the temperature of an unsaturated solution and formation of the solute in solutions at a fixed temperature.

The rate at which nuclei form in a solution is dependent on the degree of supersaturations. The rate of nucleation increases exponentially in highly supersaturated solution. Second state involves.

b. Bi₂S₃ thin film characterization

The structural characterization of the films was made using a Siemens D50000 X-ray diffractometer using Ni filtered CuK α radiation ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$). We have carried out X-ray

diffraction spectra of deposited films. The typical diffraction spectrum is represented in Fig. 2. This spectrum carried out in the $\theta - 2\theta$ configuration, corresponds at the thin films as deposited on glass substrate.

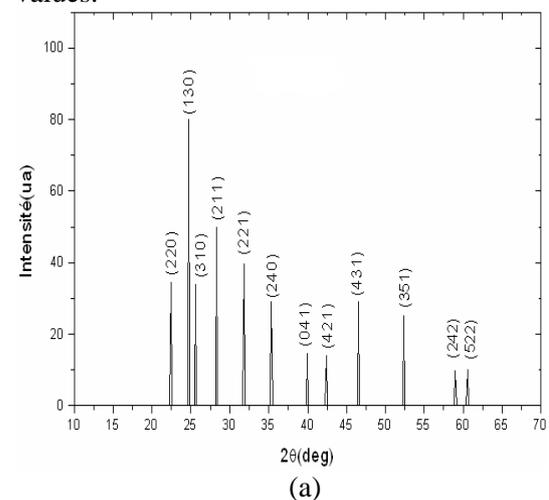
The diffraction spectrum indexation has been made by comparing crystallographic data of deposited films (the measured inter-reticular distances d_m and their diffracted intensities I_m) with that of the JPCDS 170320 card. We have observed a satisfying coherence between our results and card data. For the orthorhombic lattice parameters evaluation, we have used the quadratic relation as

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (3)$$

In this relation, (h; k; l) are Miller indices of reflect or planes appearing on the diffraction spectrum and d_{hkl} their inter-reticular distances. The Grain size of Bi₂S₃ film particles was calculated by using Scherrer's formula.

In order to reveal the structural aspects of Bi₂S₃ thin films, XRD patterns shown in Fig. 2 are studied. Figs. 2 (a) and (b) show Bi₂S₃ thin films deposited without Na₂EDTA and with it, respectively. Films show polycrystalline nature.

Bi₂S₃ thin films collected from the deposition bath are shown in (Fig.2), The X-ray spectrum observed for Bi₂S₃ film suggests a fine grain structure, the Bi₂S₃ film showed improvement in grain size and crystallographic planes of orthorhombic cell structure with lattice constants as $a_0 = 11.150 \text{ \AA}$, $b_0 = 11.254 \text{ \AA}$ and $c_0 = 3.9647 \text{ \AA}$, Table 1 depicts the comparison of observed 'd' with standard 'd' values from ASTM data card. The 'd' values of the Bi₂S₃ films are in good agreement with standard 'd' values.



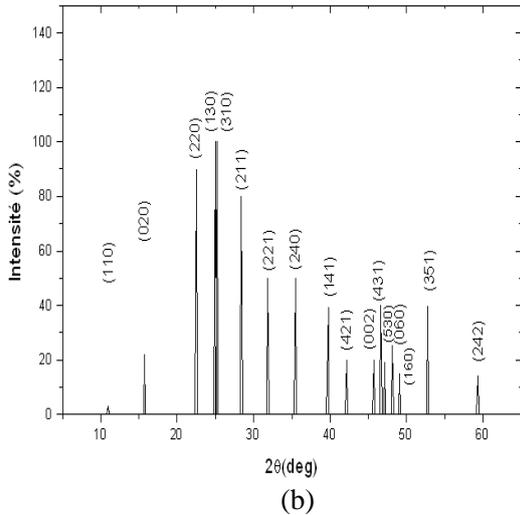


Fig.2. X-ray diffraction of Bi₂S₃ of (a) thin film deposited without Na₂EDTA, (b) thin film deposited with Na₂EDTA complexing agent.

It is apparent that the local particle overgrowth is reduced due to addition of Na₂EDTA.

The grain size calculated by Scherer's method gives the values as 4.7 and 9.2 nm for film with and without Na₂EDTA, respectively.

It shows the decrease in grain size due to the complexing agent.

This is attributed to slow release of Bi⁺³ ions from the complex. The average crystallite size has been calculated using Scherer's relation as

$$D = K \frac{\lambda}{\beta \cos \theta} \tag{4}$$

Using the full-width at the half-maximum of the more intense diffraction peak (the peak's value is (130) for film with and without Na₂EDTA) where λ is the wavelength of the X-ray used, k is a constant and is equal to 0.9 for semiconducting material, and β is the pure integral width of the line profile.

The pure integral width of the profile from thin films was obtained by subtracting the geometrical integral width from the observed integral width of the films.

Table 1. Comparison of standard and observed 'd' values of Bi₂S₃ thin films

Sample nature	Observed "d" (Å)	Standard "d" (Å)	I /I _{max} (%)	hkl
Film deposited without Na ₂ EDTA	8,06512407	7,93618904	3	1 1 0
	5,62591294	5,56629038	22	0 2 0
	3,94843406	3,96722801	89,97	2 2 0
	3,56455345	3,5695088	100	1 3 0
	3,53202806	3,53020218	100	3 1 0
	3,13767821	3,13700481	80	2 1 1
	2,80517116	2,81216368	50	2 2 1
	2,52972085	2,52113492	50	2 4 0
	2,27138695	2,25821582	39,29	1 4 1
	2,1419832	2,11818732	20	4 2 1
	1,98244801	1,99018215	20	0 0 2
	1,94773013	1,95313788	39,85	4 3 1
	1,92603891	1,919129	19	5 3 0
	1,88797631	1,88411114	25	0 6 0
	1,85435725	1,85712908	14,8	1 6 0
Film deposited With Na ₂ EDTA	1,73330933	1,73811995	39,58	3 5 1
	1,55615218	1,56211343	14	2 4 2
	3,96183717	3,96724435	9	1 2 0
	3,59734741	3,59721301	34,49	2 2 0
	3,47859465	3,53021512	80	1 3 0
	3,15386505	3,1182195	34	3 1 0
	2,81234027	2,81216573	50	2 1 1
	2,53847421	2,52113492	39,6	2 2 1
	2,25431665	2,25816948	29	2 4 0
	2,13013661	2,12152075	14,5	0 4 1
	1,9497317	1,95313788	14	4 2 1
	1,74592022	1,73811721	29	4 3 1
	1,56495063	1,56211184	24,99	3 5 1
	1,52776676	1,53289262	9,7	2 4 2
	1,43712687	1,43596416	29	5 2 2

The Bi₂S₃ thin films prepared in this work present in horizontal preferential orientation because the majority of peaks are hk0 forms; table 2 gives a more information for the two Bi₂S₃ thin films such as the rate of the horizontal (hk0 %)-and vertical (00l%) orientation and the grain size.

Table2- Some important parameters obtained such as the grain size and the rate of preferential orientation of the Bi₂S₃ thin films.

Bi ₂ S ₃ film	Grain size(G) (Å ⁰)	F _{hk0} (%)	F _{00l} (%)
without Na ₂ EDTA	92	51	5
With Na ₂ EDTA	47	50	-

IV. Conclusion

This work shows that it is possible to prepare Polycrystalline thin films of Bi_2S_3 using chemical bath method at a room temperature.

Bi_2S_3 thin films can be deposited from a TAM acidic bath. The grain size obtained for the film deposited without complexing agent is found to be higher than the films deposited with the agent complexingmg; the values as 4.7 and 9.2 nm for film with and without Na_2EDTA .

The Na_2EDTA complexing agent reduces grain size considerably. The X ray diffraction measurements show that these films exhibit an orthorhombic crystalline structure.

V. References

- [1] C.D. Lokhande, R.S. Mane, B.R. Sankapal, *A chemical method for the deposition of Bi_2S_3 thin films from a non- aqueux bath*, Thin Solid Films 359 (2000) P1366-140497 (2006) 58 – 64.
- [2] C.D. Lokhande, B.R.SanKapal, R.S .Mane, H.M.Pathan, *structural charcterization of chemically deposited Bi_2S_3* applied surface science187 (2002) P108 –115.
- [3] J.D. Desai, CD. Lokhande, *Chemical deposition of Bi_2S_3 thin films from thioacetamide bath*, Materials Chemistry and Physics 41(1995) P98-103.
- [4] Z. K ebbab, N. Benramdane, M .Latreche, H. Tabet, M.Boukhelfa, A. Bouzidi, *Structural and optical properties of spray-pyrolysed Bi_2S_3 thin Film*, Mater. sci .eng B64 (1999) P84-87.
- [5] Z. Kebbab, M. Medles, N.Benramdanem, A. Bouzidi, A, Nakrela, H.Tabet-Derrazm *optical and electrical properties of Bi_2S_3 films deposited by spray pyrolysis*, Thin Solid Films 479(2006)58-64.



Kinetic scheme of the nonequilibrium discharge in Oxygen

K.HAMEURLAINE, A.BELASRI

Laboratoire de Physique des Plasmas, Matériaux Conducteurs et leurs Applications,
U.S.T.O.MB Faculté des Sciences. Département de Physique, B.P 1505 EL M'Naour, 31000 Oran, Algeria

***Corresponding author:* k.hameurlaine@yahoo.fr

Abstract: The purpose of this paper to study, through zero-dimensional model, in the pure oxygen. A comprehensive simplify model of ozone generation in photo-triggered discharge is presented the plasma is represented by a resistance inversely proportional to the electron density. Time variation of the electron density is obtained by integrating the transport equations coupled to the heavy-species kinetics and to the external circuit. The developed kinetic scheme is composed of nine species and twenty one reactions enabled us to study the temporal variation of species created at the moment of discharge. Kinetic analysis is made to study the relative importance of various reactions, the results indicate that the neutral atom of oxygen is the most significant species for the generation of O₃, calculated discharge current and voltage are also presented.

Keywords: Ozone, kinetic reactions, numerical modelling, photo-triggered discharge.

I. Introduction

The generation of a plasma at atmospheric pressure in air is attractive for various technological applications, such as sterilization or decontamination [1,2], electromagnetic reflectors and absorbers [3] and plasma processing of materials including electron, aerospace and biomedical devices, production of ozone [4]. Most ozone applications derive from its strong oxidant properties and it is mainly used as a bactericide and decolorant [5],[6], Bleaching processes [7].

Ozone is generated whenever an electrical discharge occurs in a high-energy electric field between two conductors separated by a dielectric and a discharge gap, and with a gas of either pure oxygen or air flowing between them. For many years the silent electric discharge technical [8],[9] has been commonly used in the generation process, but other approaches now being considered include, surface discharge [10],[11] pulsed streamer discharge (PSD) [12],[13], corona discharge [14],[15]. The study of corona discharge involved both physical and chemical aspects. as expressed by Loiseau et al [16], numerous models of corona discharge have been proposed. In [17],[18].

Any modelling must include a sufficient number of species and reactions if it aspires to predict the species distribution created by gas discharges. In pure oxygen, about 200 reactions between electrons, ions and neutrals have been reported [19]. Usually, numerical models are based on a subset of species and chemical reactions between them to make the calculation tractable. It is the case of the work to Bladur Eliasson [21] or it has to consider approximately 70 reactions between 16 various species.

II. Physical Model

In this paper, a physical_chemical model of

Photo-triggered discharge in pure oxygen is presented. The discharge is considered as stationary in time. Our work is based on a model zero dimensional; it includes the ionization, attachment, and other physical processes as well as the principal chemical reactions. The use of the model zero dimensional allows the simple study of the kinetics of the neutral, ionized species, and excited in oxygen.

The numerical simulation of photo-triggered discharge is based on zero-dimension model constituted for three system of equations coupled between them: external circuit equation, gas composition, Boltzmann equation, kinetic scheme for species (figure1).

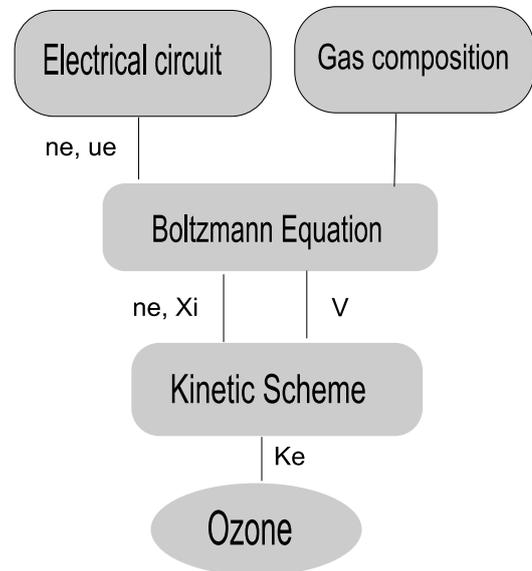


Fig.1. Schematic of the model

Where, n_e , X_i , μ_e , K_e , V are respectively electron density, species density, electron mobility, rate reaction, and voltage.

In the zero-dimensional model, the plasma is represented by resistance R_p , and it is regarded as a homogeneous positive column whose conductivity is proportional to electron density. Thus, the model consists of an external electric circuit RLC (figure 2), charged by variable resistors $R_p(t)$ representing resistance of the discharge of the gas obtained by the equation.

$$R_p(t) = \frac{d}{A e n_e \mu_e} \quad (1)$$

Where e , n_e , μ_e are the electron charge, the electron density and the mobility, respectively.

A represents the electrode area and d the distance between the electrodes.

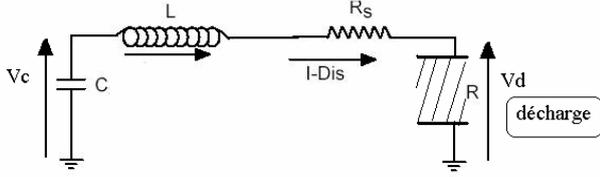


Fig.2. Schematic model of the discharge and external circuit.

Table1. Discharge parameters in dry O₂ at atmospheric pressure and Temperature T = 300°K.

Inter-electrode distance (Cm)	1
Surface electrodes (Cm ²)	50
Voltage (kV)	20.5
Initial electron density (Cm ⁻³)	10 ⁸
Electron temperature (eV)	1.5

The electron density is obtained by solution of a continuity equation:

$$\frac{dn_e}{dt} = S_e^+ [E/N] - S_e^- [E/N] \quad (2)$$

Where E/N is the reduced electric field, n_e is the electron density and (S_e⁺ - S_e⁻) is the source term of the continuity equation which takes account of all

the processes of loss and creation (ionisation by stage, Penning effect, excitation, kinetic of the neutral species)[24].

III. Reaction Scheme

The model involves nineteen reactions between ten species including electrons in the pure oxygen (table2).

Table2. Species considered in the model.

Electrons	e
Neutral	O, O ₂ , O ₃
Excited species	O ₂ [*] , O [*]
Ions	O ⁺ , O ⁻ , O ₂ ⁻ , O ₂ ⁺

The concentration of molecular oxygen is assumed to be constant.

The rate constants of neutral-neutral reactions in the proposed mechanism were cited from relevant literature (table 3).

For electron impact reactions, the rate constants were obtained from the integration of electron collision cross-section over an electron energy distribution function (EEDF) solved and calculated by the BOLSIG code [29]. The main reactions lead to the formation and destruction of the ozone with the neutral species.

Table 3. Ozone synthesis reactions adopted in the model (T_e , T are the electron and gas temperature), rate Constants are in the unit of $\text{cm}^3/\text{mole}/\text{sec}$ for two-body reactions, and $\text{cm}^6/\text{mole}^2/\text{sec}$ for three-body reactions

Electron impact reactions	Rate constants	Ref.
$e + O_2 \rightarrow O_2^+ + e + e$	$9 \times 10^{-10} T_e^{0.5} \exp(-12.6/T_e)$	(Lee et al., 1994)
$e + O_2 \rightarrow O_2^* + e$	$1.7 \times 10^{-9} \exp(-3.1/T_e)$	(Kogelschatz et al., 1988)
$e + O_2^+ \rightarrow O + O$	$5.2 \times 10^{-9}/T_e$	(Kossyi et al., 1992)
$e + O_2 \rightarrow e + O + O$	$4.2 \times 10^{-9} \exp(-5.6/T_e)$	(Lee et al., 1994)
$e + O_2 \rightarrow O^- + O$	$8.8 \times 10^{-11} \exp(-4.4/T_e)$	(Kogelschatz et al., 1988)
$e + O \rightarrow O^+ + e + e$	$9.10^{-9} \cdot T_e^{0.7} \exp(-13.6/T_e)$	(Lee et al., 1994)
$e + O \rightarrow O^* + e$	$4.2 \times 10^{-9} \exp(-2.25/T_e)$	(Lee et al., 1994)
$e + O^* \rightarrow O + e$	8×10^{-9}	(Lee et al., 1994)
$e + O^* \rightarrow O^+ + e + e$	$9.10^{-9} \cdot T_e^{0.7} \exp(-11.6/T_e)$	(Lee et al., 1994)
$e + O_2^* \rightarrow e + O_2$	$5.6 \times 10^{-9} \exp(-2.2/T_e)$	(Kogelschatz et al., 1988)
$e + e + O_2^+ \rightarrow e + O_2$	$1.10^{-19} \times (0.026/T_e)^{4.5}$	(Eliasson et al., 1987; Kossyi et al., 1992)
$e + O_2^+ + O_2 \rightarrow O_2 + O_2$	$6.10^{-27} \times (0.026/T_e)^{1.5}$	(Eliasson et al., 1987; Kossyi et al., 1992)*
$e + O_2^* + O_2 \rightarrow O_2^- + O_2$	1.9×10^{-30}	(Eliasson et al., 1987)
Neutral-neutral reactions	Rate constants	Ref.
$O + O_2 + O_2 \rightarrow O_2 + O_3$	$6.9 \times 10^{-34} \times (300/T)^{1.25}$	(Eliasson et al., 1987; Kossyi et al., 1992)*
$O_3 + O_2 \rightarrow O_2 + O_2 + O$	$7.3 \times 10^{-10} \times \exp(-11400/T)$	(Eliasson et al., 1987)
$O + O_3 \rightarrow O_2 + O_2$	$1.8 \times 10^{-11} \times \exp(-2300/T)$	(Eliasson et al., 1987)
$O + O + O \rightarrow O_2 + O$	$6.2 \times 10^{-32} \times \exp(-750/T)$	(Eliasson et al., 1987)
$O_2^* + O_2 \rightarrow O_2 + O_2$	$2.2 \times 10^{-18} (T/300)^{0.8}$	(Eliasson et al., 1987; Kossyi et al., 1992)
$O_2^* + O \rightarrow O_2 + O$	4×10^{-16}	(Eliasson et al., 1987; Kossyi et al., 1992)*

K_i [25] represent the rate of reactions, T temperature of the gaz, $T_g = 300 \text{ K}^\circ$ et T_e : electronic temperature, $T_e = 1.5 \text{ eV}$.

IV. Results and Discussion

Figure 1 show the effects of reduced field (E/N) on ionization coefficient (α) and attachment coefficient (η). These two coefficients could be obtained from the BOLSIG output. High electron

density could be achieved when the ionization coefficient was greater than the attachment coefficient. That is, an E/N of approximately 110 Td is critical for the 100% O_2 plasma.

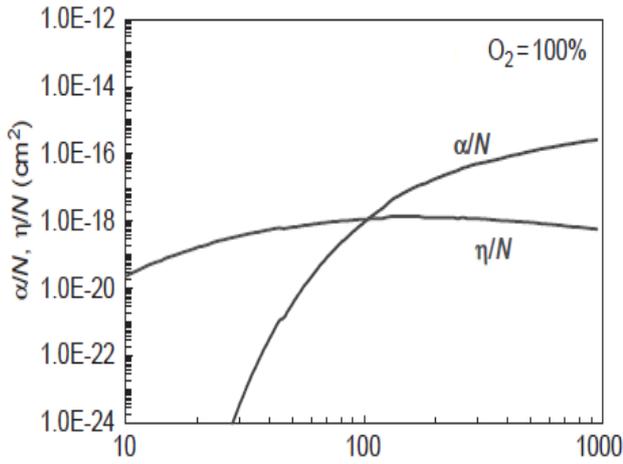


Fig.3. Effects of reduced (E/N) on ionization coefficient (α) and attachment (η) for oxygen.

For pure gas of oxygen, the tension applied at the boundaries of the discharge is $V=20.5\text{kV}$, initial density of preionization equal to 10^8cm^{-3} , and inter electrode distance of $d = 1\text{Cm}$.

Figure (4) represents the temporal variation of the terminal voltage of the capacity to the sheath and dielectric V_C and of the tension of the discharge V_D , the tension V_C starts to increase until reaching a maximum which corresponds to the tension applied, while the discharge voltage V_D decrease during the formation of plasma to reach a quasi null value.

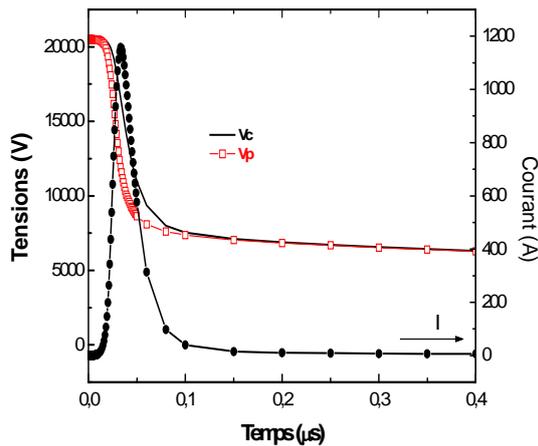


Fig.4. Temporal variations of the capacity voltage V_c , the discharge voltage V_p and the current discharge for an applied voltage of 20.5 kV ($T = 300\text{ °K}$, $P = 760\text{ Torr}$).

The temporal variation of the discharge current is shown too on the same figure (4). When the breakdown of gas occurs the current starts to reach a

maximum value of $1,17\text{ kA}$, the voltage of the discharge presents a zone of 55 kV are spread out over approximately 100 ns and correspondent with a reduced field of approximately 80 Td ($1\text{ Td}[V.cm^2]=10^{-17}$) see figure 5.

The power density dissipated by electrons in each element of plasma is shown in figure 6, the power peak reaches a maximum of 29 kW .

The time dependence of plasma resistance and electron resistance are reported in figure 7. The plasma resistance diminution, observed in the first step of the impulse, is followed by the electron density increase. This is due to electron multiplication during the discharge. As the electron number density reaches a maximum value, the plasma resistance was characterized by a low value, figure 7.

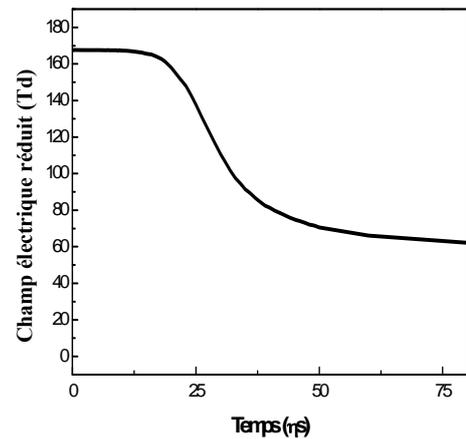


Fig.5. Temporal evolution of the electronic field reduced E/N in pure oxygen.

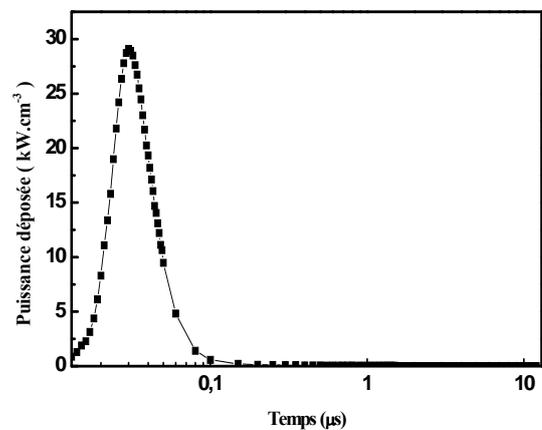


Fig.6. Power density peak deposited by electrons.

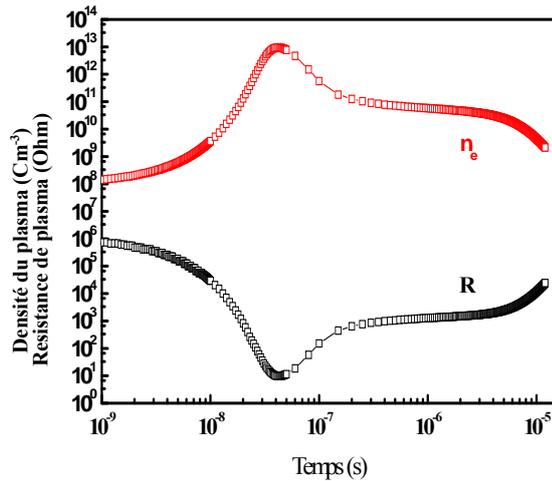


Fig.7. Time variations of electron density and plasma resistance in pure oxygen.

Figure (8) represents temporal distribution of the various concentrations of neutral and ionized species in the pure oxygen with a temperature of 300K° , and a pressure of 380 Torr. The concentration of the neutral species relating to the initial quantity of molecular oxygen $[\text{O}_2]$ of $\sim 2.736 \times 10^{19} \text{cm}^3$.

The most significant reactions leading to the formation of ozone is the dissociation of molecular oxygen by the electronic impact, in two atoms of oxygen with a concentration of: $[\text{O}] = 9.57 \cdot 10^{12} \text{cm}^{-3}$ at the moment, $t = 14 \text{ns}$, this atom of oxygen enter in collision with two molecule of oxygen producing ozone, it appears with a concentration of $[\text{O}_3] = 28 \cdot 10^5 \text{cm}^{-3}$ at moment, $t = 13 \text{ns}$ it reaches a maximum of $[\text{O}_3] = 10^{11} \text{cm}^{-3}$ at moment $t = 59 \text{ns}$, once ozone is formed it returns in collision with an atom of oxygen or a molecule of oxygen to dissociate it, it reaches a minimal value that from a time of $t = 11 \mu\text{s}$, ozone appears with a concentration of $\sim 14 \times 10^8 \text{cm}^{-3}$.

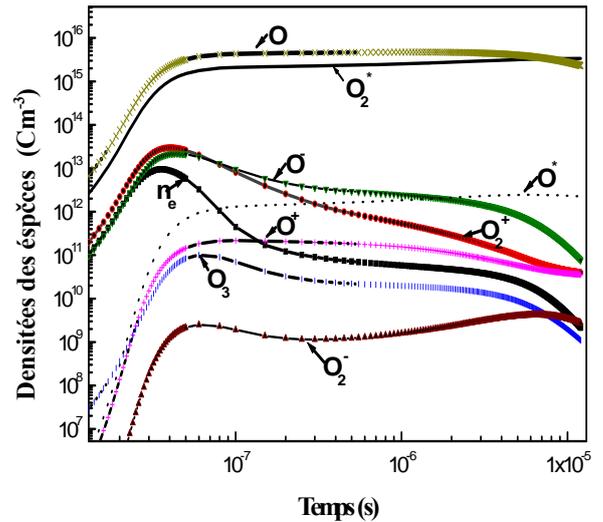


Fig.8. Temporal variations of various chemical species in pure gas of oxygen in a photo-triggered discharge.

V. Conclusion

This work is a zero-dimensional simplified study of a photo-triggered discharge in the pure oxygen to generate ozone. This model is very effective for the study of the electric characteristics and kinetic of a plasma discharge. It includes three strongly coupled parts: equations of the external circuit, the equation of Boltzmann and chemical equations the temporal variations of the concentration of the electrons, ions and of the excited atoms of oxygen are obtained by integration of the electronic transport equations, coupled with the kinetics of the heavy species and the external circuit. The model can study the influence of the kinetics of plasma on the electric characteristics of the discharges.

VI. References

- [1] Laroussi M 1996 Sterilization of contaminated matter with an atmospheric pressure plasma *IEEE Trans. Plasma Sci.* 24 1188.
- [2] Kelly-Winterberg K, Montie T C, Brickman C, Roth J R, Carr K A, Sorge K, Wadworth L et Tsai P P-Y 1998 Room temperature sterilization of surfaces and fabrics With a one-atmosphere uniform Glow discharge plasma *J. Indust. Microbiol. Biotechnol.* 20 69
- [4] Pierre Degond, Géraldine Quinio, François Rogier 2005, Asymptotic analysis of simple ionisation kinetics of air flows at atmospheric pressure *J. Phys. D: Appl. Phys.* 38 1371-1382

- [5] R. Ouellet, M. Barbier, et P. Cheremisionoff, low temperature plasma technologie applications. Ann arbor, MI : Ann arbor Science publ., 1980.
- [6] C. Monge, "Etude de la production d'ozone par d'écharge couronne dans un ozoneur fil-cylindre : med/élisation cin/étique et g/énie chimique, Thèse de doctorat, université de pau, 1992.
- [7] Z Buntat, J E Harry et I R smith 2003, Application of dimensional analysis to ozone production by pulsed streamer discharge in oxygen *J. Phys.* 36 1553-1557.
- [8] Kogelschatz U, Elisson B et Egli W 1997 Dielectric barrier discharges : principales et application *J. Phys. IV C4-47-C4-63*
- [9] Kitayama J et Kuzumoto M 1999 Analysis of ozone generation from air in silent discharge *J.Phys. D: Appl. Phys.*32 3032-40.
- [10] Pietsch G 1996 Invesigation and properties of the discharge in dielectric barrier reactors *J.Adv.Oxid. Technol.* 1b61-6
- [11] Pietsch G J and Haake M 1999 parametres influencing the yield of surface discharge ozone generators *Proc. 14th ozone world congress (Michigan) vol I,PP 311623.*
- [12] Chalmers I D, Zanella L et MacGregor SJ 1995 Ozone synthesis in oxygen in a dielectric barrier free configuration *10th. IEEE Int. Pulsed Power Conf. (Albuquerque)*
- [13] Simek M et Clupek M 2002 Efficiency of ozone production by pulsed positive corona discharge in synthetic air *J. Phys. D:Appl. Phys.* 35 1171-5
- [14] Held B 1995 corona and their applications *11th. Int. conf. of gas discharges and their applications (Tokyo) vol 2, pp 514-26.*
- [15] Goldman M et Sigmond R S 1982 corona and insulation *IEEE trans. Electri. Insul.*EI-17 90_105.
- [16] Loiseau J F , Lacassie F , Monge C, Peyrous R et Held B 1994 *J. Phys. D : Appl. Phys.* 27 63
- [17] Hadj Ziane S, Held B, Pignolet P, Peyrous R et coste C 1992 *J.phys. D : Appl.Phys.* 25 677
- [18] Hadj Ziane S, Held B, Pignolet P, Peyrous R et Benas J M 1999. *J.phys. D : Appl.Phys.* 23 1390
- [19] C Soria, Fontiga et A castellanos 2004, Plasma chemical and electrical modelling of a negative DC corona in pure oxygen, *Plasma sources Sci. Technol.* 13 95-107.
- [21] Baldur Eliasson 1991, Modeling and applications of silent discharge plasma: *IEEE Transaction on plasma science, vol 19 No 2.*
- [22] How Ming Lee et Moo Been chang, Ta chin wei, 2004 Kinetic Modeling of ozone generation via Dielectric Barrier Discharge, ozone: *Science end Engineering*, 16 : 551-562.
- [23] Eliasson B, Hirth M et Kogelechatz U 1987. *J phys D: Appl.Phys.*20 1421.
- [24] T.Callégari, 2000, Modélisation et diagnostics de décharges à barrières diélectriques pour écran à plasma », Toulouse, doctorat de l'université Paul Sabatier
- [25] Eliasson B, Hirth, and U, Kogelshhatz, 1987, "ozone sunthesis from oxygen in dielectric barrier discharge" *J.phys.D- ppl.phys.*20(11):1421-1437.
- [26] Lee, C., D. B. Graves, M. A. Lieberman, and D. W. Hess, "Global-Model of Plasma Chemistry in High-Density Oxygen Discharge," *J. Electrochem. Soc.* 141(6):1546-1555 (1994)
- [27] Kogelschatz, U., M. Hirth, and B. Eliasson, "Ozone Generation from Oxygen and Air-Discharge Physics and Reaction-Mechanisms," *Ozone Sci. Eng.* 10(4):367-377 (1988)
- [28] Kossyi, I. A., A. Y. Kostinsky, A. A. Matveyer, and V. P. Silakov, "Kinetic Scheme of the Nonequilibrium Discharge in Nitrogen-Oxygen Mixtures," *Plasma Sources Sci. Technol.* 1(3):207 (1992).
- [29] 2Code Bolsig, the siglo series of user friendly ischarge modeling software ~Kinema Research, siglo@kinema.com, Monument, CO, 1996.



Contribution à l'évaluation du gisement solaire à Laghouat

M. MESRI, A.CHEKNANE, M. BOUGRINE

Département de Génie électrique

Faculté des sciences et des sciences de l'ingénieur, Université Amar Têlidji, Laghouat, Algérie

***Corresponding author:* m.mesri@mail.lagh-univ.dz

Résumé - Ce travail porte sur l'étude et la simulation de méthodes semi empiriques d'évaluation du gisement solaire dans la wilaya de Laghouat en vue d'application à la conversion d'énergie solaire. Cette étude prend en charge d'une part, l'analyse de la structure temporelle du champ insolation au niveau de la ville de Laghouat, et d'autre part l'utilisation des modèles semi empiriques 'Bird et Hulstrom, Davies & Hay et Liu Jordan' permettant l'estimation des irradiations globales par ciel clair. Les modèles étudiés donnent beaucoup d'informations sur le gisement solaire local ainsi que des renseignements sur le climat de la région de Laghouat.

Mot clés - Durée d'insolation, gisement solaire, hauteur de soleil, modèles semi empiriques, rayonnement global.

I. Introduction

La consommation mondiale d'énergie, qui était de l'ordre de 2 Gtep¹/an vers 1950 (tep : tonnes équivalent pétrole devrait passer à 17 Gtep/an en 2030, alors qu'on assiste à un épuisement progressif des ressources fossiles. Il est donc nécessaire d'exploiter d'avantage d'autres sources d'énergie. Le rayonnement solaire en est une, offrant un fort potentiel. Le gisement solaire est l'ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire en un lieu donné et au cours d'une période donnée. Son étude représente le point de départ de toute investigation dans le domaine de l'énergie solaire pour simuler le dimensionnement et l'optimisation des systèmes utilisant l'énergie solaire, compte tenu des demandes en énergie à satisfaire. L'évaluation du gisement solaire peut se faire à partir des données de l'irradiation solaire globale. Par ailleurs, au cours de ce dernier demi-siècle, diverses méthodes d'estimation et de simulation du rayonnement solaire ont paru dans la littérature. Grâce aux données fournies par ces techniques, des solutions pour dimensionner les systèmes de conversion solaire ont vu le jour [1-2]. Dans le présent article, afin d'évaluer les composantes du rayonnement solaire, nous avons adopté trois approches valables pour un ciel totalement clair, en l'occurrence, l'approche de Bird et Hulstrom, Davies and Hay et Lui & Jordan.

L'objectif attendu de notre étude est de relier les efforts investis dans le domaine de l'estimation du rayonnement solaire au sol et de ses composantes dans les sites radiométriques voisins, en l'occurrence, le site de Ghardaïa, aux résultats que promettent ces modèles d'évaluation. En effet, placée entre 830m d'altitude à l'ouest et 790 m d'altitude au nord, avec une latitude de 33°46' et une longitude de 2°56', la ville de Laghouat dispose d'une moyenne d'ensoleillement de 7 heures par jour, avec une énergie électrique de 6 kW/m² à une durée d'insolation de 2947,8 heures annuellement [3]. La mise en place d'une base de données est donc d'intérêt majeur.

Dans ce contexte, un programme de calcul des rayonnements pour n'importe quelle wilaya du territoire Algérien et particulièrement pour la région de Laghouat, a été conçu et développé. Il s'agit d'un code de calcul modulaire, écrit par le logiciel Matlab 7.8 susceptible d'effectuer en

fonction du numéro de jour et de l'année les opérations suivantes :

- Détermination des paramètres astronomiques du site (lever et coucher du soleil, déclinaison, hauteur du soleil et l'angle d'incidence).
- Calcul du facteur d'inclinaison du rayonnement direct désigné par R_b.
- Calcul du facteur de trouble total de Linke désigné par (T).
- Calcul du Rayonnement direct, diffus et global sur un plan horizontal selon trois approches de modèles semi empiriques.

II. Causes principales d'atténuation du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire au niveau du sol est formé principalement du rayonnement direct et du rayonnement diffus. Le rayonnement direct, le plus important, parvient directement de l'angle solide délimité par le disque solaire. Le rayonnement solaire diffus parvenant de toute la voûte céleste, dépend de sa composition et n'a pas d'orientation privilégiée. L'ensemble forme le rayonnement global, lequel est déterminé par trois groupes de facteurs : les relations géométriques entre le soleil et la surface de la terre, l'atténuation due à la traversée de l'atmosphère, et les facteurs topographiques.

1. Diffusion Selon la théorie de Rayleigh

La diffusion par les molécules est due aux particules sphériques de diamètre inférieur à 0.2 λ (λ est la longueur d'onde de la radiation incidente). Le coefficient d'extinction dû à la diffusion moléculaire (ou diffusion de Rayleigh) est donné par

$$M_d = \beta \lambda^{-4} \quad (1)$$

Les valeurs de β et c dépendent de la nature des particules causant la diffusion. A l'encontre de l'effet d'absorption, la part du rayonnement solaire diffusé par les constituants de l'atmosphère (molécules et aérosols) n'est pas entièrement perdue. Elle est en partie récupérée au sol. Le rayonnement diffus est lui même décomposé en :

- Eclairage diffus par les aérosols.
- Eclairage après diffusion moléculaire.
- Eclairage diffus issu du phénomène de multi réflexion.

2. Absorption

Parmi les constituants qui absorbent d'une manière sensible le rayonnement solaire, l'ozone, la vapeur d'eau, l'oxygène et le gaz carbonique (Tableau 1). D'une façon générale, l'atténuation causée par les nuages est considérée de façon séparée, permettant de calculer le rayonnement sous ciel clair ou sous ciel nuageux, et éventuellement d'intégrer différentes sources de couverture nuageuse.

Tableau 1: Constituants de l'atmosphère et leur effet sur le rayonnement [5]

Constituants	Taille	Caractéristiques
Molécules de gaz (O2, CO2, O3, H2O)	1 Å°	Absorption élevée Diffusion faible
Les aérosols	10-3 à 10 ² µm	Absorption faible Diffusion élevée
Gouttelettes cristaux de nuages	Fraction de mm	Absorption non négligeable Diffusion assez faible

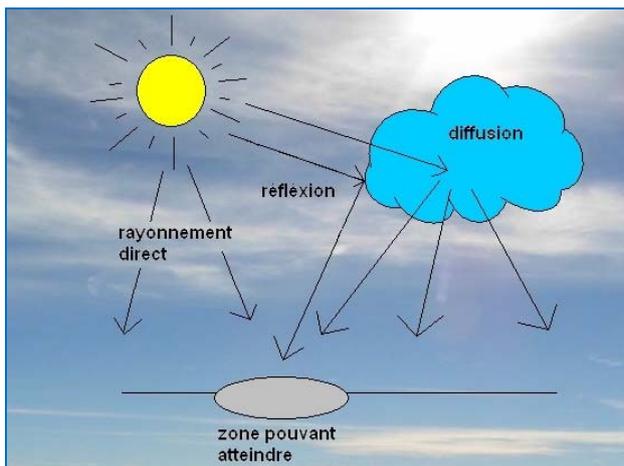


Fig.1. Type de rayonnement reçu par le panneau solaire

III. Modèles étudiés

Nous avons jugé préférable de reporter l'estimation l'éclairement global sur un plan horizontal par la relation de LIU JORDAN généralisée. En effet, ce modèle, ne dépend que

de la latitude du lieu, l'ordre ou le numéro du jour de l'année et la hauteur de soleil [6]

$$S_n R_b + D_n \frac{1 + \cos\beta}{2} + \rho \frac{1 - \cos\beta}{2} \quad (II)$$

On en déduit que :

L'irradiation directe sur plan incliné est : $S_i = S_n R_b$ (IIa)

où R_b le facteur d'inclinaison du rayonnement direct est donné par :

$$R_b = \frac{\cos\delta \cos\omega \cos(L - \beta) + \sin\delta \sin(L - \beta)}{\cos\delta \cos\omega \cos L + \sin\delta \sin L} \quad (IIb)$$

δ : La déclinaison du soleil

ω : L'angle horaire

L: Latitude du lieu

β : L'inclinaison du plan

L'irradiation diffuse sur plan incliné est : $D_i = D_n \frac{1 + \cos\beta}{2}$ (II c)

D'autre part, l'irradiation réfléchie sur un plan incliné est :

$$d_{r_s} = \rho \cdot (S_n + d_n) \frac{1 + \cos\beta}{2} \quad (II d)$$

Le rayonnement direct

$$S_n = A \cdot \sinh \cdot \exp\left[\frac{-1}{C \sin(h+2)}\right] \quad (II e)$$

Et le rayonnement diffus :

$$d_n = B \cdot \sinh^{0.4} \quad (II f)$$

A et B sont des constantes qui tiennent compte de la nature du ciel. Les valeurs caractéristiques sont données dans le Tableau 2

Tableau 2. Constantes tenant compte de la nature du ciel [5]

Nature du ciel	A	B	C
Ciel moyen	1230	125	4
Ciel très clair	1300	87	6
Ciel pollué	1200	187	5

IV. Résultats obtenus et discussion

Pour commencer, voici un tracé de certains paramètres dont la durée d'insolation mensuelle, la valeur moyenne de la température et de l'humidité de la région de Laghouat. Ces valeurs expérimentales nous ont été fournies au niveau de la station météorologique de la ville implantée sur la route d'el-KHNEG. Des

graphes représentatifs de certains paramètres calculés par notre logiciel sont aussi inclus, en l'occurrence, l'inclinaison et la hauteur du soleil ainsi que l'angle horaire. Etant que la région de Laghouat n'est pas dotée de station radiométrique permettant la comparaison avec des données expérimentales, dans le but de valider les résultats obtenus par les trois approches semi empiriques étudiées, ces derniers ont été confrontés -à des fins de comparaison-, aux valeurs du rayonnement solaire trouvés avec le logiciel de simulation PVSYST.

La figure 2 montre la température mensuelle moyenne pour l'année 2009. Nous remarquons que la température atteint son pic pour les mois d'Août et Juillet. La température moyenne est minimale pour le mois de Janvier (13°C).

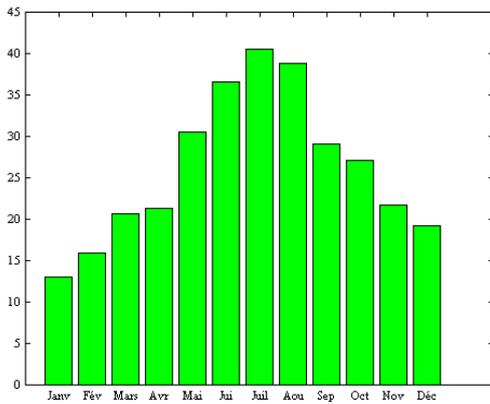


Fig.2. Température mensuelle moyenne - Laghouat - (2009)

L'humidité atteint son maximum pour le mois de Janvier (Fig.3)

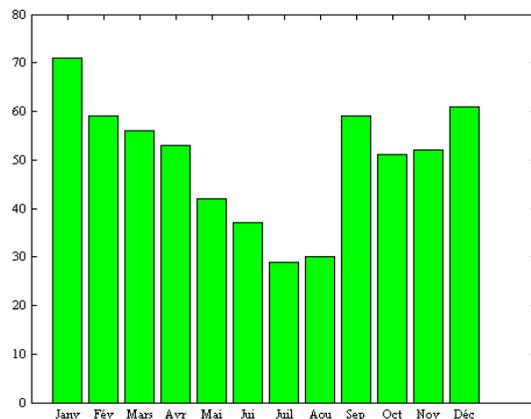


Fig.3. Humidité mensuelle moyenne Laghouat - (2009)

La figure 4 montre l'évolution de la déclinaison du soleil dans les jours :

21 Juillet/Mai, 21 Août/Avril, 21 Sep/Mars, 21 Oct/Fév, 21 Nov/Jan et 21 Déc.

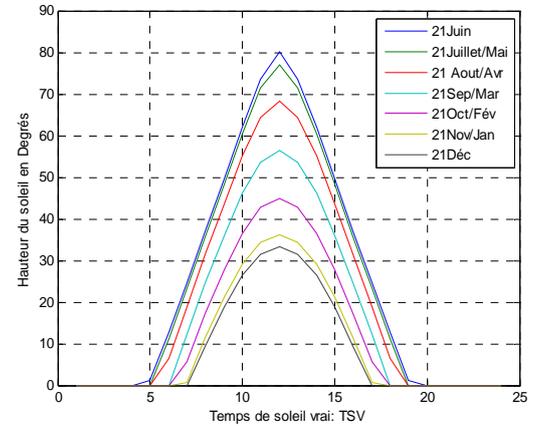


Fig.4. Déclinaison du Soleil

Les figures 5 et 6 montrent respectivement l'évolution du rayonnement global journalier sur un plan horizontal évalué du lever du soleil jusqu'à son coucher. Nous avons pensé aux journées du 21 Mars, le 21 Juin, le 21 Septembre et le 21 Décembre, périodes correspondant aux solstices et aux équinoxes.

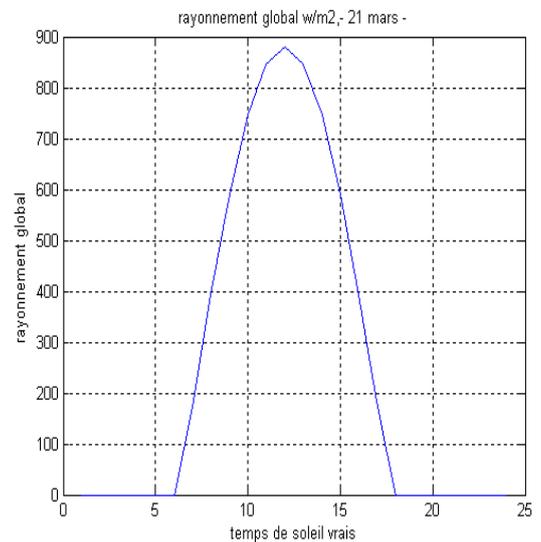


Fig.5. Rayonnement Global 21 Mars 2009

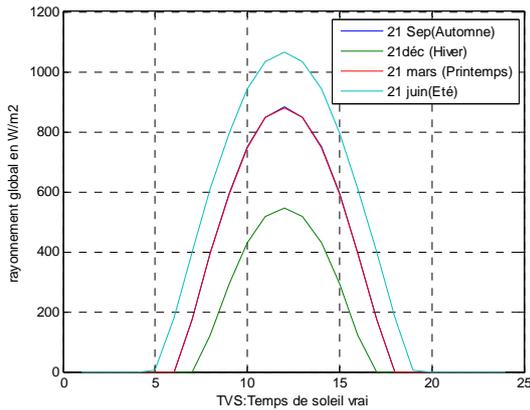


Fig.6. Rayonnement Global aux équinoxes et solstices

Les figures 7 et 8 représentent respectivement nos résultats calculés par notre simulation sous Matlab et en utilisant le logiciel PVSYS. Ces figures montrent un bon accord entre nos résultats et ceux de PVSYS.

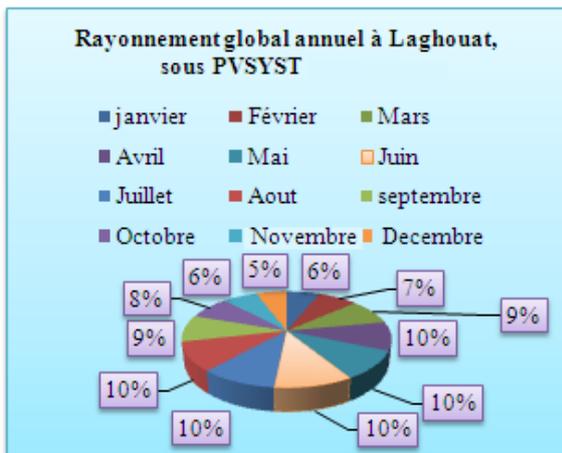


Fig.7. Etude statistique des résultats obtenus

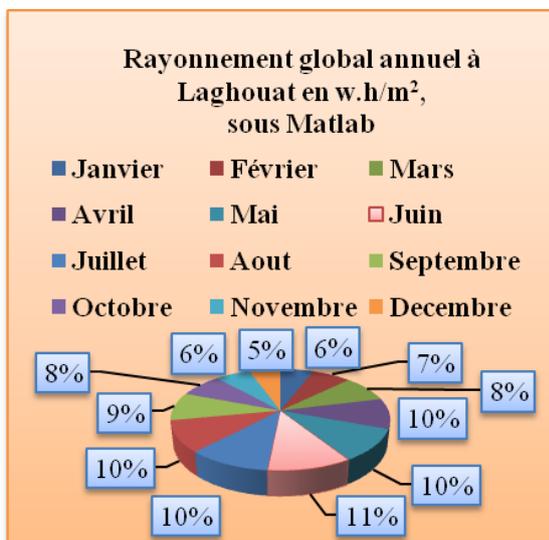


Fig.8. Etude statistique des résultats obtenus

L'analyse des figures ci dessus montre que le modèle de LIU JORDAN est plus proche des valeurs trouvées sous PV système, notamment au lever et au coucher du soleil. L'écart existant entre les modèles présentés vis-à-vis des valeurs trouvées sous le logiciel PV system est faible. De la sorte les méthodes basées sur les méthodes semi empiriques s'avèrent probantes pour permettre la simulation de l'éclairement solaire dans le site étudié.

V. Conclusion

Un avantage attendu de notre étude est de relier les efforts investis dans le domaine de l'estimation du rayonnement solaire au sol dans les sites radiométriques voisins, afin de permettre de gérer l'exploitation rationnelle du gisement solaire et de répondre de façon intéressante à nos soucis de développement durables, aussi bien du point de vue environnemental que de celui de la sécurité d'approvisionnement. Ce travail propose trois approches semi empiriques de calcul du gisement solaire dans la région de Laghouat. A partir des modèles considérés on a pu calculer les trois composantes du rayonnement solaire ; direct, diffus et global dans les conditions du ciel clair. La comparaison entre les valeurs des rayonnements incidents sur un plan horizontal du capteur prévu par la simulation des trois approches et les mesures effectuées avec le logiciel PV système, montre que la simulation est une bonne approximation de la réalité. Notons que le modèle de LIU JORDAN est le plus fréquemment employé, puisqu'il permet d'évaluer la composante du rayonnement solaire sur des plans inclinés. Ceci est particulièrement intéressant pour notre équipe de chercheurs dans le processus de poursuite solaire à titre de perspectives du présent travail.

VI. Références

[1] A. Adane, T. Ramdani and H. Mimouni. A stand alone photovoltaic system with adaptive sine wave inverter in Bejaïa, Algeria. Proc. Seventh World Renewable Energy Congress (WREC VII), Cologne, 29 June -5 July 2002.

[2] A. Adane, Youcef Ettoumi and A. Mefti. Technico - economical aspects of solar energy conversion systems in Algeria. Eighth World Renewable Energy Congress (WREC VIII), Denver, 28 August -03 September 2004.

- [3] Données de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables Ghardaïa, Algérie.
- [4] MELLIT A. , KALOGIROU S. A. , SHAARI S., SALHI H.and HADJ ARAB A., Methodology for predicting sequences of mean monthly clearness index and daily solar radiation data in remote areas: Application for sizing a stand-alone.



Contribution à l'analyse de la stabilité des problèmes de bifurcation en utilisant la méthode de dérivation optimale

A. CHIKHAOUI, T. BENOUAZ

Laboratoire de Physique Electronique et Modélisation, Faculté des Sciences, Université Abou Bakr Belkaïd-Tlemcen, BP 119, Tlemcen R.P. 13000, Algérie

**Corresponding author: a_Chikhaoui@mail-univ-tlemcen.dz

Résumé - Le but de ce travail est l'application de la méthode de dérivation optimale à un modèle physique non linéaire (circuit électronique - amplificateur chaotique-) présentant le phénomène de bifurcation, en tenant compte de ses propriétés et, en particulier, celles liées à l'ordre pour l'analyse de la stabilité et la description qualitative du comportement engendré par le phénomène de bifurcation (grands effets engendrés par les variations du paramètre de bifurcation, qui réside essentiellement dans l'échange de stabilité entre deux points singuliers stable et instable ou le passage d'un point singulier stable à une orbite périodique), ceci permet de montrer les possibilités offerte par cette nouvelle approche de linéarisation pour l'étude et la détection des bifurcations élémentaires de base.

Mots clés - Amplificateur chaotique, Bifurcation, Dérivée optimale, Systèmes non linéaires.

I. INTRODUCTION

Le comportement des systèmes non linéaires dépend crucialement de leurs paramètres de contrôle. Avant de devenir chaotique. Ces systèmes présentent des changements brutaux de comportement. On dit alors qu'une bifurcation se produit à chaque changement. Bien que la séquence exacte des ces bifurcations soit propre à chaque système. Le voisinage de toute bifurcation peut être décrit par un petit nombre de cas typiques, car dans ces régimes un seul terme non-linéaire gouverne l'évolution.

La théorie de bifurcation permet d'étudier les changements de stabilité, lorsque les paramètres de bifurcations varient et franchissent des valeurs critiques explicitées à partir d'un diagramme de bifurcation caractérisant l'évolution du système en fonction des paramètres de bifurcation.

L'analyse de la stabilité des solutions d'équilibre par les méthodes de linéarisation, connaît actuellement un regain d'intérêt avec l'apparition de nouvelles méthodes de traitement des systèmes non-linéaire. Dans le but d'améliorer la linéarisation par rapport aux techniques existantes, une nouvelle méthode de linéarisation, appelée dérivée optimale, a été introduite par Arino –Benouaz [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12].

L'étude des propriétés qualitatives des modèles non linéaires qui présentent un comportement complexe (phénomène de bifurcation), en particulier l'échange de stabilité entre solutions ainsi que la bifurcation de la solution pour certaines valeurs critiques appelées points de bifurcation.

Le but est de montrer les avantages de la technique proposée, pour la détection numérique de ce phénomène, en se basant sur ses propriétés importantes en particulier celles liées à l'ordre.

II. FORMALISME THEORIQUE DE LA METHODE DE LA DERIVATION OPTIMALE

Afin de mieux situer la problématique, nous allons rappeler la méthode de la dérivée Optimale qui est en fait une approximation globale [6, 7, 8, 9, 10, 11], qui se distingue de celle linéaire classique au voisinage d'un point stationnaire. L'approche suivie est de type optimisation.

Son utilisation est liée aux cas d'équations comportant des fonctions non régulières et, en général, non dérivables. Elle permet d'associer

une matrice optimale \tilde{A} définissant une application linéaire (1)

$$\frac{dx}{dt} = \tilde{A}x, x(0) = x_0 \quad (1)$$

à une équation différentielle ordinaire non linéaire décrite par l'équation suivante

$$\frac{dx}{dt} = F(x(t)), x(0) = x_0 \quad (2)$$

dans laquelle F vérifie les hypothèses suivantes

H1) $F(0) = 0$.

H2) Le spectre $\sigma(DF(x))$ est contenu dans l'ensemble $\{z : \text{Re } z < 0\}$ pour tout $x \neq 0$, dans un voisinage de 0, où $DF(x)$ existe.

H3) F est Continue, γ Lipchitzienne.

La méthode consiste à déterminer une application linéaire de la forme (1) qui approche l'équation non linéaire (2) dans les mêmes conditions initiales. Elle est basée sur la minimisation au sens des moindres carrées de l'écart entre l'équation non linéaire $F(x)$ et l'équation linéaire $Ax(t)$.

Pour ce faire, on considère la fonctionnelle suivante

$$G(A) = \int_0^{+\infty} \|F(x(t)) - Ax(t)\|^2 dt \quad (3)$$

La minimisation de celle-ci le long d'une solution donnée permet de construire une procédure itérative permettant de déterminer, une application linéaire définie comme étant la dérivée optimale de l'équation différentielle ordinaire non linéaire (2) qui démarre avec la linéarisation par dérivation au sens de Fréchet $DF(x)$ calculée en x_0 si celle-ci existe en x_0 .

En introduisant la fonction définie par

$$\Gamma(x) = \int_0^{+\infty} [x(t)][x(t)]^T dt \quad (4)$$

La matrice optimale \tilde{A} s'écrit alors

$$\tilde{A} = \left[\int_0^{+\infty} [F(x(t))][x(t)]^T dt \right] [\Gamma(x(t))]^{-1} \quad (5)$$

où \tilde{A} est définie et unique à condition que $\Gamma(x)$ soit inversible.

1. Algorithme de la procédure

Considérons le système:

$$\frac{dx}{dt} = F(x(t)), x(0) = x_0 \quad (6)$$

Première étape

On calcule $A_0 = DF(x_0)$, $DF(x_0)$ étant la matrice Jacobienne de F en x_0 qui, en principe, est un point arbitraire pris au voisinage de 0.

Deuxième étape

Le calcul de A_1 , à partir de la solution de l'équation

$$\frac{dx}{dt} = A_0 y(t), y(0) = x_0 \text{ avec } y(t) = e^{A_0 t} x_0 \quad (7)$$

s'effectue en minimisant la fonctionnelle

$$G(A) = \int_0^{+\infty} \|F(y(t)) - A y(t)\|^2 dt.$$

où A_1 est déterminée d'une manière unique, par l'équation (5).

Troisième étape

Pour calculer A_j , à partir de A_{j-1} , le système suivant doit être résolu au préalable

$$\frac{dx}{dt} = [A_{j-1}] y(t), y(0) = x_0 \quad (8)$$

avec $y_j(t) = e^{A_{j-1} t} x_0$

où y_j représente la solution de l'équation (8).

La minimisation de la fonctionnelle

$$G_j(A) = \int_0^{+\infty} \|F(y_j(t)) - A y_j(t)\|^2 dt$$

donne

$$A_j = \left[\int_0^{+\infty} [F(y_j(t))] [y_j(t)]^T dt \right] [\Gamma(y_j)]^{-1} \quad (9)$$

En supposant que $\Gamma(x)$ est inversible, si la suite A_j converge, la limite \tilde{A} est appelée alors la dérivée optimale de F en x_0 .

2. Propriétés de la méthode

L'ordre de la méthode est obtenu en comparant la solution $x(t)$ de l'équation non linéaire (1) et la solution $\tilde{y}(t)$ de la dérivée optimale, en partant de la même condition initiale.

Proposition

[7, 8, 9, 11], sous les hypothèses H1), H2), H3) sur la fonction F et pour tout temps $T > 0$, il existe $M \geq 0$ tel que:

$$\|x(t) - \tilde{y}(t)\| \leq M \left(\|x_0\|^2 \right) \quad (10)$$

pour $0 \leq t \leq T$, et tout x_0 dans un voisinage de 0, indépendant de T .

Cette proposition, [7, 8, 9, 11], montre que la méthode de la dérivée optimale est au moins d'ordre (2) en fonction de la donnée initiale et dépend, en général de la non-linéarité du problème initial considéré.

III. APPLICATION

Influence du choix de la condition initiale pour l'application de la méthode.

Dans cette section nous allons appliquer la méthode dérivation optimale à un exemple de circuit électronique assez particulier, l'amplificateur chaotique, modélisé par un système d'équation différentielle ordinaire E.D.O non linéaires dépendant d'un paramètre. Dont la variation de ce dernier provoque un changement du comportement qualitatif de la solution, et apparition de nouveaux points d'équilibre avec un échange (perte) de stabilité (phénomène de bifurcation). Le but est de montrer les avantages de la technique proposée, pour la description du comportement qualitative ce phénomène, en se basant sur ses propriétés importantes en particulier celles liées à l'ordre (choix de la condition initiale).

Pour ce faire, nous considérons le circuit de l'amplificateur chaotique suivant :

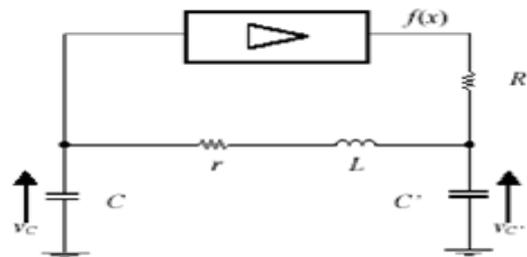


Fig.1. Circuit électronique non linéaire de l'Amplificateur chaotique

L'amplificateur chaotique est un circuit autonome régi par le système d'équations différentielles ordinaire suivant :

$$\begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = -x - \delta \cdot y + z \\ \dot{z} = \gamma[\alpha \cdot f(x) - z] - \sigma \cdot y \end{cases} \quad \text{avec : } \begin{cases} x = V_c \\ y = \sqrt{L/C} \cdot i \\ z = V_{c'} \end{cases} \quad (11)$$

et $\gamma = \frac{\sqrt{LC}}{RC'}$, $\delta = r\sqrt{\frac{C}{L}}$, $\sigma = \frac{C}{C'}$

La non linéarité exprimée par f(x) s'écrit :

$$\begin{cases} 0.528 \text{ si } x \leq -1.2 \\ x(1-x^2) \text{ si } |x| < 1.2 \\ -0.528 \text{ si } x \geq 1.2 \end{cases} \quad (12)$$

1. Détermination des points d'équilibres.

Les points d'équilibre sont donc donnés par l'intersection de la caractéristique non linéaire

f(x) et la droite de charge de pente $\frac{1}{\alpha}$ (où α représente le gain de l'amplificateur).

La détermination des points d'équilibre obtenue par la résolution du système $F(X)=0$ ceci donne :

$$\begin{cases} \dot{x} = y = 0 \\ \dot{y} = -x + z - \delta \cdot y = 0 \\ \dot{z} = \gamma[\alpha \cdot f(x) - x] - \sigma \cdot y = 0 \end{cases} \quad (13)$$

ceci donne :

$$\left\{ y = 0, x = z, f(x) = \frac{1}{\alpha}x, \right.$$

$$\text{c'est à dire } x(1-x^2) = \frac{1}{\alpha}x \Rightarrow \begin{cases} x = 0 \\ x = \pm \sqrt{\frac{\alpha-1}{\alpha}} \end{cases}$$

Alors d'après ces résultats, on constate bien que, pour $\alpha \leq 1$, le système possède un seul point d'équilibre à l'origine (0,0,0). En revanche si α augmente c'est à dire $\alpha > 1$ deux autres points d'équilibres apparaissent (P₊, P₋) ayant les coordonnées suivantes :

$$\left(\pm \sqrt{\frac{\alpha-1}{\alpha}}, 0, \pm \sqrt{\frac{\alpha-1}{\alpha}} \right) \quad (14)$$

L'étude de la stabilité de ces points s'effectuera suivant la valeur critique α (paramètre de bifurcation), on linéarise le système par la méthode de dérivation optimale autour de chaque points, comme suit

- linéarisation autour de l'origine pour $\alpha \leq 1$
- linéarisation autour de (P₊, P₋) pour $\alpha > 1$

puis, nous déterminons les valeurs propres du système linéarisé,

Pour l'application numérique, on utilise les valeurs suivantes :

$$\begin{aligned} R &= 3380 \Omega, r = 347, L = 145 \text{ mH}, \\ C &= 345 \text{ nf}, C' = 225 \text{ nf}, \\ (\gamma &= 0.2932, \delta = 0.5337, \sigma = 1.5244) \end{aligned}$$

L'application de la dérivée optimale autour de deux cas critiques, à savoir $\alpha = 1$ et $\alpha = 5$, va nous permettre de mieux apprécier la fiabilité et l'efficacité de la méthode pour la détection et le suivi du phénomène de bifurcation.

• **1^{ier} Cas :**

Pour $\alpha < 1$, le système possède un seul point d'équilibre à l'origine asymptotiquement stable.

En prenant $\alpha = 0.75$, avec la condition initiale $(x_0, y_0, z_0) = (0.1, 0.2, 0.4)$, et en appliquant la méthode de dérivation optimale, on retrouve les résultats suivants

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.75 \\ \tilde{A} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & -0.5337 & 1 \\ 0.1992 & -1.5264 & -0.2806 \end{bmatrix} \quad (15) \\ \lambda &= \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.3918 + 1.5807i \\ -0.0307 \\ -0.3918 - 1.5807i \end{bmatrix} \end{aligned}$$

• **2^{ième} Cas :**

$\alpha = 1$ est un point où on passe du point d'équilibre à l'origine qui devient instable lorsque α augmente vers deux nouveaux points d'équilibres (P₊, P₋), (Bifurcation Pitchfork); on choisit $\alpha = 1.1$ et on applique la méthode de dérivation optimale $(x_0, y_0, z_0) = (0.1, 0.3, 0.4)$

La procédure de la dérivation optimale donne :

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0.5337 & 1 \\ 2.9495 & 0 & -0.3154 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\lambda = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{pmatrix} = \begin{cases} \lambda_1 = -0.0077 \\ \lambda_2 = -0.4208 + i1.5834 \\ \lambda_3 = -0.4208 - i1.5834 \end{cases} \quad (17)$$

Pour $\alpha = 1.1$, avec des conditions initiales très près de l'origine $(x_0, y_0, z_0) = (0.01, 0.03, 0.04)$

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0.5337 & 1 \\ 0.24367 & -1.5239 & 0.29766 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Avec les valeurs propres sont données par

$$\lambda = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{pmatrix} = \begin{cases} \lambda_1 = -0.02024 \\ \lambda_2 = -0.4055 + i1.5819 \\ \lambda_3 = -0.4055 - i1.5819 \end{cases} \quad (19)$$

Les courbes des figures (2) et (3) représentent les variations de la composante $x(t)$ en fonction du temps de la solution du système linéaire optimal obtenue comparée à celle du système non linéaire **

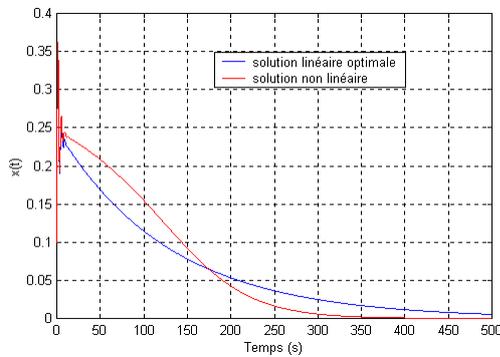


Fig.2. Représente la variation de la solution $x(t)$ en fonction du temps pour les conditions initiales $(x_0, y_0, z_0) = (0.1, 0.3, 0.4)$

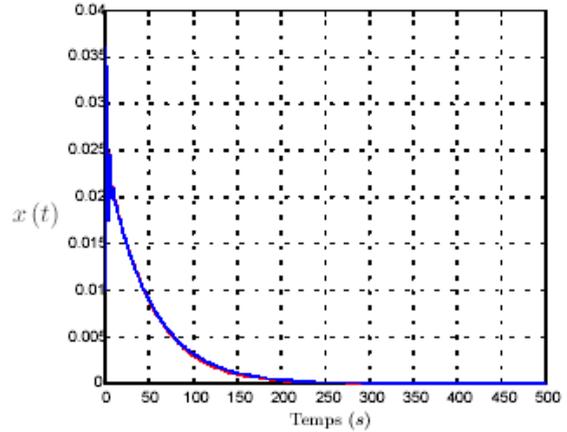


Fig.3. Représente la variation de la solution $x(t)$ en fonction du temps pour les conditions initiales $(x_0, y_0, z_0) = (0.01, 0.03, 0.04)$

La figure 3 montre que les deux courbes sont confondues, et confirme la proposition (1), c'est à dire que la qualité de l'approximation dépend du choix de la condition initiale. Ce qui n'est pas le cas de la figure 2 où on observe un écart entre les deux courbes. Afin de justifier et confronter les résultats obtenus dans le cas des conditions initiales très près de l'origine par rapport à celles prises près de l'origine, nous avons comparé l'erreur relative obtenue dans les deux cas.

La figure suivante représente l'évolution de l'erreur relative en fonction temps pour les deux conditions initiales

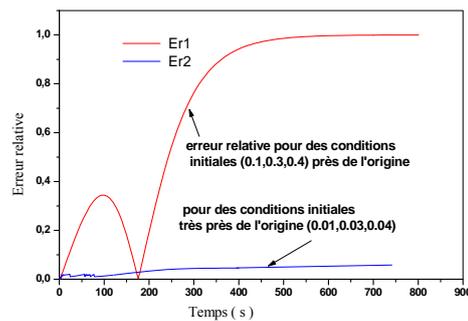


Fig.4. Evolution de l'erreur relative avec le temps

• 3^{ème} Cas :

$\alpha_H = 4.7804$: c'est un point critique, à partir duquel le système donne des solutions périodiques avec un changement de la stabilité des points d'équilibres. Le système subit une autre bifurcation appelée (*bifurcation Poincaré Androw-Hopf*), cette bifurcation est commune dans les problèmes physiques qui présentent une symétrie.

On va confirmer ces résultats par l'application de la méthode de dérivation optimale pour Pour $\alpha_H = 4.7804$, avec des conditions initiales près de l'origine $(x_0, y_0, z_0) = (0.1, 0.2, 0.3)$

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0.5337 & 1 \\ -1.163 & -1.7685 & -0.1665 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\lambda = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{pmatrix} = \begin{cases} \lambda_1 = 0.0021 + i1.63607 \\ \lambda_2 = 0.0021 - i1.63607 \\ \lambda_3 = -0.3716 \end{cases} \quad (21)$$

Pour $(x_0, y_0, z_0) = (0.01, 0.02, 0.03)$. La matrice optimale donnée pour le système non linéaire

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0.5337 & 1 \\ -1.8360 & -1.5523 & 0.2410 \end{bmatrix} \quad (22)$$

avec les valeurs propres suivantes

$$\lambda = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{pmatrix} = \begin{cases} \lambda_1 = -5.18 \cdot 10^{-6} + i1.6367 \\ \lambda_2 = -5.18 \cdot 10^{-6} - i1.6367 \\ \lambda_3 = -8.2166 \cdot 10^{-1} \end{cases} \quad (23)$$

Les courbes des figures (5) et (6) représentent les variations de la composante $x(t)$ en fonction du temps de la solution du système linéaire optimal obtenu comparée à celle du système non linéaire (1)

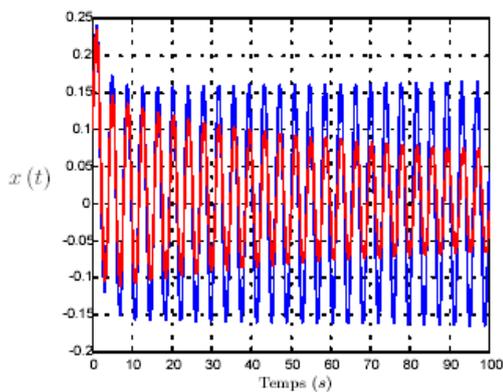


Fig.5. Représente la variation de la solution $x(t)$ en fonction du temps pour les conditions initiales $(x_0, y_0, z_0) = (0.1, 0.2, 0.3)$

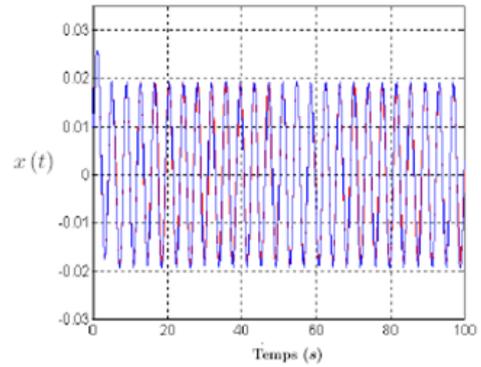


Fig.6. Représente la variation de la solution $x(t)$ en fonction du temps pour les conditions initiales $(x_0, y_0, z_0) = (0.01, 0.02, 0.03)$

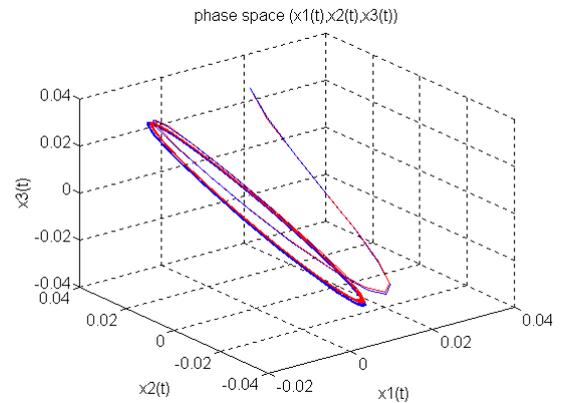


Fig.7. représente la solution $(x(t), y(t), z(t))$ dans l'espace de phase pour les conditions initiales $(x_0, y_0, z_0) = (0.01, 0.02, 0.03)$

• 4^{ème} Cas :

a) *Que ce passe il lorsque α dépasse α_H ?*

$\alpha_H = 5 > 4.7804$: il s'agit d'un point critique à partir duquel le système donne des solutions périodiques, avec un changement de la stabilité des points d'équilibre ainsi que la stabilité des solutions périodiques. Les deux nouveaux points d'équilibre (P+ et P-) deviennent instables tandis que l'origine devient stable. On va confirmer ces résultats par l'application de la méthode de dérivation optimale pour $x(0) = (0.01, 0.02, 0.03)$ donne :

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0.5337 & 1 \\ -1.1630 & -1.7685 & -0.1665 \end{bmatrix} \quad (24)$$

La dérivée optimale détecte l'échange de stabilité qui se traduit par des valeurs propres, complexes à partie réelle positive pour les points (P+, P-), pour le système linéaire optimal, qui s'écrivent sous la forme suivante :

$$\lambda = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{pmatrix} = \begin{cases} \lambda_1 = 0.01937 + i1.6463 \\ \lambda_2 = 0.01937 - i1.6463 \\ \lambda_3 = -0.81172 \end{cases} \quad (25)$$

Ceci montre que les deux points critiques P+ et deviennent instables alors que l'origine est stable ($\lambda_3 < 0$). L'analyse des deux figures (8), (courbe en rouge solution non linéaire, courbe en bleu solution linéaire optimale), confirment les résultats obtenus en se plaçant très près de l'origine).

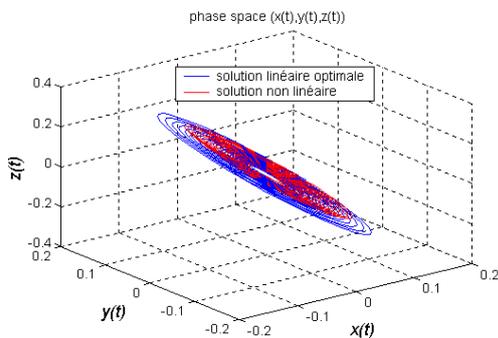


Fig.8. Solution $(x(t), y(t), z(t))$ dans l'espace de phase pour les conditions initiales $(x_0, y_0, z_0) = (0.01, 0.02, 0.03)$

IV. DISCUSSION DES RESULTATS

La comparaison entre les résultats obtenus, pour des conditions initiales prises près de l'origine, montre une nette amélioration concernant la description du comportement réel, en obéissant à la même dynamique du système non linéaire initial. Ceci est illustré par les fig.3 et fig.6 qui représentent la solution optimale du système linéaire optimal comparée à celle non linéaire initial (numérique) du système (11).

En plus, en se basant sur les résultats obtenus par l'application de la méthode aux points critiques, par exemple, (pour $\alpha_H = 4.7804$ et $(x_0, y_0, z_0) = (0.01, 0.02, 0.03)$), on constate que la dérivée optimale est capable de détecter le changement de stabilité à partir du changement de signe des parties réelles des valeurs propres données par les expressions (19) et (25). Le changement de comportement de la solution pour $\alpha = 1.1$, en une solution périodique pour $\alpha_H = 4.7804$ (apparition de la bifurcation Hopf) est mis en évidence par les figures (5), (6), (7), (8).

Enfin, les résultats élaborés en choisissant des conditions initiales très près de l'origine, montrent clairement que la méthode de dérivation optimale suit le comportement du système non linéaire. Elle détecte les grands effets engendrés par les variations du paramètre de bifurcation, qui réside essentiellement dans l'échange de stabilité entre deux points singuliers stable et instable ou le passage d'un point singulier stable à une orbite périodique.

V. CONCLUSION

A la lumière des résultats obtenus, il ressort qu'en se basant sur une propriété importante de la méthode, déterminée à partir de l'estimation de l'erreur commise, la méthode de la dérivée optimale permet de détecter les différents échanges de stabilité qui accompagnent le phénomène complexe de bifurcation. Cette méthode décrit bien le changement de comportement des solutions et détecte le changement de stabilité, en obéissant d'une façon satisfaisante à la dynamique du système non-linéaire initial.

Par ailleurs, il apparaît clairement que le choix des conditions initiales pour l'application de la procédure de dérivation optimale est déterminant.

Ainsi, cette méthode représente une bonne alternative pour l'étude de ce type de problème (de bifurcation) surtout dans le cas où la fonction définissant l'équation non linéaire n'est pas n'est pas assez régulière et celui où $DF(0)$ est nulle. Ce qui a permis de mettre en valeur certains aspects théoriques de cette procédure

Enfin, pour une bonne utilisation de cette méthode, particulièrement pour l'étude des points critiques, le choix de conditions initiales appropriées s'impose.

VI. REFERENCES

- [1] J. Cuningham, Introduction to Non-Linear Analysis, *Mc-Graw.Hill, New-York*, (1958).
- [2] A.Fossard, Commande des Systèmes Multidimensionnels, *Dunod*, (1972).
- [3] A. Volovoich, Linear Multivariable Systems, *New-York Springer*, (1974).
- [4] A. Z. Bensenane, Linéarisation Optimale des Equations d'Etat Non Linéaires, Thèse de Magister, Tlemcen, (1986).
- [5] T. Benouaz, Contribution à l'Approximation et la Synthèse de la Stabilité d'une Equation Différentielle Ordinaire Non Linéaire, Thèse de Doctorat d'Etat, Tlemcen, (1996).

- [6] T. Benouaz, O. Arino, Existence, Unicité et Convergence de l'Approximation au Sens des Moindres Carrés d'une Equation Différentielle Ordinaire Non Linéaire, *94/14 Université de Pau, CNRS URA 1204*, (1994).
- [7] T. Benouaz, Optimal Derivative of a Non-Linear Ordinary Differential Equation, *Equadiff 99, International Conference on Differential equations*, Berlin (Germany) 1-7 August, Vol.2, pp.1404-1407, World scientific Publishing Co. Pte. Ltd, (2000).
- [8] T. Benouaz, O. Arino, Optimal Approximation of the Initial Value Problem, *Computers Math. Applic.*, Vol.36, N°1, pp.21-32, (1998).
- [9] T. Benouaz, O. Arino, Determination of the Stability of a Nonlinear Ordinary Differential Equation by Least Square Approximation. Computational Procedure, *Appl. Math. and Comp sci.*, N°1, Vol.5, pp.33-48, (1995).
- [10] T. Benouaz, Lyapunov Function Generated by Least Square Approximation, *Deuxième conférence Maghrébine sur l'Automatique*, Tlemcen (Algeria) 3-5 December, Vol.1 pp.73-75, (1996).
- [11] T. Benouaz, O. Arino, Least Square Approximation of a Non-Linear Ordinary Differential Equation, *Computers Math. Applic.*, Vol.31, N°8, pp.69-84, (1996).
- [12] A. Chikhaoui, Contribution à l'Etude de la stabilité des Systèmes Non Linéaires, Thèse de Magister, Tlemcen (Algeria), (2000).
- [13] T. Benouaz, M.F. Bendahmane, Least Square Approximation of a Non-Linear O.D.E. with Excitation, *Computers and Mathematics with Applications*, CAMWA, vol.47, Issues 2-3, pp. 473-489 2004.
- [14] T. Benouaz, M. Bonher, On the relationship between the classical linearization and optimal derivative, advances in Dynamical Systems and Applications, *Advances in Dynamical Systems and Applications (ADSA)*, Vol. 2, N° 1, pp. 41-57 (2007).
- [15] T. Benouaz, M. Bohner, A.Chikhaoui, On TheRelationship between the optimal Derivative and asymptotique Stability, *African Diaspora Journal of Mathematics*, Volume8, Number 2, pp.148-162 (2009).



Simulation de la diffusion anisotrope en traitement d'images par la méthode des éléments finis

S. Y. IDRISSE, S. BELFKIH, S. NAJAH, P. MONTESINOS

Laboratoire GRE TIC – Faculté des sciences et techniques Fès Saïs
B.P. 2202 – Route d'Imouzzer – FES – MAROC

**Corresponding author: sidiyassine12@yahoo.fr

Résumé - Dans cet article, nous proposons une nouvelle mise en œuvre numérique de la méthode de Malik et Perona pour la restauration des images en niveau de gris à base d'équations aux dérivées partielles (EDP) par la méthode des éléments finis (MEF). Tout d'abord, nous présentons le formalisme de base de la diffusion anisotrope. Ensuite, après avoir rappelé les grandes lignes de la MEF que nous appliquerons par la suite sur le modèle de Malik et Perona, nous comparons qualitativement et quantitativement les résultats obtenus par notre méthode de résolution numérique avec d'autres résultats issus de résolutions explicites et semi-implicite. Plusieurs tests appliqués sur des images synthétiques et réelles sont présentés afin de bien illustrer l'efficacité de notre approche.

Mots Clés - Diffusion Anisotrope, Equations aux Dérivées Partielles, Eléments Finis, Restaurations d'Images

I. Introduction

L'application des équations aux dérivées partielles en traitement d'images a attiré depuis quelques années l'attention de plusieurs chercheurs en vision par ordinateur [1] [2]. Ceci est dû surtout au formalisme mathématique qui encadre toute approche à base d'EDP et qui permet de donner une bonne interprétation et justification des résultats obtenus par ces méthodes, contrairement aux méthodes classiques et heuristiques en traitement d'images [3]. Ces équations ont été notamment étudiées dans le cadre de l'analyse multi-échelle [4] et dans le cadre des problèmes de restauration d'images basés sur le principe de la diffusion anisotrope [5].

La diffusion intervient en prétraitement, afin de supprimer les perturbations locales du signal. Il devient alors possible dans un second temps d'effectuer par exemple, une recherche des contours sans être gêné par le bruit. La diffusion isotrope rend les contours flous et homogénéise l'image. Malik et Perona [6] ont proposé un modèle de diffusion anisotrope. La motivation essentielle de l'utilisation de ce genre de modèle est la construction d'un opérateur de diffusion dépendant des propriétés locales de l'image. Ils ont proposé un filtre permettant d'atténuer la diffusion dans les régions à fort gradient (Diffusion minimale au niveau des contours) et de la maintenir dans les zones à faible gradient.

La performance de ces méthodes, à base d'EDP, en traitement d'images dépend en grande partie de la résolution numérique et de la mise en œuvre de ces EDP. Le principe des schémas numériques les plus représentatifs se repose sur la discrétisation des dérivées du premier et second ordre ($D_x, D_y, D_{xx}, D_{yy}, D_{xy}$). Pour assurer une meilleure stabilité, plusieurs méthodes proposent des schémas explicites qui consistent à déterminer la solution approchée à l'instant $n+1$ à partir de celle à l'instant n . Bien que la programmation est simple et peu coûteuse en utilisant un schéma numérique explicite, elle devient prohibitive au cours du temps.

Dans ce papier, nous proposons une nouvelle mise en œuvre numérique de la méthode de Malik et Perona pour la restauration des images en niveau de gris à base d'équations aux dérivées partielles (EDP) par la méthode des éléments finis (MEF).

La suite de la présente étude est organisée de la façon suivante: dans la section 2 nous

rappelons brièvement la diffusion anisotrope et le modèle de Malik et Perona; dans la section 3 nous décrivons et mettons en œuvre la méthode des éléments finis pour ce modèle; Dans la section 4 nous présentons la résolution explicite et semi implicite de l'équation de Malik et Perona. Les résultats et la comparaison des différentes méthodes sont présentés dans la section 5. La section 6 conclut le papier.

II. Equation Aux Dérivées Partielles En Traitement D'images

1. Diffusion anisotrope par EDP

L'idée de base de la diffusion anisotrope en restauration d'images est de filtrer (clarifier) l'image en privilégiant une direction de diffusion (étalage du bruit) par rapport à une autre, selon la géométrie locale de chaque pixel. Nous présenterons brièvement une approche variationnelle afin d'aboutir à une formulation unificatrice de la diffusion anisotrope et à des méthodes de restauration d'images à base d'EDP.

L'objectif de cette approche est de retrouver une image originale I à partir de l'image dégradée observée I_0 . Le modèle de dégradation reliant I à I_0 le plus couramment utilisé est un modèle linéaire de la forme:

$$I_0 = PI + \nu \quad (1)$$

Où:

- P est un opérateur de dégradation linéaire, en général identité ou un opérateur de convolution.
- ν Un bruit blanc gaussien.

On cherche I parmi les minima de la fonctionnelle énergie définie par:

$$E(I) = \frac{1}{2} \|I - PI_0\|^2 + \lambda \int_{\Omega} \phi(\|\nabla I\|) d\Omega \quad (2)$$

Le premier terme de l'énergie $E(I)$ est un terme d'attache aux données et le second est un terme de régularisation dépendant de la fonction ϕ . Le paramètre λ permet de régler l'influence de chaque terme de l'énergie.

L'équation d'Euler-Lagrange associée à la minimisation de E s'écrit sous la forme:

$$P^*(I - PI_0) + \lambda \text{Div} \left(\phi'(\|\nabla I\|) \frac{\nabla I}{\|\nabla I\|} \right) \quad (3)$$

Qu'on peut aussi écrire sous la forme:

$$P^*(I - PI_0) + \lambda(\phi'(\|\nabla I\|))I_{\xi\xi} + \phi'(\|\nabla I\|)\frac{\nabla I}{\|\nabla I\|}I_{\eta\eta} = 0 \quad (4)$$

Avec:

- P^* est l'opérateur adjoint de P .
- Div est l'opérateur divergence.
- Le paramètre λ est supérieur à 0.

Dans le cas où $\lambda > 0$, l'équation peut s'écrire sous la forme:

$$\frac{\partial I}{\partial t} = C_{\xi}I_{\xi\xi} + C_{\eta}I_{\eta\eta} \quad (5)$$

Avec:

$$C_{\xi} = \phi''(\|\nabla I\|) C_{\eta} = \phi'(\|\nabla I\|)\frac{\nabla I}{\|\nabla I\|}$$

$$\eta = \frac{\nabla I}{\|\nabla I\|}, \quad \xi \perp \eta. \quad (6)$$

On remarque que le choix de la direction de diffusion dépend de la fonction de régularisation ϕ . Par exemple si on choisit $\phi(x) = x^2$, alors l'équation précédente correspond à l'équation classique de la chaleur et traduit une diffusion isotrope, qui tout en diminuant le bruit rend cependant l'image plus flou.

Parmi les modèles de restauration les plus représentatifs basés sur le principe de la diffusion anisotrope, on trouve le Scale Space de Malik et Perona [6], le modèle limite proposé par L. Alvarez [5] et le filtre de choc pour les images flous [7].

2. Diffusion anisotrope de Malik et Perona

Comme nous l'avons dit en introduction, Perona et Malik [6] ont proposé un modèle de diffusion anisotrope pour résoudre les problèmes issus de la diffusion isotrope. Ils ont proposé un filtre permettant d'atténuer la diffusion dans les régions à fort gradient et de la maintenir dans les zones à faible gradient. Le scale space qui formalise cette idée est donné par:

$$\begin{cases} \frac{\partial I}{\partial t}(t, x, y) = \text{div}(c(\|\nabla I\|)\nabla I) \\ I(0, x, y) = I_0(x, y) \\ \frac{\partial I}{\partial n}(t, x, y) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Quand $c = 1$, on retrouve l'équation de la chaleur. On impose souvent $\lim_{t \rightarrow +\infty} c(t) = 0$ et $c(0) = 1$. Ainsi, dans les régions de faible gradient, l'équation agit essentiellement comme l'EDP de la chaleur, et dans les régions de fort gradient, la régularisation est stoppée ce qui permet de préserver les bords. Dans la suite nous prenons $c(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{k}\right)$ où $k \geq 0$ est un paramètre qui contrôle la diffusion.

III. Mise En Œuvre de l'EDP de Malik et Perona par la Méthode des Éléments Finis

1. Rappel sur la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis consiste à résoudre des équations elliptiques ou paraboliques. Elle a l'avantage, par rapport à la méthode des différences finies, de pouvoir traiter sans difficultés supplémentaires toute géométrie ainsi que d'augmenter la précision des résultats au prix d'efforts de programmation raisonnables. C'est la méthode des éléments finis qui est systématiquement utilisée pour le calcul des structures et de très nombreux codes d'éléments finis ont été développés.

Il s'agit de mettre en place, à l'aide de la formulation variationnelle, un algorithme discret mathématique permettant de rechercher une solution approchée.

En effet, en présence d'une fonction définie sur un ouvert Ω de IR^p $p = (1, 2, 3)$ à valeurs dans IR d'une part et un maillage de l'ouvert Ω d'autre part, la méthode des éléments finis permet la construction d'une fonction approchée, qui ne dépend plus que d'un nombre fini de degrés de libertés. Ainsi au lieu de considérer la solution de l'équation aux dérivées partielles dans un espace de dimension infinie, on cherche la solution de ce même problème dans un espace de dimension finie. Toutefois pour que le problème initial soit bien posé dans ce nouvel espace, on doit en transformer la formulation et on fait alors recours à la formulation variationnelle (ou faible). L'avantage de la méthode des éléments finis vient du fait que toute fonction dans l'espace d'approximation peut se décomposer de façon très simple sur une base canonique [8] [9] [10].

2. Résolution numérique du modèle de Malik et Perona par la MEF:

Contrairement à la méthode des différences finies utilisées d'ailleurs par Malik et Perona, où les opérateurs différentiels sont approchés à l'aide d'une formule de différences, la méthode des éléments finis qui jusqu'à présent n'a jamais été adoptée pour le modèle de Malik et Perona et que nous appliquons dans le présent travail, c'est l'image résultat qui est approchée.

2.1. Formulation variationnelle :

Soit φ une fonction test, on a:

$$\int_{\Omega} \frac{\partial I}{\partial t} \varphi = \int_{\Omega} \text{div}(c(\|\nabla I\|) \nabla I) \varphi \quad (8)$$

$$\int_{\Omega} \text{div}(c(\|\nabla I\|) \nabla I) \varphi = \int_{\Omega} \frac{\partial}{\partial x} (c(\|\nabla I\|) \frac{\partial I}{\partial x}) \varphi + \int_{\Omega} \frac{\partial}{\partial y} (c(\|\nabla I\|) \frac{\partial I}{\partial y}) \varphi \quad (9)$$

En utilisant la formule de Green:

$$\int_{\Omega} \frac{\partial u}{\partial x_i} (x) v(x) d\Omega = - \int_{\Omega} u(x) \frac{\partial v}{\partial x_i} (x) d\Omega + \int_{\Gamma} u(x) v(x) n_i(x) d\Gamma \quad (10)$$

On obtient

$$\int_{\Omega} \frac{\partial}{\partial x} (c(\|\nabla I\|) \frac{\partial I}{\partial x}) \varphi + \int_{\Omega} \frac{\partial}{\partial y} (c(\|\nabla I\|) \frac{\partial I}{\partial y}) \varphi = - \int_{\Omega} c(\|\nabla I\|) (\nabla I \cdot \nabla \varphi) + \int_{\Gamma} \varphi c(\|\nabla I\|) (\frac{\partial I}{\partial x} n_x + \frac{\partial I}{\partial y} n_y) \quad (11)$$

Comme $\frac{\partial I}{\partial n} = 0$ on a la formulation variationnelle suivante:

$$\begin{cases} \int_{\Omega} \frac{\partial I}{\partial t} \varphi = - \int_{\Omega} c(\|\nabla I\|) (\nabla I \cdot \nabla \varphi) \\ I(0, x, y) = I_0(x, y) \end{cases} \quad (12)$$

2.2 Approximation numérique

La construction des espaces d'approximations se fait en définissant d'abord ce qu'est un élément fini, puis en définissant des règles qui permettent d'assembler des éléments finis d'un même type, de façon à approcher des fonctions d'un ouvert Ω à valeurs réelles, Nous renvoyons le lecteur à [8] [9] [10] [11] [12] aux définitions et propriétés qui suivent.

2.3 Définitions et propriétés

On se donne

1. Un compact K de \mathbb{R}^n , connexe et d'intérieur non vide.
2. Un ensemble $\Sigma = \{a_1, \dots, a_N\}$ de N points distincts (N degrés de liberté).
3. Un espace P de dimension finie N de fonctions définies sur K à valeurs réelles.

On dit que l'ensemble Σ est P-unisolvant si et seulement, étant donné N scalaires quelconques α_j $1 \leq j \leq N$, il existe une fonction p de l'espace P et une seule telle que

$$p(a_j) = \alpha_j \quad 1 \leq j \leq N.$$

Lorsque l'ensemble Σ est P-unisolvant, le triplet (K, Σ, P) est appelé élément fini de Lagrange.

Etant donné un élément fini (K, Σ, P) , il existe donc N fonctions φ_i de P qui satisfont $\varphi_i(a_j) = \delta_{ij}$, ses N fonctions sont appelées fonctions de base de l'élément fini.

Si on dispose de la base de P constituée des fonctions de base, alors le caractère unisolvant est automatiquement vérifié.

Deux éléments finis de Lagrange (K, Σ, P) et $(\hat{K}, \hat{\Sigma}, \hat{P})$ sont dits affinement équivalents s'il existe une application affine bijective F de \hat{K} sur K vérifiant:

$$1) P = \{p: K \rightarrow \mathbb{R}; p \circ F \in \hat{P}\}.$$

$$2) \Sigma = F(\hat{\Sigma}).$$

Réciproquement l'image d'un élément fini par une application bijective continue vérifiant 1 et 2 est un élément fini.

Cette notion d'équivalence est très importante, car on peut générer à partir d'un élément fini une famille d'éléments finis qui lui sont affinement équivalents. Dans ce qui suit nous prenons comme élément fini de référence:

K : le triangle de sommet $(0,0)$, $(1,0)$, $(0,1)$.

$$\Sigma = \{(0,0), (1,0), (0,1)\}.$$

$$P = \{p(x,y) = a + bx + cy, a, b, c \in \mathbb{R}\}.$$

Soit (K, Σ, P) l'élément fini de référence, on peut facilement calculer ses trois fonctions de base grâce à la relation suivante: $\varphi_i(S^j) = \delta_{ij}$. En effet on trouve:

$$\varphi_1(x, y) = 1 - x - y.$$

$$\varphi_2(x, y) = x.$$

$$\varphi_3(x, y) = y.$$

Ainsi, nous pouvons déterminer facilement les fonctions de base d'un élément fini $(\hat{K}, \hat{\Sigma}, \hat{P})$ affinement équivalent à l'élément de référence (K, Σ, P) . En effet on utilise la propriété (2) de la définition précédente ($\Sigma = F(\hat{\Sigma})$).

Maintenant que nous avons mis en place tous les outils des éléments finis pour l'élément de référence, il reste à définir des règles pour assembler des éléments de cette famille et définir ainsi un espace d'approximation de fonctions. Nous avons besoin pour cela définir ce qu'est un maillage.

2.4 Maillage

Soit Ω un ouvert à frontière polyédrique et Γ un recouvrement de Ω par des triangles. Nous dirons que Γ est un maillage de Ω , si pour deux triangles quelconques et différents K_1 et K_2 de Γ , l'intersection $K_1 \cap K_2$ est soit vide, soit un sommet commun, soit une arête commune.

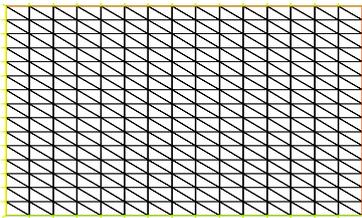


Fig.1. Maillage représentant une image rectangulaire

En pratique, le maillage d'un domaine consiste à déterminer les tableaux suivants :

Coordonnées: une matrice de trois colonnes définies comme suit :

Colonne 1: contient les numéros des noeuds.

Colonne 2: contient les abscisses de chaque nœud dans la colonne 1.

Colonne 3: contient les ordonnées de chaque nœud dans la colonne 1.

Élément: contient les numéros des éléments finis (ici triangles) avec les numéros de degré de liberté de chaque élément.

Bord: contient les numéros des nœuds sur la frontière du domaine.

2.5 Construction de la solution approchée

L'espace d'approximation que nous considérons est:

$$V_h = \{v_h \in C_0(\Omega), (v_h)_{/K} \in P, \forall K \in \Gamma\}$$

Nous introduisons les fonctions ϕ_i $1 \leq i \leq N$ (N est le nombre total de nœud), définies par: $\phi_i \in V_h$ $\phi_i(S^j) = \delta_{ij}$, D'après la propriété d'unisolvance, les fonctions ϕ_i sont définies de façon unique puisque dans chaque triangle K , la valeur de ϕ_i est prescrite en chacun des trois sommets. On constate immédiatement qu'il s'agit d'une base de V_h et on a :

$$(\phi_i)_{/K_j} = \phi_k^{K_j} \quad k=1 \text{ ou } 2 \text{ ou } 3, (\phi_i)_{/K_j} \equiv 0 \text{ si } S^i \notin K_j.$$

On cherche alors I_h (solution approchée de l'équation de Malik et Perona) sous forme d'une combinaison linéaire des éléments de cette base, i.e sous la forme:

$$I_h(t, x, y) = \sum_{j \in N} \alpha_j(t) \phi_j(x, y).$$

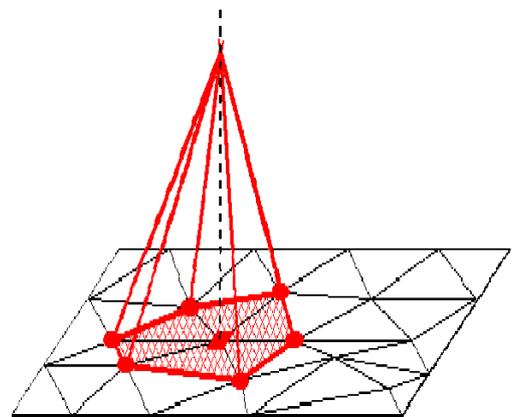


Fig.2. Fonction de base ϕ_i

Comme $\phi_i(S^j) = \delta_{ij}$, on a $\alpha_j(0)$ qui égale le niveau de gris de l'image au

I	1	3	6	1	1	1
A				0	2	3

b) Résolution

Produit d'une matrice par un vecteur
 $Y=AX$:

Initialisation du vecteur Y par n zéros

For $i=1$ à n

$$K_1 = IA(i), K_2 = IA(i+1)$$

$$Y(i) = \sum_{j=K_1}^{j=K_2} AA(j).X(JA(j))$$

Fin (i)

Méthode du Gradient conjugué Pré conditionné:

Soit $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ une matrice symétrique définie positive et Y un vecteur quelconque. On veut résoudre le système linéaire $Ax = b$, pour cela considérons la fonctionnelle quadratique $E : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ définie par :

$$E(x) = 1/2 \langle Ax, x \rangle - \langle b, x \rangle$$

Dont le gradient vaut $\nabla E(x) = (Ax - b)$.

Le minimum de cette fonctionnelle est atteint pour le point \bar{x} qui annule $\nabla E(x)$, donc vérifiant $A\bar{x} = b$.

La méthode du gradient conjugué [13][15] fait partie des méthodes de descente, qui ont comme principe commun la recherche de \bar{x} suivant le procédé itératif :

$$x^0 \text{ donné, } x^{i+1} = x^i + \rho^i d^i$$

Avec $d^i \in \mathbb{R}^n$ et $\rho^i \in \mathbb{R}$ le pas de descente.

Le choix du paramètre de descente est simple, car une fois d^i et x^i fixé, on peut calculer facilement un pas de descente optimal

$$\rho^i = - \frac{\langle Ax^i - b, d^i \rangle}{\langle Ad^i, d^i \rangle}$$

Qui réalise le minimum de la fonctionnelle E dans la direction choisie.

Quant à la direction de descente, on choisit $d^i = h^i$, avec les directions de descente conjuguées par rapport à la matrice A , c'est-à-

dire $\langle Ah^i, h^j \rangle = 0$, $i \neq j$. On peut pré conditionner cette méthode par une matrice C symétrique définie positive, la matrice C doit être la plus simple et la plus creuse possible ce qui impose comme choix les plus faciles:

- $C = I$, la matrice identité (algorithme sans pré conditionnement).

- $C = D^{-1}$, l'inverse de la partie diagonale de la matrice A .

Pour obtenir à la fin l'algorithme suivant:

$x_0 \in \mathbb{R}^n$, ε, C étant donnés.

$$G^0 = Ax^0 - b$$

$$H^0 = -CG^0$$

Pour $i=0$ à n

$$x^{i+1} = x^i + \rho H^i$$

$$G^{i+1} = G^i + \rho AH^i$$

$$\gamma = \frac{\langle G^{i+1}, G^{i+1} \rangle_C}{\langle G^i, G^i \rangle_C}$$

$$H^{i+1} = -CG^{i+1} + \gamma H^i$$

Si $\langle G^{i+1}, G^{i+1} \rangle \leq \varepsilon$ stop.

On remarque bien que pour manipuler cet algorithme pour les matrices stockées sous CSR format on a seulement besoin de savoir définir le produit d'une matrice par un vecteur, chose déjà faite supra.

2.7 Adaptation de l'assemblage de la matrice avec le schéma de stockage

Le principe de remplissage de la matrice A sous la forme définie précédemment consiste en un premier temps à remplir le tableau IA en remarquant que a_{ij} est non nul uniquement si $q^i q^j$ est une arête de la triangulation. La construction du tableau devient alors particulièrement simple, les points à l'intérieur du rectangle ont sept sommets communs, les bords ont cinq sommets communs et les coins en ont trois ou quatre.

La construction de AA et JA se fait d'une manière simultanée en parcourant la triangulation. Le calcul de $AA(k)$ n'est pas fait en une fois : il est fait en additionnant les contributions élémentaires de chaque triangle, ce

qui signifie que pour chaque couple (i,j) il faut retrouver l'indice k de stockage de a_{ij} dans le tableau AA .

2.8 Calcul du deuxième terme de l'équation

Comme I s'écrit sous forme d'une combinaison linéaire de fonctions de base elles mêmes linéaires on a:

$$I_{/K_i} = a_i(t)x + b_i(t)y + c_i(t) .$$

$$\|\nabla I\|^2 = a_i^2(t) + b_i^2(t) .$$

On détermine $a_i(t), b_i(t), c_i(t)$ en fonction de α_j de la façon suivante :

On note par T_i le tableau qui représente le triangle K_i (élément)

e_x^i : Abscisse sommet de K_i

e_y^i : Ordonnée sommet de K_i

Posons $P = \begin{pmatrix} e_x^i(1) & e_y^i(1) & 1 \\ e_x^i(2) & e_y^i(2) & 1 \\ e_x^i(3) & e_y^i(3) & 1 \end{pmatrix}$ on a alors

$$\begin{pmatrix} a_i(t) \\ b_i(t) \\ c_i(t) \end{pmatrix} = P^{-1} \begin{pmatrix} \alpha_1^i(t) \\ \alpha_2^i(t) \\ \alpha_3^i(t) \end{pmatrix}$$

Finalement $\|\nabla I\|$ ne dépend que de α .

Le principe de l'assemblage de la deuxième matrice se fait de la même manière que la première sauf qu'ici elle dépend de α_j .

Nous obtenons ainsi le système différentiel suivant:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} A\alpha = g(\alpha) \\ \alpha(0) = \alpha_0 \end{cases} \quad (16)$$

Où g est une fonction qui dépend de la fonction c (terme non linéaire de l'équation de Malik Perona).

2.9 Résolution système différentielle

Les méthodes de Runge-Kutta [16], d'ordre 2 ou 4, sont très couramment utilisées pour la résolution des équations différentielles ordinaires. Elles ont l'avantage d'être simples à programmer et d'être assez stables pour les fonctions courantes de la physique. Sur le plan de l'analyse numérique [17], elles ont surtout l'immense avantage de ne pas nécessiter autre chose que la connaissance des valeurs initiales. Elles ont quand même un inconvénient, surtout la méthode Runge-Kutta d'ordre 4, qui est assez consommatrice en temps de calcul.

Soit $X : IR \rightarrow IR^n$ et $f : IR^n \times IR \rightarrow IR^n$, on veut résoudre le système différentiel suivant:

$$\begin{cases} \frac{dX(t)}{dt} = f(X(t),t) & t \geq t_0 \\ X(t) = X_0 & t = t_0 \end{cases} \quad (17)$$

La méthode Runge-Kutta utilise plusieurs points intermédiaires pour calculer la valeur de X_{i+1} à partir de la valeur de X_i :

$$\begin{aligned} f_0 &= f(X_0, t_0) \\ f_1 &= f(X_0 + \frac{h}{2} f_0, t_0 + \frac{h}{2}) \\ f_2 &= f(X_0 + \frac{h}{2} f_1, t_0 + \frac{h}{2}) \\ f_3 &= f(X_0 + hf_2, t_0 + h) \\ X(t_0 + h) &= X_0 + \frac{h}{6} (f_0 + 2f_1 + 2f_2 + f_3) \end{aligned} \quad (18)$$

IV. Présentation des Schémas de Résolution par Différences Finies et Semi-implicites de la Méthode de Malik et Perona:

1. Résolution explicite de la mise en œuvre de la Méthode de Malik et perona :

Malik et Perona [6] proposent la discrétisation explicite suivante:

$$u_{i,j}^{t+\Delta t} = u_{i,j}^t + \Delta t (c_{E,j}^t \nabla_E u_{i,j}^t + c_{W,j}^t \nabla_W u_{i,j}^t + c_{N,i}^t \nabla_N u_{i,j}^t + c_{S,i}^t \nabla_S u_{i,j}^t) \quad (19)$$

Où N, S, E, W représentent les directions spatiales, nord, sud, est, ouest. Le symbole ∇ dénote le gradient spatial dans la direction indiquée par l'indice et les coefficients C sont définis par :

$$c_{N,i,j}^t = c(|\nabla_N u_{i,j}^t|), c_{W,i,j}^t = c(|\nabla_W u_{i,j}^t|),$$

$$c_{E_{i,j}}^t = c(|\nabla_E u_{i,j}^t|), c_{S_{i,j}}^t = c(|\nabla_S u_{i,j}^t|) \quad (20)$$

2. Résolution semi-implicite de la mise en œuvre de la Méthode de Malik et Perona:

La facilité d'implémentation des schémas explicites est payée en général par un pas d'intégration très petit pour ne pas perturber la stabilité numérique, ce qui introduit un grand nombre d'itérations avant d'aboutir à la convergence [18] [19]. Weikert [20] a introduit un schéma semi implicite d'intégration nommé Additive Operator Splitting (AOS) avec une stabilité absolue, indépendamment du pas d'intégration. Pour pouvoir utiliser ce schéma, il faut que cette EDP soit écrite sur le modèle suivant:

$$\partial_t u = \text{div}(z(\|\nabla u\|)\nabla u) = \sum_{l=1}^m \left(\frac{\partial}{\partial x_l} z(\|\nabla u\|) \frac{\partial u}{\partial x_l} \right) \quad (21)$$

Où l est l'indice indiquant la dimension jusqu'à l'indice maximal. Pour une image 2D ($x_1 = x$, $x_2 = y$), Le schéma semi implicite s'écrit alors:

$$u^{k+1} = \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m \left[I - (m\Delta t) A_l(u^k) \right]^{-1} u^k \quad (22)$$

Avec $A_l(u^k) = \frac{\partial}{\partial x_l} \left(z(\|\nabla u\|) \frac{\partial}{\partial x_l} \right)$, k le numéro

d'itération en cours et $u_0 = u^0$. Pour obtenir la solution du schéma on résout un système d'équations linéaires par l'algorithme de Thomas [5].

V. Résultats

Pour la comparaison, nous allons utiliser le critère quantitatif « rapport signal sur bruit (SNR) » qui s'exprime en décibels et défini par:

$$SNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{|u|^2}{|u-v|^2} \right) \quad (23)$$

Avec u une image de référence et v l'image après traitement. Nous précisons aussi que le SNR est calculé sur des images centrées sur la moyenne des niveaux de gris.

Le graphique suivant montre les résultats de la comparaison de la variation du rapport signal/ bruit pour les différents schémas numériques

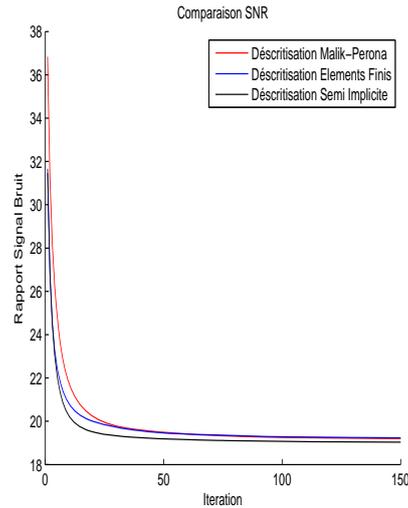


Fig.4. Comparaison de la variation du rapport signal à bruit pour les différents schémas numériques.

La variation des valeurs du rapport signal sur bruit obtenue par la méthode des éléments finis en fonction du nombre d'itérations décroît d'une manière stable et correcte: les plus grandes valeurs sont obtenues au début du processus (entre 10 et 20 itérations), par contre quand le nombre d'itérations croît, la variation se fait d'une façon très douce ce qui montre que notre algorithme devient de plus en plus stable.

En ce qui concerne la comparaison utilisant le SNR, de notre discrétisation par éléments finis, avec la discrétisation par différences finies de Malik et Perona et de la méthode semi implicite, il ressort que les trois méthodes se comportent presque de la même manière et donnent quasiment les mêmes résultats avec un écart correct au début du processus dû à leurs différences théoriques.

Les images qui suivent présentent les résultats obtenus sur des images synthétiques et réelles.

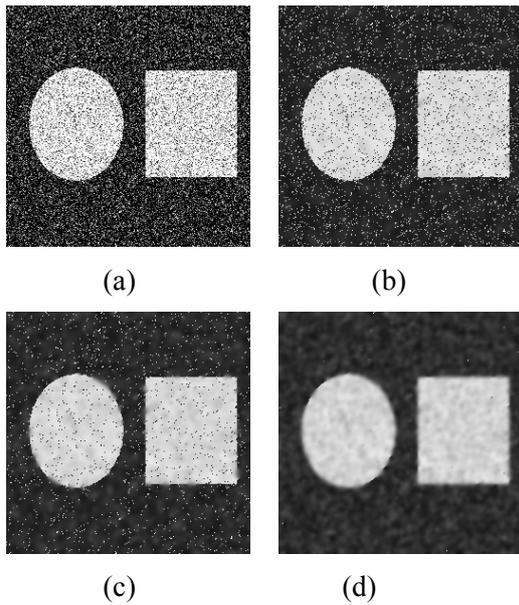


Fig.5. (a) Image synthétique fortement bruitée (512x512) (b) Résolution par l'équation d'éléments finis (100 itérations $dt=0.1$ et $k=0.005$), (c) Résolution par éléments finis (50 itérations $dt=0.1$ et $k=0.1$), (d) Solution par éléments finis (30 itérations $dt=0.1$ et $k=0.2$).

Nous remarquons (Fig. 5) que notre méthode supprime d'une façon efficace le bruit, et que le paramètre de diffusion k joue un rôle important sur la qualité de restauration.

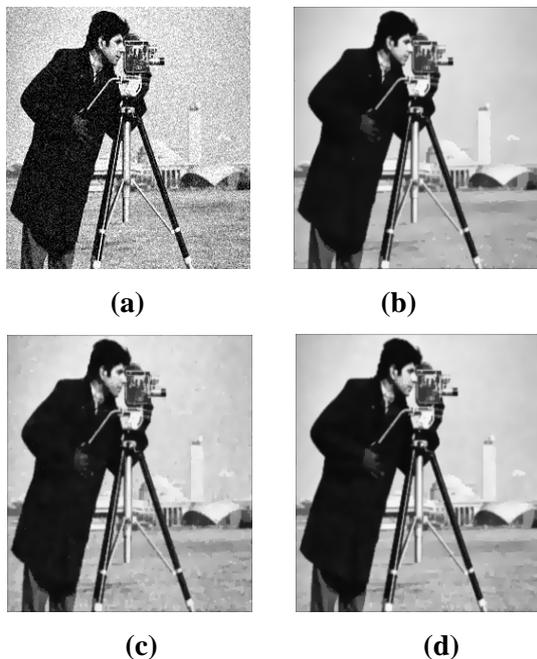


Fig.6. (a) Image réelle bruitée (256x256), (b) solution obtenue par discrétisation de Malik-Perona 50 itération $k=0.01$, (c) solution obtenue par discrétisation semi implicite 50 itération $k=0.01$, (d) solution obtenue par éléments finis 50 itération $k=0.01$.

Nous remarquons (Fig.6) que notre méthode préserve plus de détails de l'image en effet on voit bien que les doigts du cameraman sont dégradés dans la résolution explicite (Fig. 6 (b)) et semi implicite (Fig. 7 (c)) alors qu'il ne l'est pas pour la résolution éléments finis (Fig. 7 (d)).

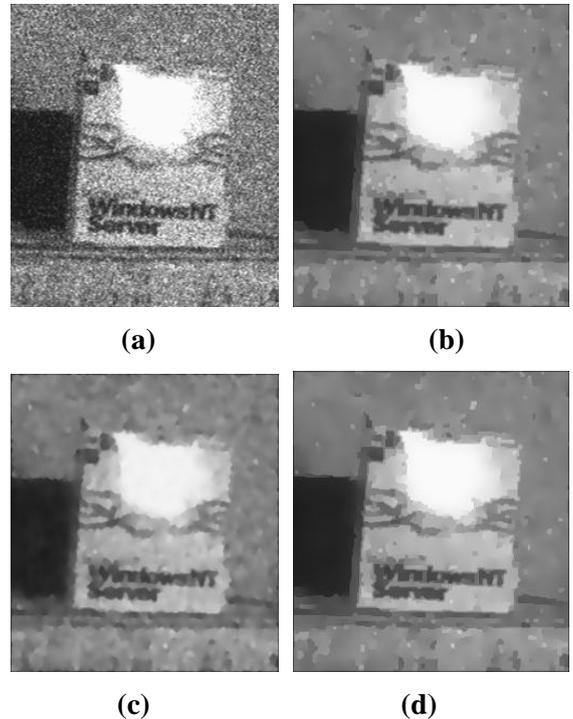


Fig.7. a) Image réelle bruitée (256x256), (b) solution obtenue par discrétisation de Malik-Perona 150 itération $k=0.005$, (c) solution obtenue par discrétisation semi implicite 150 itération $k=0.005$, (d) solution obtenue par éléments finis 150 itération $k=0.005$.

Il est clair que d'une part, notre méthode (Fig. 7 (d)) supprime plus de bruit comparé à la méthode explicite (Fig. 7 (b)), et d'autre part, elle laisse plus intacts les détails dans l'image par rapport à la méthode semi implicite (Fig. 7 (c)) qui rend de plus l'image floue (regarder la lettre w).

Notre méthode est très efficace pour les bruits de type gaussien, Toute fois pour les bruits impulsionnels, il faut appliquer en premier temps quelques itérations de l'équation de la chaleur (2 à 4 itération) afin de diminuer les fortes perturbations du bruit puis appliquer notre méthode.

Pour les images couleurs plusieurs normes du gradient existent dans la littérature [21], l'extension de notre méthode est envisageable avec un bon choix de la norme du gradient.

VI. Conclusion

Nous avons rappelé dans ce papier le principe de la diffusion anisotrope et la méthode des éléments finis. Nous avons proposé une nouvelle mise en œuvre numérique de l'EDP de Malik-Perona par la méthode des éléments finis. Les résultats obtenus sont très satisfaisants.

La comparaison de notre méthode avec les autres schémas numériques permet de dire que notre algorithme est stable, donne des meilleurs résultats.

VII. Références

- [1] R. Deriche, O. faugeras, les EDP en traitement des images et vision par ordinateur. Rapport techniques no. 2697, *institut national de recherche en informatique et automatique*, France, 1995.
- [2] L. Alvarez, F. Guichard, P.L. Lions, and J.M. Morel, Axioms and fundamental equations in image processing, *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, vol. 123, no 3, (1993) 200–257.
- [3] Samir Belfkih, L'application des équations aux dérivées partielles en traitement d'images, *thèse de doctorat de l'université de Montpellier*, France 2002.
- [4] L. Alvarez, F. Guichard, P.L. Lions, and J.M. Morel, Analyse multi-échelle de films. *C. R. Acad. Sci*, vol 315, no 1, (1993), 1145-1148.
- [5] L. Alvarez, P. Lions, and J. Morel, Image selective smoothing and edge detection by nonlinear diffusion, *SIAM Journal of Numerical analysis*, vol. 29, no. 3, (1992) 845-866.
- [6] P. Perona, J. Malik, Scale space and edge detection using anisotropic diffusion, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 12, no. 7, (1990) 629-639.
- [7] S. Osher and L. Rudin, Feature oriented image enhancement using shock filter, *SIAM Journal for Numerical Analysis*, vol. 27, no.4, (1990) 919-940.
- [8] O. Pironneau, B. Lucquin, Introduction au calcul scientifique, *Masson*, 1997.
- [9] [Pavel Šolín](#) Partial Differential Equations and the Finite Element Method, *Wiley*, 2005.
- [10] P.A. Raviart, J.M. Thomas Introduction à l'analyse numérique des équations aux dérivées partielles, *Masson*, 1988.
- [11] O.C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, *The Finite Element Method - The Basis*, Vol. 1, Elsevier 2000.
- [12] V. Girault et P. A. Raviart, Finite element methods for Navier-Stokes equations: Theory and algorithms, *Springer Series in Computational Mathematics*, vol. 5, 1986.
- [13] Y. Saad Iterative Methods for Sparse linear systems, *Society for Industrial and Applied Mathematics*, 2003.
- [14] I. S. Duff, A. M. Erisman, J. K. Reid, Direct Methods for Sparse Matrices, *Oxford University Press*, 1986.
- [15] P. Lascauw et R. Theodor, analyse numérique matricielle appliqué à l'art de l'ingénieur, *Dunod*, 2004.
- [16] J. P. Demailly Analyse Numérique et équations différentielles, *EDP sciences*, 1990.
- [17] M. Sibony et J. Mardon, Approximations et équations différentielles, *Hermann*, 1988.
- [18] J. Sethian, Level Set Methods, *Cambridge University Press*, 1996.
- [19] S.Belfkih, un nouveau schéma numérique pour la mise en œuvre des équations aux dérivées partielles en traitement d'images, *Proceedings of 3rd International conference sciences of electronic technologies of information and telecommunication*, 2005.
- [20] J. Weickert, B. M. Ter Haar Romeny, M. Viergever, Efficient and reliable schemes for nonlinear diffusion filtering, *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 7 no.3, (1998) 398–410.
- [21] A. Trémeau, C. Fernandez-Maloigne, P. Bonton, Image numérique couleur, *Sciences sup*, 2004.



Hybridations métaheuristiques en lots appliquée à l'écoulement optimal de la puissance réactive

M. LAHDEB, A. HELLAL, S. ARIF

Université Amar Telidji de Laghouat, BP-37G-03000 Laghouat, Algérie

**Corresponding author: m.lahdeb@gmail.com

Résumé - Cet article présente l'application de techniques d'hybridations en lots basées sur la combinaison de métaheuristiques appliquées au problème de l'Écoulement Optimal de la Puissance Réactive (EOPR). Cette dernière étant une combinaison entre des approches d'évolution (méthodes heuristiques à population à savoir les algorithmes génétiques et l'optimisation par essaims de particules) et des approches de voisinage (méthode à recherche locale qui sont la recherche taboue et le recuit simulé). L'idée essentielle de ces types d'hybridation consiste à exploiter pleinement la puissance de recherche des méthodes de voisinage et de recombinaison à des algorithmes évolutifs sur une population de solutions. Les algorithmes proposés ont été validés et testés sur deux réseaux (IEEE 14 nœuds et IEEE 30 nœuds) pour minimiser les pertes actives dans le cadre d'un écoulement optimal de la puissance réactive. Les résultats ont été comparés aux résultats obtenus par les métaheuristiques de bases, analysés, et interprétés.

Mots clés - Algorithmes Génétiques, Optimisation par Essaims de particules, Recherche Taboue, Recuit simulé, Hybridation, EOPR, Réseaux Electriques.

I - INTRODUCTION

L'objectif d'effectuer un écoulement optimal de la puissance réactive (ou Optimal Reactive Power Flow – ORPF) est d'obtenir des pertes actives très réduites tout en maintenant les tensions des nœuds dans des limites admissibles, c'est-à-dire un bon profil de tension [1].

Avec la taille grandissante des réseaux électriques et la complexité des phénomènes dont il est siège, fait toujours appel aux outils de calcul numériques les plus perfectionnés aidant à l'amélioration des contraintes techniques, économiques et de sécurité, auxquelles elle fait face. Quand il s'agit, par exemple, de problèmes d'optimisation, ce qui est très souvent le cas, les méthodes conventionnelles se basent sur un modèle complet du réseau pour effectuer une optimisation globale. Par conséquent, elles ont besoin de données complètes, souvent très difficiles à collecter et à échanger. De plus, elles sont parfois incohérentes et imprécises. La qualité des résultats est par conséquent dépendante de celle des données à disposition.

D'autre part, bien que ces techniques soient efficaces, leur application en temps réel dans un centre de conduite se heurte à de nombreuses difficultés, dues principalement à l'approche globale et à l'exigence en temps de calcul.

Ces dernières années ont vu l'émergence de nouvelles techniques s'inspirant de l'intelligence artificielle sont apparues et se sont développées pour se proposer comme d'éventuelles techniques alternatives afin d'améliorer la qualité de la solution de l'ORPF, à savoir les algorithmes génétiques [2], l'optimisation par essaim de particules [3], la recherche taboue [4], le recuit simulé [5] et bien d'autres.

Les Métaheuristiques de base se sont illustrées en proposant des solutions de haute qualité à beaucoup de problèmes réels, tout en évitant les problèmes d'optimum locaux comme pour les méthodes conventionnelles. Cependant, chacune de ces Métaheuristiques de base présente des inconvénients, dont le principal se manifeste en termes de temps de calcul en comparaison aux méthodes conventionnelles.

Depuis, un grand nombre d'algorithmes ont été rapportés, qui ne suivent pas les concepts purs des Métaheuristiques traditionnelles simples et sont plutôt la combinaison de diverses idées algorithmiques. Ces approches sont

généralement désignées sous le nom de Métaheuristiques hybrides.

Si les Métaheuristiques sont des stratégies non-déterministes permettant de guider la recherche d'une solution optimale en explorant l'espace de recherche efficacement afin de déterminer des solutions (presque) optimales, les hybridations sont le fait de profiter des synergies de plusieurs Métaheuristiques de base et exploiter les avantages de chacune pour obtenir des techniques avec de meilleures performances.

L'approche que nous allons proposer pour résoudre le problème de L'ORPF, rentre dans le cadre des hybridations Métaheuristiques intégratives, ou un algorithme est considéré comme un élément subalterne inclus dans un autre algorithme [1].

Dans cette étude, nous avons proposé quatre techniques hybrides, représentent la combinaison d'une méthode à population (Algorithmes génétiques ou Optimisation par Essaim de particule) avec une méthode à parcours (Recherche Taboue ou recuit Simulé).

Des applications au problème d'écoulement optimal de la puissance réactive ont été effectuées pour analyser la pertinence de ces techniques proposées et comparer les résultats avec ceux obtenus par les Métaheuristiques de base pour le même problème. Comme exemples d'applications, nous avons opté pour le choix de modèles de réseaux standard (IEEE 14 nœuds et IEEE 30 nœuds).

II - FORMULATION DU PROBLEME

Le problème de l'ORPF est formulé mathématiquement par une fonction objective $f(x,u)$ représentant une minimisation des pertes actives tout en satisfaisant des contraintes égalités $g(x,u)$ représentées par les équations de l'écoulement de puissance[7], et des contraintes inégalités qui reflètent les limites inférieure et supérieure de la puissance réactive aux nœud de génération et aux nœuds de compensation, les limites inférieure et supérieure des tensions et des rapports des régleurs en charge.

$$\min_x f(x, y) \quad (1)$$

$$(x, u) = 0 \quad (2)$$

$$s. t. h(x, y) \leq 0 \quad (3)$$

$$x_{min} \leq x \leq x_{max} \quad (4)$$

$$U_{min} \leq U \leq U_{max} \quad (5)$$

où: (x_{min}, x_{max}) et (U_{min}, U_{max}) représentent respectivement les limites sur les modules des

tentions aux nœuds générateurs et les rapports de transformation des régleurs en charge.

III - METAHEURISTIQUES HYBRIDES

L'idée d'hybrider les métaheuristiques n'est pas nouvelle mais remonte aux origines des métaheuristiques elles-mêmes. Cependant, au début, de tels hybrides n'étaient pas aussi populaires puisque plusieurs groupes de chercheurs séparés considéraient, chaque groupe séparément, que la classe des métaheuristiques sur lesquelles ils travaillaient était la meilleure et donnait les meilleurs résultats ; Ces chercheurs suivaient ainsi leur philosophie spécifique de manière très dogmatique.

Il faut commencer par distinguer ce qui est hybridé, c-à-d. quels genres d'algorithmes sont combinés. Il est donc possible de combiner [10] :

- (a) différentes stratégies métaheuristiques,
- (b) des métaheuristiques avec certains algorithmes spécifiques pour un problème donné, comme des simulations spéciales,
- (c) ou des métaheuristiques avec d'autres techniques plus générales venant d'autres domaines comme la recherche opérationnelle et/ou l'intelligence artificielle.

Nous pouvons également distinguer entre les métaheuristiques hybrides à travers *leur stratégie de contrôle*. Il existe [8] des combinaisons intégratives (coercitives) et d'autres de collaboration (coopératives).

Dans les approches intégratives, un algorithme est considéré comme un élément subalterne inclus dans un autre algorithme. Cette approche est extrêmement populaire.

Dans les combinaisons de collaboration, les algorithmes échangent l'information, mais ne sont pas une partie l'un l'autre. Par exemple, le modèle insulaire populaire (Island model) [9] pour paralléliser des algorithmes évolutionnaires figure dans cette catégorie. Ce modèle insulaire traditionnel peut être ainsi classé comme approche homogène puisque plusieurs exemples d'applications d'heuristique de même type ont été réalisés. En revanche, certains auteurs [10,11] ont suggéré un cadre hétérogène appelé *équipes asynchrones* (A-Teams). Un A-Team est une architecture de résolution des problèmes se composant d'une collection d'agents et de mémoires reliés dans un réseau dirigé fortement cyclique. Chacun de ces agents est un algorithme d'optimisation et

peut travailler au problème cible, sur une relaxation de ce premier, c.-à-d. une superclasse, ou une sous-classe. L'idée fondamentale des A-Teams est d'avoir ces agents travaillant de manière asynchrone et autonome sur un ensemble de mémoires partagées.

En particulier, dans des combinaisons de collaboration, une autre question est de déterminer les espaces de recherche explorés réellement par les différents algorithmes. Selon [12], on peut distinguer entre une décomposition implicite résultant de différentes solutions initiales, de différentes valeurs de paramètres etc., et d'une décomposition explicite dans laquelle chaque algorithme travaille dans un sous-espace explicitement défini. Décomposer efficacement les grands problèmes est souvent d'importance cruciale dans la pratique. Parfois, des problèmes sont décomposés de manière très naturelle, mais dans la plupart des cas trouver une décomposition idéale en sous problèmes indépendants est difficile. Par conséquent, des schémas auto adaptatifs sont parfois également employés.

Dans notre présente étude, nous nous sommes particulièrement intéressés à une hybridation métaheuristique basée sur l'approche en lots [13]. Nous avons étudié quatre différents algorithmes. Le premier (Algorithme-1), représente une hybridation de l'algorithme génétique avec la recherche taboue et le deuxième, (Algorithme- 2), l'algorithme génétique avec le recuit simulé, le troisième (Algorithme-3), représente une hybridation de l'optimisation par essaims de particules avec la recherche taboue et le quatrième (Algorithme-4), représente une hybridation de l'optimisation par essaims de particules avec la recherche taboue. Les algorithmes proposés commencent par l'application d'une méthode à population (algorithmes génétiques ou pso) pour générer une population de solutions, les meilleures solutions générées sélectionnées, selon un critère défini, étant ensuite utilisées comme solution initiale pour une méthode à recherche locale (recherche taboue ou recuit simulé). Les résultats obtenus à l'issue de l'application des ces deux techniques représente la meilleure solution de tout le problème

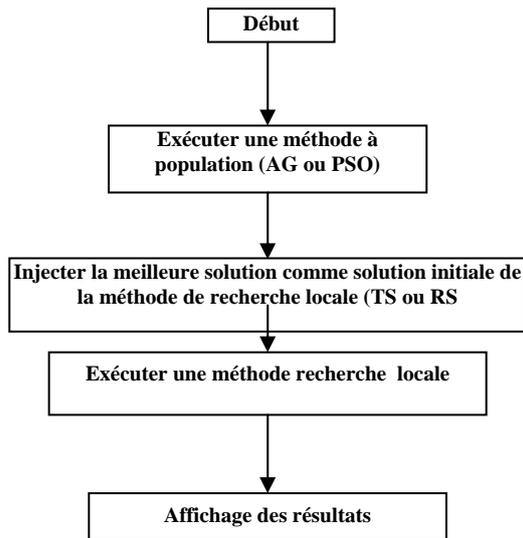


Fig.1. Organigramme de la méthode

IV - SIMULATION ET DISCUSSION DES RESULTATS

Comme mentionné auparavant, la simulation des quatre algorithmes proposés est appliquée au problème d'écoulement optimal de la puissance réactive pour minimiser les pertes actives dans les réseaux électriques. Les tests ont portés respectivement sur deux modèles de réseaux : le réseau IEEE 14 nœuds et le réseau IEEE 30 nœuds [1].

Parmi les hypothèses considérées, les limites des amplitudes de tensions aux différents nœuds sont :

$$0.90 p.u \leq V_G \leq 1.1 p.u$$

$$0.90 p.u \leq V_L \leq 1.1 p.u$$

A. Réseau modèle IEEE 14 nœuds

Une analyse rationnelle nécessite une comparaison entre les résultats obtenus respectivement par les métaheuristiques de base [14] et les métaheuristiques hybrides réalisées dans cette étude. Les niveaux des tensions (en p.u) et les pertes de puissance active (en MW) pour le réseau IEEE 14 nœuds sont présentés respectivement dans les tableaux I, II, III et IV.

TABLEAU I
TENSIONS AUX NOAUDS PAR METAHEURISTIQUES DE BASE (IEEE 14)

BUS	TYPE	V(pu)			
		AG	PSO	TS	RS
V ₁	1	1.0982	1.1000	1.1000	1.1000
V ₂	2	1.0781	1.0850	1.0857	1.0852
V ₃	2	1.0367	1.0565	1.0562	1.0584
V ₄	0	1.0496	1.0666	1.0646	1.0654
V ₅	0	1.0568	1.0684	1.0694	1.0695
V ₆	2	1.0808	1.0900	1.0856	1.1000
V ₇	0	1.0806	1.0699	1.0897	1.0985
V ₈	2	1.0733	0.9550	1.1000	1.1000
V ₉	0	1.0820	1.0821	1.0803	1.0952
V ₁₀	0	1.0745	1.0763	1.0740	1.0889
V ₁₁	0	1.0743	1.0797	1.0764	1.0911
V ₁₂	0	1.0672	1.0759	1.0716	1.0863
V ₁₃	0	1.0637	1.0717	1.0676	1.0823
V ₁₄	0	1.0564	1.0600	1.0571	1.0722

TABLEAU II
TENSIONS AUX NOAUDS PAR METAHEURISTIQUES HYBRIDES (IEEE 14)

BUS	TYPE	V(pu)			
		ALG1 GA-TS	ALG2 GA-RS	ALG3 PSO-TS	ALG4 PSO-RS
V ₁	1	1.1000	1.1000	1.1000	1.1000
V ₂	2	1.0838	1.0849	1.0850	1.0852
V ₃	2	1.0538	1.0578	1.0554	1.0561
V ₄	0	1.0630	1.0651	1.0643	1.0641
V ₅	0	1.0680	1.0697	1.0675	1.0690
V ₆	2	1.1000	1.1000	1.1000	1.1000
V ₇	0	1.0952	1.0984	1.0897	1.0975
V ₈	2	1.0876	1.1000	1.0373	1.0976
V ₉	0	1.0950	1.0958	1.0969	1.0959
V ₁₀	0	1.0887	1.0894	1.0903	1.0895
V ₁₁	0	1.0910	1.0913	1.0918	1.0914
V ₁₂	0	1.0863	1.0863	1.0864	1.0863
V ₁₃	0	1.0822	1.0824	1.0825	1.0824
V ₁₄	0	1.0721	1.0726	1.0733	1.0726

TABLEAU III
PERTES ACTIVES PAR METAHEURISTIQUES DE BASES (IEEE 14)

	AG	PSO	TS	RS
Pertes (MW)	12,4251	12,3091	12,2883	12,2773

TABLEAU IV
PERTES ACTIVES PAR METAHEURISTIQUES HYBRIDES (IEEE 14)

	ALG1	ALG2	ALG3	ALG4
Pertes (MW)	12,2762	12,2795	12,2872	12,2737

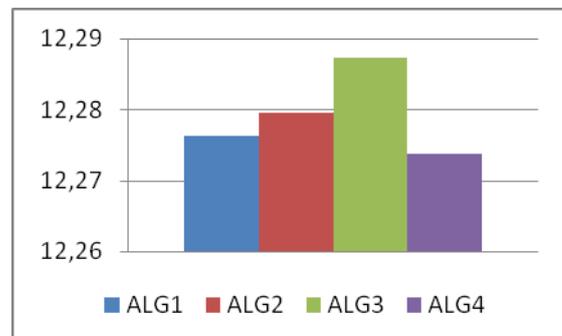


Fig.2. Pertes actives obtenues par les deux algorithmes

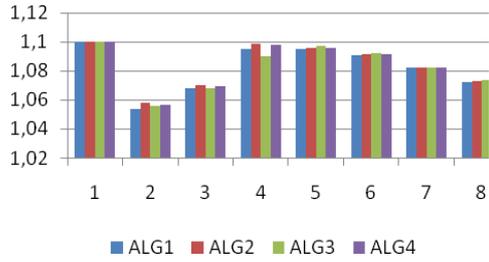


Fig.3. Niveaux de tensions (IEEE 14)

Les figures 4 et 5 illustrent l'évolution des pertes actives en fonction de nombre de génération pour les deux algorithmes hybrides proposés.

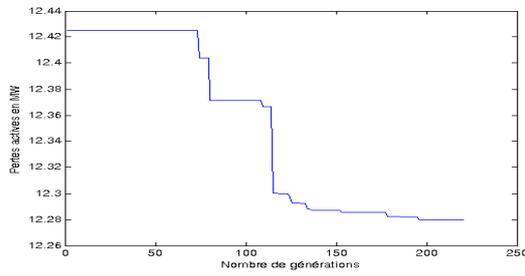


Fig.4. Pertes actives vs nombre de générations (Algorithme-2)

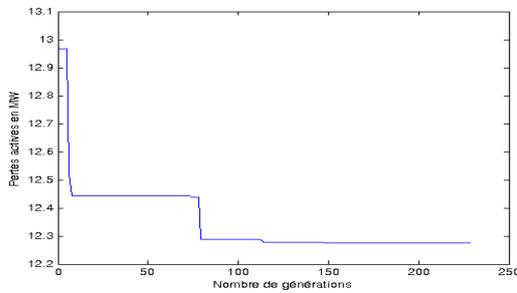


Fig.5. Pertes actives vs nombre de générations (Algorithme-4)

B. Réseau modèle IEEE 30 nœuds

Une simulation similaire a été exécutée pour le réseau IEEE 30 nœuds, et les mêmes remarques et observations se retrouvent à travers les figures (Figs.6-9). et tableaux (V-VIII) correspondants

TABLEAU V
TENSIONS AUX NŒUDS PAR METAHEURISTIQUES DE BASE (IEEE 30)

BUS	TYPE	V(pu)			
		AG	PSO	TS	RS
V ₁	1	1.0927	1.1000	1.1000	1.1000
V ₂	2	1.0550	1.0652	1.0693	1.0650
V ₃	0	1.0498	1.0561	1.0635	1.0572
V ₄	0	1.0400	1.0461	1.0551	1.0474
V ₅	2	1.0186	1.0390	1.0451	1.0377
V ₆	0	1.0335	1.0388	1.0484	1.0375
V ₇	0	1.0198	1.0309	1.0391	1.0296
V ₈	2	1.0435	1.0433	1.0572	1.0400
V ₉	0	1.0110	1.0089	1.0061	1.0019
V ₁₀	0	0.9969	0.9902	0.9877	0.9840
V ₁₁	2	1.0133	0.9964	0.9800	0.9819
V ₁₂	0	1.0054	0.9880	0.9866	0.9867
V ₁₃	2	1.0337	1.0178	1.0158	1.0220
V ₁₄	0	0.9906	0.9745	0.9727	0.9724
V ₁₅	0	0.9866	0.9718	0.9698	0.9690
V ₁₆	0	0.9944	0.9813	0.9795	0.9780
V ₁₇	0	0.9906	0.9819	0.9796	0.9766
V ₁₈	0	0.9775	0.9654	0.9632	0.9614
V ₁₉	0	0.9754	0.9650	0.9626	0.9602
V ₂₀	0	0.9799	0.9704	0.9681	0.9653
V ₂₁	0	0.9843	0.9775	0.9746	0.9711
V ₂₂	0	0.9850	0.9781	0.9752	0.9718
V ₂₃	0	0.9776	0.9661	0.9631	0.9615
V ₂₄	0	0.9744	0.9673	0.9630	0.9604
V ₂₅	0	0.9771	0.9752	0.9670	0.9646
V ₂₆	0	0.9586	0.9567	0.9483	0.9459
V ₂₇	0	0.9876	0.9890	0.9785	0.9763
V ₂₈	0	1.0342	1.0375	1.0487	1.0363
V ₂₉	0	0.9670	0.9685	0.9577	0.9554
V ₃₀	0	0.9552	0.9566	0.9457	0.9434

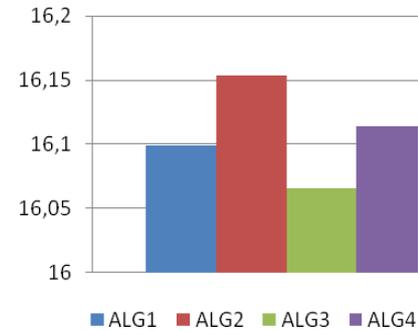


Fig.6. Pertes actives obtenues par les deux algorithmes

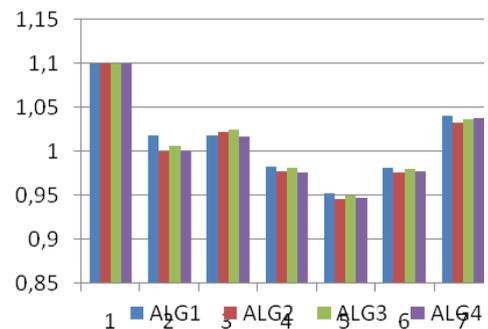


Fig.7. Niveaux de tensions (IEEE 30)

TABLEAU VI
TENSIONS AUX NŒUDS PAR METAHEURISTIQUES
HYBRIDES (IEEE 30)

Bus	TYPE	V(pu)			
		ALG1	ALG2	ALG3	ALG4
V ₁	1	1.1000	1.1000	1.1000	1.1000
V ₂	2	1.0655	1.0630	1.0656	1.0646
V ₃	0	1.0588	1.0551	1.0578	1.0574
V ₄	0	1.0494	1.0448	1.0482	1.0477
V ₅	2	1.0357	1.0310	1.0394	1.0339
V ₆	0	1.0403	1.0341	1.0383	1.0384
V ₇	0	1.0303	1.0248	1.0307	1.0285
V ₈	2	1.0449	1.0361	1.0399	1.0430
V ₉	0	1.0175	0.9996	1.0058	1.0012
V ₁₀	0	0.9939	0.9821	0.9871	0.9830
V ₁₁	2	1.0384	0.9800	0.9905	0.9800
V ₁₂	0	0.9876	0.9857	0.9888	0.9840
V ₁₃	2	1.0174	1.0224	1.0243	1.0167
V ₁₄	0	0.9744	0.9713	0.9746	0.9699
V ₁₅	0	0.9721	0.9679	0.9714	0.9668
V ₁₆	0	0.9827	0.9766	0.9805	0.9760
V ₁₇	0	0.9849	0.9748	0.9795	0.9753
V ₁₈	0	0.9669	0.9599	0.9640	0.9596
V ₁₉	0	0.9672	0.9586	0.9630	0.9586
V ₂₀	0	0.9730	0.9636	0.9682	0.9639
V ₂₁	0	0.9805	0.9693	0.9742	0.9702
V ₂₂	0	0.9810	0.9699	0.9748	0.9708
V ₂₃	0	0.9662	0.9603	0.9641	0.9598
V ₂₄	0	0.9673	0.9590	0.9632	0.9594
V ₂₅	0	0.9699	0.9640	0.9673	0.9647
V ₂₆	0	0.9512	0.9453	0.9487	0.9460
V ₂₇	0	0.9804	0.9761	0.9789	0.9769
V ₂₈	0	1.0398	1.0326	1.0369	1.0375
V ₂₉	0	0.9597	0.9553	0.9581	0.9561
V ₃₀	0	0.9477	0.9433	0.9461	0.9441

TABLEAU VIII
PERTES ACTIVES PAR METAHEURISTIQUES
HYBRIDES (IEEE 30)

	ALG1	ALG2	ALG3	ALG4
Pertes (MW)	16.0988	16.1539	16.0659	16.1138

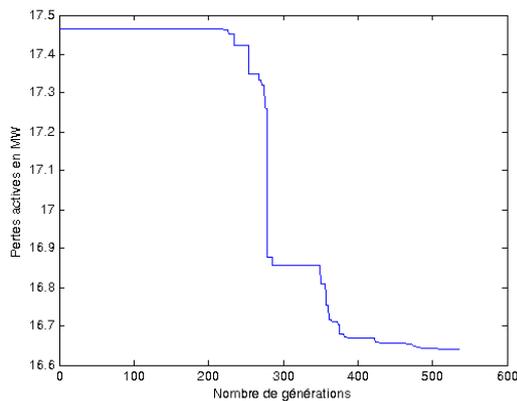


Fig.8. Pertes actives vs nombre de génération
(Algorithme-2)

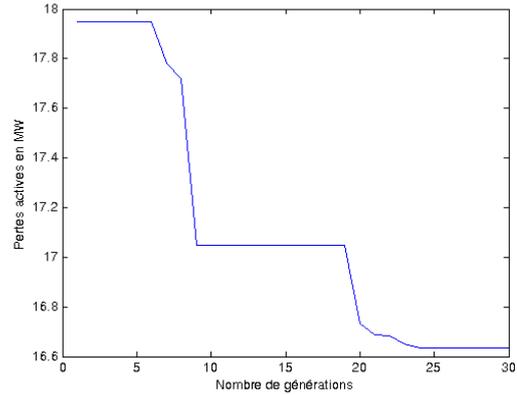


Fig.9. Pertes actives vs nombre de génération
(Algorithme-4)

Une analyse rationnelle des résultats obtenus par les différents algorithmes hybrides utilisés à travers les deux réseaux modèles IEEE14 nœuds et IEEE30 nœuds génère toute une série d'observations.

Précisons d'abord que pour chacun des réseaux étudiés, les résultats obtenus à travers les quatre algorithmes utilisés, et même en les comparant aux résultats des méthodes métaheuristiques de base, ne sont pas éloignés les uns des autres (de 0.004 MW à 0.115 MW pour le réseau IEEE14 nœuds et de 0.0067 MW à 0.2223 MW pour le réseau IEEE30 nœuds), ce qui conforte leur validité, mais cela ne nous empêche pas de regarder plus en détails les différences et la pertinence de chacune des techniques utilisées.

Une première observation est que pour chacun des cas traités, les méthodes hybrides améliorent quelque peu la minimisation des pertes actives par rapport aux métaheuristiques de base.

Ensuite, l'implication du recuit simulé dans les techniques métaheuristiques hybrides a un effet positif sur la valeur des pertes actives, puisqu'on trouve les plus petites valeurs ou parmi les plus petites valeurs. Ceci s'explique par le fait que la méthode du recuit simulé est d'ailleurs celle qui donne les meilleurs résultats pour les métaheuristiques de base.

Maintenant si on compare les résultats des quatre algorithmes étudiés, les méthodes hybrides PSO-RS donnent de meilleurs résultats que les techniques GA-RS, ce qui semble être logique vu que le Recuit Simulé et le PSO sont les techniques les mieux classées en terme de minimisation de pertes actives pour les métaheuristiques de base.

V - Conclusion

Quatre algorithmes métaheuristiques hybrides ont été étudiés et appliqués sur deux modèles standard de réseaux électriques : le IEEE 14 nœuds et le IEEE 30 nœuds, afin de calculer un écoulement de puissance réactif optimal. Pour chacun de ces deux réseaux, la puissance active optimale a été déterminée en maintenant les amplitudes de tensions de tous les nœuds des systèmes de puissance dans des limites admissibles préalablement définis. Les résultats obtenus par les programmes élaborés ont été analysés, comparés à ceux obtenus par les métaheuristiques de base puis discutés. On conclut que les métaheuristiques hybrides étudiées présentent un avantage certain, tant qualitatif c'est-à-dire au niveau des résultats pratiques comme une diminution des valeurs des pertes actives tout en respectant le plan des tensions dans les limites des marges admises. Cependant, pour toutes les méthodes, quelle que soit la technique utilisée, conventionnelle, métaheuristique ou autre, le compromis "pertes actives-plan de tension" est toujours respecté.

IV- ANNEXES

Les paramètres de contrôle utilisés sont les suivants :

$nind = 70$ (AG)	Taille de la population
$nbus = 14$	Nombre des nœuds
$nvar = 8$	Nombre de variables
$ngenes = 16*nvar$	Nombre de gènes
$Pc = 0.9$	Probabilité de croisement
$Pm = 0.05$	Probabilité de mutation
$ngener = 18$ générations (AG)	Nombre de
$crossPt = 2$ croisement	Nombre de Points de
$iter_max = 12$ max (TS)	Nombre d'itérations
$L = 5$	Longueur de la liste
Tabous	
$M = 50$	Nombre de points de
recherche	
$idiver = 1$	Nombre de
diversification	
$intens = 4$ d'intensification	Nombre
$\alpha = 0.9$	Coefficient de
température.	
$T_0 = 10$	Température initial
$Maxtrie = 10$ maximal.	Nombre des itérations

$Stoptemp = 10^{-9}$	Critère d'arrêt de la température.
$wmin = 1.1$	Poids final
$wmax = 0.9$	Poids initial
$itmax = 20$	Nombre maximum
d'itération (PSO).	
$c_1 = c_2 = 1.5$	Facteurs de pondération.
$nind = 100$ (PSO).	Taille de la population
$Vmin = -2$	Limite minimale du vecteur déplacement.
$Vmax = +2$	Limite maximale du vecteur Déplacement

VI - Références

- [1] Lahdeb Mohamed "Théorie et Application de Méthodes d'Hybridations Métaheuristiques dans les Réseaux électriques" Thèse de Magister Université de Laghouat Septembre 2008.
- [2] Holland J.H, *Adaptation in natural and artificial system*, Ann Arbor, The University of Michigan Press, 1975.
- [3] Kennedy, J., and Eberhart, R. C. (1995). Particle swarm optimization, *Proceedings of the IEEE Conference on Neural Networks*, IV, Piscataway, NJ, pp. 1942-1948.
- [4] F.Glover et M.Laguna, Tabu Search: Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems. C.R Reeves editeur, Blackwell Publishing, p. 70-150?(1962).
- [5] S. Kirkpatrick, C. Gelatt and M. Vecchi, 'Optimization by simulated annealing', Science Vol. 220, No. 4598, May 1983, pp. 671-680.
- [6] M. Lin, R. K. Rayudu and S. Samarasinghe « Toward A Hybrid Real-Time Opimal Voltage/Var Control System— A Review », Centre for Advanced Computational Solutions Lincoln Universit
- [7] Blesa, M.J., Blum, C., Roli, A., Sampels, M., eds.: Hybrid Metaheuristics: Second International Workshop. Volume 3636 of LNCS. (2005)
- [8] Puchinger, J., Raidl, G.R.: Models and algorithms for three-stage two-dimensional bin packing. European Journal of Operational Research, Feature Issue on Cutting and Packing (to appear 2006)
- [9] Storer, R.H., Wu, S.D., Vaccari, R.: New search spaces for sequencing problems with

- application to job-shop scheduling. *Management Science* 38 (1992) 1495–1509.
- [10] Glover, F., Laguna, M., Martí, R.: Fundamentals of scatter search and path relinking. *Control and Cybernetics* 39(3) (2000) 653–684
- [11] Applegate, D., Bixby, R., Chvátal, V., Cook, W.: On the solution of the travelling salesman problem. *Documenta Mathematica* Vol. ICM III (1998) 645–656
- [12] Glover, F., Kochenberger, G.A.: *Handbook of Metaheuristics*. Kluwer (2003)
- [13] Yutian Liu, SM IEEE Li Ma, Jianjun Zhang « *GA/SA/TS Hybrid Algorithms for Reactive Power Optimization* » Department of Electric Power Engineering Shandong University of Technology, Jinan, 250061 China
- [14] M.Lahdeb, A. Hellal, S. Arif « Synthèse de métaheuristiques de base appliquées à l'Écoulement de Puissance Optimal Réactif » 2nd International Conference on Electrical and Electronics Engineering 21-23 April 2008, Université Amar Telidji – Laghouat.



Simulation d'un modèle physique de configuration tige-plan pour l'étude du champ d'apparition des streamers positifs sur une surface de glace

B. ALILI, B. ZEGNINI

Laboratoire d'études et Développement des Matériaux Semi-conducteurs et Diélectriques, LeDMaScD, Université Amar Telidji de Laghouat, BP 37G route de Ghardaïa, Laghouat 03000

**Corresponding author: b.zegnini@mail.lagh-univ.dz

Résumé - Ce travail vise à explorer davantage les caractéristiques des couronnes de streamers positifs en présence de surface de glace et à interpréter les mécanismes physiques fondamentaux impliqués dans leur développement. Des simulations sur un modèle physique de géométrie simple (tige-plan), avec différentes valeurs d'intervalle d'air et de rayon de courbure de l'électrode HT, ont été menées. Les résultats obtenus ont montré que la présence d'une surface de glace dans l'intervalle des électrodes modifiait considérablement les caractéristiques d'amorçage et de propagation des streamers positifs. Il a été noté que l'augmentation de la conductivité de l'eau de congélation ou de la température induisait une réduction du champ d'apparition des streamers.

Mots clés - Configuration tige-plan, Contournement, Conductivité de la glace, Simulation, Streamers positifs.

I. INTRODUCTION

Les isolateurs sont bien connus comme étant parmi les principaux équipements dont dépend la fiabilité des réseaux de transport d'énergie. Bien qu'ils soient conçus pour faire face aux contraintes environnementales les plus sévères, il reste que dans les régions à climat froid, le givrage atmosphérique durant l'hiver les rend très vulnérables. En effet, sous des tensions d'opération habituelles, l'accumulation de glace sur leur surface peut causer l'apparition précoce de couronnes de streamers ou d'arcs partiels pouvant mener rapidement à un contournement. La présence de glace diminue alors la rigidité diélectrique des isolateurs affectant ainsi la fiabilité des lignes de transport et la qualité de la distribution d'énergie. Pour remédier à ce problème, deux actions s'avèrent nécessaires. Il s'agit soit d'optimiser la prédiction de leur contournement lorsqu'ils sont recouverts de glace soit de concevoir des isolateurs mieux adaptés au climat des régions froides. Pour cela l'amélioration des connaissances sur les mécanismes physiques impliqués dans le développement d'une décharge sur une surface de glace est l'ultime phase pour l'élaboration d'outils fiables de prédiction du contournement des isolateurs recouverts de glace. Elle facilitera en outre la conception d'isolateurs mieux adaptés au climat des régions froides, ce qui améliorera la fiabilité des réseaux de transport d'énergie dans des conditions de givrage atmosphérique.

Le modèle physique choisi pour cette étude est de configuration tige-plan avec l'électrode plane reliée à la masse. Il va nous permettre de contrôler certains paramètres géométriques s'étant révélés extrêmement influents dans les phases d'initiation et de propagation de la décharge. Il s'agit du rayon de courbure de l'électrode haute tension et de la distance inter-électrodes [1, 2, 3].

L'objectif de notre travail est la détermination des paramètres d'apparition et de propagation des streamers en présence d'une surface de glace en s'appuyant sur des mesures effectuées à l'aide de la caméra ultra rapide et du photomultiplicateur PMT, il a été possible d'obtenir des résultats sur l'instant d'apparition des streamers, la tension et le champ électrique appliqués correspondants, la période sombre, la vitesse de propagation et la durée du développement de la décharge. Dans ce papier nous allons analyser les effets spécifiques des paramètres expérimentaux tels, la conductivité de l'eau de congélation, la température et le

champ électrique appliqué (effet de la distance et du rayon de courbure de l'électrode haute tension).

Les simulations seront consacrées aux petits intervalles pour lesquels le développement de la décharge sera uniquement limité aux streamers sans tendance de formation de leader.

II. MODÈLE PHYSIQUE

Nous avons choisi un modèle physique de faibles dimensions mais beaucoup plus grandes que celles étudiées dans les précédentes investigations de la CIGELE. Ce modèle de configuration tige-plan avec l'électrode plane reliée à la masse permet de contrôler certains paramètres géométriques s'étant révélés extrêmement influents dans les phases d'initiation et de propagation de la décharge. Il s'agit du rayon de courbure de l'électrode haute tension et de la distance inter-électrodes [4-7]. Alors notre test consistera en une trois différentes valeurs de rayon de courbure, $r = 1.5, 3, 6$ mm pour l'électrode haute tension avec une distance inter-électrodes de $d = 35$ mm mais d'autres tests se sont aussi effectuées pour $d = 70$ mm pour étudier l'effet de la distance sur certains phénomènes. Il faut noter aussi que sur l'électrode plane est ajoutée une très légère pointe de sorte à augmenter les chances d'obtenir une décharge la plus rectiligne possible.

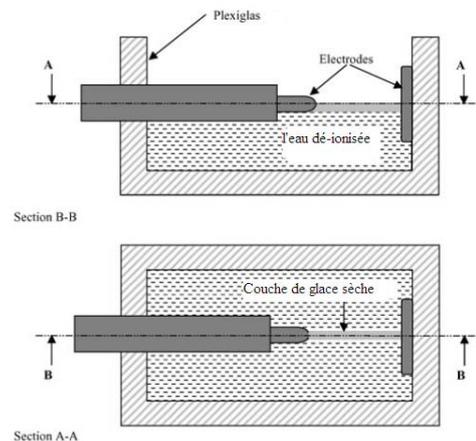


Fig.1. Coupe longitudinale et verticale du modèle physique en présence d'une surface de glace

La tension d'impulsion a été appliquée par un générateur d'impulsion de HT à la tige, la durée de champ de l'appareil-photo employé pour enregistrer l'optique des phénomènes peuvent être variés de 0.5 ns à 1 ms. la longueur d'onde couverte par l'appareil-photo s'étend de l'ultraviolet lumière à la région infrarouge proche (200 à 850 nm).

La figure 2 donne un exemple typique des enregistrements obtenus à l'aide de la caméra ultra rapide.

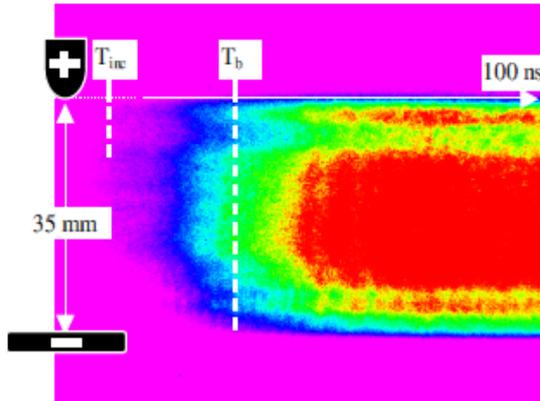


Fig.2. Les enregistrements typiques de l'apparition et de la propagation de couronne de streamer sur une surface de glace (pour $d = 35$ mm, $r = 6$ mm, $T = -12^{\circ}\text{C}$ et $\sigma = 80 \mu\text{S/cm}$) [3]

Cette image a été enregistrée avec une période de 100 ns . L'axe vertical dans les photographies est aligné avec axe des électrodes, tandis que l'axe horizontal représente temps. Beaucoup de précautions sont prises pour que la surface de glace soit la plus lisse possible. Au besoin, une lame de plexiglas est utilisée pour polir la couche de glace. Le modèle physique est placé dans la chambre climatique "Envirotronics EH40-2-3", dans laquelle la température reste maintenue à celle désirée pour le test. Cette durée nous semble suffisante pour baigner le modèle dans la température de l'air ambiant, à l'intérieur de la chambre climatique.

III. CHOIX DES PARAMÈTRES DE SIMULATION

Les valeurs de distance utilisées dans nos tests ont été choisies dans l'objectif d'approfondir les résultats obtenus dans les investigations précédentes de la CIGELE [3, 8]. Ces travaux avaient déjà établi la nette influence de la distance inter-électrodes sur le processus de la décharge. Nos valeurs de distance inter-électrodes sont $d = 35$ mm et $d = 70$ mm. Il faut aussi dire que ces valeurs ont été choisies en fonction des limites d'observation de la caméra à balayage de fente, car plus la distance est grande, plus décharge suit un chemin aléatoire et ainsi a plus tendance à se propager en dehors de la zone d'observation de la caméra. Par conséquent les valeurs de distance choisies nous semblent être un parfait consensus entre l'importance de ce paramètre et les performances de la caméra.

Le rayon de courbure des électrodes s'étant révélé être un paramètre très important dans le développement de la décharge, quatre valeurs de rayon de courbure de l'électrode haute tension ($r = 1.5$ mm, 3 mm et 6 mm) ont été utilisées dans nos investigations. En effectuant des tests avec la même distance inter-électrodes (d), ces différentes valeurs de rayon de courbure (r) permettent d'analyser un autre paramètre, le rapport d/r .

Les différentes valeurs de conductivité utilisées sont $\sigma = 2.5, 30$ et $80 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Elles ont été choisies en accord avec celles obtenues sur les sites naturels de givre. Ces valeurs ayant déjà servi dans les investigations précédentes [7, 8], il paraît tout à fait naturel de les utiliser à nouveau dans nos tests pour des raisons de comparaison et d'analyse. Pour obtenir de l'eau avec une certaine conductivité, du chlorure de sodium (NaCl) est progressivement ajouté dans de l'eau dé-ionisée jusqu'à atteindre la valeur désirée. La conductivité obtenue est attribuée à la couche de glace puisqu'il est très difficile de mesurer avec précision la conductivité de la glace.

Les valeurs de température choisies pour nos tests ont été déjà utilisées dans des études antérieures [7,8]. Le choix de ces mêmes valeurs permettra d'approfondir les résultats déjà obtenus sur l'effet de la température sur les paramètres d'apparition de la décharge. Nos tests ont été effectués pour la plus part à la température $T = -12^{\circ}\text{C}$. Cependant deux autres valeurs, $T = -6^{\circ}\text{C}$ et $T = -2^{\circ}\text{C}$, ont aussi été utilisées dans le but d'approfondir les investigations. Ces valeurs permettent de maintenir la couche de glace à un état sec. La température de la couche de glace est toujours considérée égale à celle de la chambre climatique. Le modèle est toujours placé suffisamment longtemps dans la chambre avant le début des tests pour que la couche de glace puisse adopter la température ambiante.

IV. MODÉLISATION DU CHAMP ÉLECTRIQUE

L'étude de l'espace ionisé inter-électrodes se ramène à la détermination de la tension seuil, du champ électrique et du potentiel électrique en tout point de l'espace, de la répartition de la densité de charge spatiale et de la caractéristique « courant-tension ». La connaissance de ces paramètres permet de caractériser et d'optimiser le processus de charge et de contrôler l'alimentation.

La tension seuil est la valeur critique où apparaît l'ionisation et donc, une densité de charge spatiale. En dessous de cette limite, le champ électrique satisfait l'équation de Laplace:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (1)$$

L'application d'une tension supérieure à la tension seuil V_s engendre l'apparition d'un courant qui entraîne une perturbation de la distribution de ce champ électrique. En supposant que la mobilité des ions est constante et en ne tenant compte que de la zone de dérive, les équations régissant le champ électrique dans l'espace inter-électrodes sont données par le système suivant :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2)$$

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} V \quad (3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j} = 0 \quad (4)$$

$$\vec{j} = \rho \cdot \mu \cdot \vec{E} - D_e \cdot \vec{\nabla} \rho \quad (5)$$

Avec \vec{E} champ électrique, V potentiel électrique, $\epsilon_0 = 8.854187817 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ permittivité du vide, ρ densité de charge ionique, \vec{j} densité surfacique de courant, μ mobilité électrique des ions, D_e coefficient de diffusion ionique.

L'équation de Poisson (1) décrit le champ électrique ionisé ; L'équation (2) relie le champ électrique au potentiel électrique ; l'équation (3) exprime la conservation du courant ; l'équation (4) relie la densité de courant ionique au champ électrique.

De plus, les vitesses des ions dues à la diffusion sont en général négligeables devant celles résultant du champ électrique. Donc ce qui revient à écrire que la densité de courant est proportionnelle au champ électrique :

$$\vec{j} = \mu \cdot \rho \cdot \vec{E} \quad (6)$$

Le logiciel Comsol Multiphysics 3.5 contient un module d'électrostatique qui permet de résoudre le champ électrique mais avec une densité de charge spatiale constante. Dans un premier temps nous avons essayé de modifier les équations de ce module pour prendre en compte la variation de la densité de charge dans l'espace inter-électrodes mais sans succès. Donc pour cette raison, nous allons réécrire les équations du

système (x) de façon à les intégrer dans Comsol. La résolution du système linéaire, obtenu après discrétisation du problème, est effectuée à l'aide du solveur UMFPAK. Ce solveur est basé sur une résolution directe du système ce qui permet d'obtenir une solution précise. Pour déterminer le degré d'homogénéité d'une configuration d'électrodes, des paramètres tels le facteur de forme (F) ou le rapport du rayon de courbure de l'électrode HT et de la distance (r/d) sont souvent utilisés. Le facteur de forme semble cependant être le meilleur paramètre pour caractériser la non-uniformité de l'intervalle. Pour une configuration d'électrodes donnée, il est défini par la relation suivante :

$$F = \frac{E_{moy}}{E_{max}} \quad (7)$$

Avec

$$E_{moy} = \frac{U_{app}}{d} \quad (8)$$

E_{max} est le du champ électrique maximum produit autour de l'électrode de tige et E_{moy} Le champ moyen correspond au rapport de la tension appliquée sur la distance entre les électrodes tandis que le champ maximal s'obtient à l'aide de simulations numériques.

À titre d'exemple les distributions du champ axial, obtenues dans le cas de l'air et en présence de glace sont présentées sur les figures 3et 4.

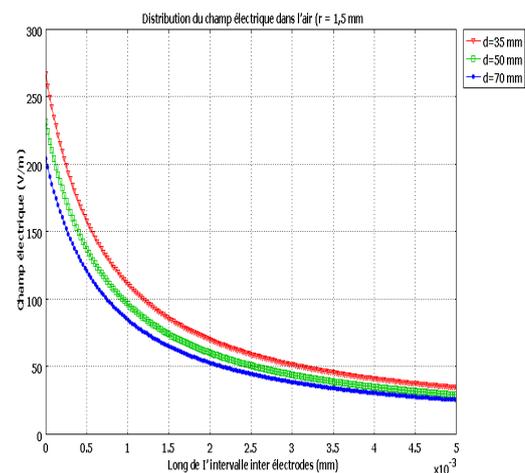


Fig.3. Distribution du champ axiale dans l'air. Pour $U_{app} = 1V$ et $R = 1,5 \text{ mm}$.

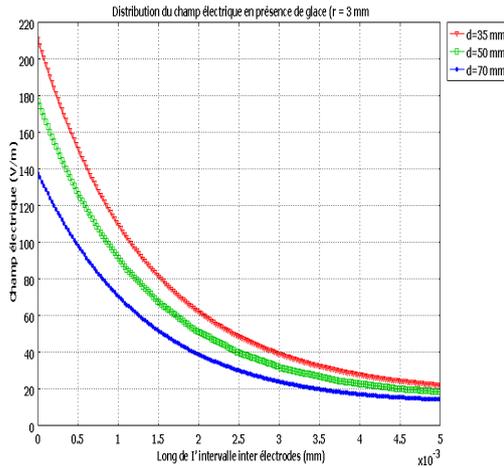


Fig.4. Distribution du champ axial en présence de surface de glace. Pour $U_{app} = 1V$ et $R = 3mm$.

Ces figures montrent que le champ d'initiation est plus élevé dans le cas de présence d'une surface de glace qu'en l'air. En effet, les courbes de simulation de champ montrent que l'accentuation du champ électrique au bout de l'électrode haute tension est plus élevée en présence d'une surface de glace.

Le champ obtenu n'est pas le champ seuil local d'apparition des streamers mais bien le champ minimal appliqué à l'électrode HT, à partir duquel une couronne de streamers s'amorce dans l'intervalle. En effet, les couronnes peuvent naître dans des zones où le champ local est plus faible que le champ appliqué à l'électrode HT. Dans le cas de l'air, le lieu de ces zones est défini par le concept du volume critique.

Tableau 1. Le champ électrique et facteur de forme pour les différentes configurations d'électrodes

r (mm)		1,5	3
d=35(mm)	E (max) (V/m)	318.80194 (266.68292)	210.44345 (148.56631)
	F	0.0896 (0.1071)	0.1358 (0.1923)
d=50(mm)	E (max) (V/m)	243.0286 (231.4189)	176.78659 (129.63243)
	F	0.0823 (0.0864)	0.1131 (0.1543)
d=70(mm)	E (max) (V/m)	209.87016 (203.91939)	137.40509 (113.71171)
	F	0.0681 (0.0701)	0.1040 (0.1256)

Le tableau 1 présente les valeurs du facteur de forme pour les différentes configurations utilisées. Les valeurs dans le cas de l'air sont données entre parenthèses.

V. RÉSULTATS DE SIMULATIONS

Le champ seuil d'apparition est obtenu par simulations numériques effectuées à l'aide du logiciel Comsol Multiphysics 3.5.

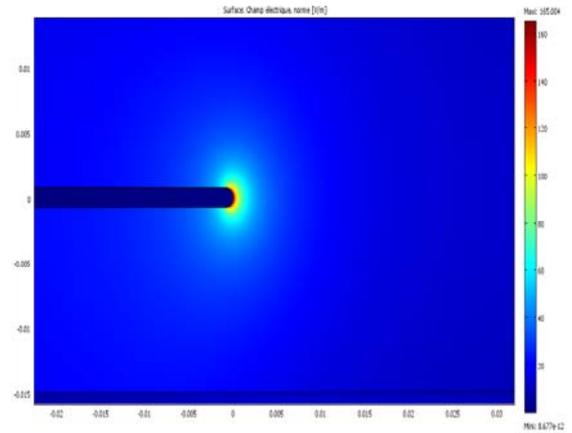


Fig.5. Répartition du champ électrique entre l'électrode haute tension dans l'air pour $r = 1.5mm$ et $d = 35mm$

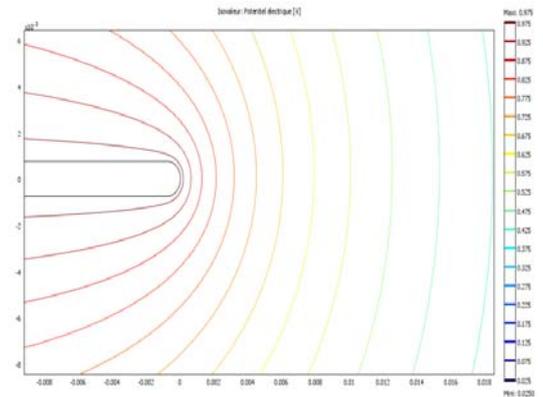


Fig.6. Répartition du potentiel entre l'électrode haute tension dans l'air pour $r = 1.5mm$ et $d = 35mm$

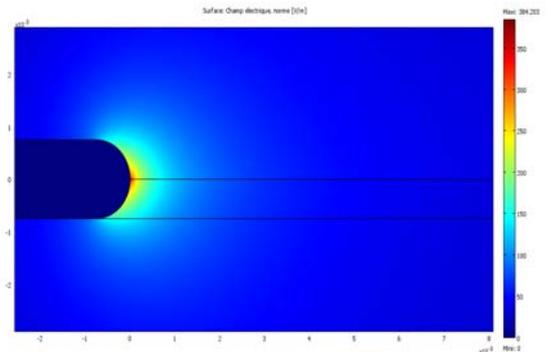


Fig.7. Répartition du champ électrique entre l'électrode haute tension et la surface de glace pour $r = 1.5mm$ et $d = 35mm$

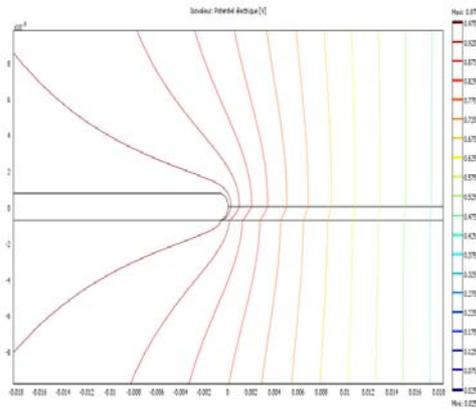


Fig.8. Répartition du potentiel entre l'électrode haute tension et la surface de glace pour $r = 1.5\text{mm}$ et $d = 35\text{mm}$

Les tensions d'apparition des streamers en présence de glace légèrement polluée pourraient s'expliquer par l'influence de la forte permittivité de la glace qui induit une distorsion des lignes de champ en dirigeant celles-ci vers la surface. Ainsi la ligne de champ maximal devient renforcée sur la surface, ce qui favorise le développement des avalanches à l'interface glace/air et non entièrement dans l'air. Par ailleurs, d'après les résultats de simulations de champ que nous avons effectuées à l'aide du logiciel COMSOL (Figs 5-8), nous avons constaté qu'en augmentant la distance entre les électrodes pour une électrode HT donnée, la non uniformité de l'intervalle augmente. C'est aussi le cas quand on augmente le rayon de courbure de l'électrode HT pour un intervalle inter-électrode donné. En faisant maintenant la relation entre l'inhomogénéité de l'intervalle et les valeurs de la tension d'apparition, on remarque que plus les intervalles sont uniformes, plus les tensions d'apparition dans l'air sont proches de celles en présence de surface glace.

Les lignes de champ sont en effet moins détournées vers la surface de glace, ce qui réduit la contribution de la surface dans le développement des avalanches.

Les figures 9 et 10 présentent une comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux simulés des tensions d'apparition des streamers pour différentes conductivités surfaciques de la glace (30 et 80 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et à des températures de test -12°C , -6°C et -2°C . Rappelons que la tension d'apparition des premières couronnes de streamers est obtenue en corrélant leur instant d'apparition, détecté par PMT, avec la forme d'onde de la tension applique.

Les résultats montrent que la tension d'apparition de la première couronne de streamer varie beaucoup en fonction de la température et du niveau de pureté de la glace. En effet, on remarque que plus la conductivité augmente plus la tension d'apparition des streamers devient faible. Cette tendance est observée pour tous les rayons de courbure et pour toutes les distances inter-électrodes.

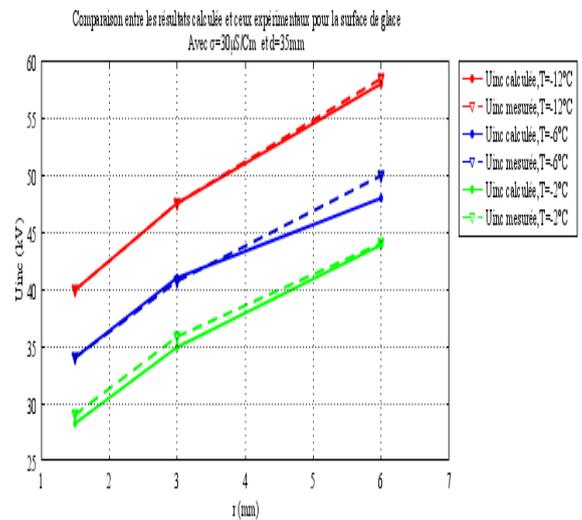


Fig.9. Tension d'apparition de la première couronne de streamers. Avec $\sigma = 30\ \mu\text{S}/\text{cm}$ et $d = 35\text{mm}$

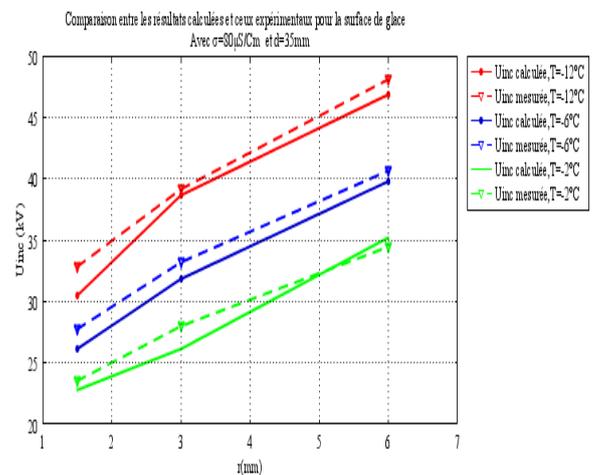


Fig.10. Tension d'apparition de la première couronne de streamers. Avec $\sigma = 80\ \mu\text{S}/\text{cm}$ et $d = 35\text{mm}$.

VI. CONCLUSION

Nous venons d'étudier dans cet article les caractéristiques des streamers positifs en présence de surface de glace et dans le cas de l'air. Les résultats de simulations effectués sur un modèle physique de configuration tige –plan en utilisant le logiciel COMSOL ont permis de constater que la présence de la surface de glace influençait considérablement l'apparition et le développement des streamers. La permittivité de la glace, plus grande que celle de l'air en est l'une des principales raisons. En effet, la forte présence d'impuretés et l'existence d'une couche quasi-liquide sur la surface sont aussi apparues comme étant des facteurs déterminants dans le développement des streamers. Ces deux paramètres ont été contrôlés par la conductivité de l'eau de congélation et la température et leur variation a permis de montrer que pour une configuration d'électrodes donnée, le champ d'apparition des streamers diminue lorsqu'on augmente la conductivité de l'eau de congélation pour une même température ou lorsqu'on augmente la température pour une conductivité donnée.

VII. REFERENCES

- [1] M. Farzaneh and J. Kiernicki, "Flashover problems caused by ice build-up on Insulators", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, pp. 1602-1613, 1997.
- [2] M. Farzaneh, "Ice accretion on high voltage conductors and insulators and related phenomena", Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, Vol. 358, No. 1776, pp. 2971-3005, 2000.
- [3] M. Farzaneh and I. Fofana « Experimental study and analysis of corona discharge parameters on an ice surface » J. Phys. D: Appl. Phys. 37 (2004) 721–729.
- [4] C. Zener, "A Theory of the Electrical Breakdown of Solid Dielectrics", Proc. R. Soc., 145:523-529, Lond, A July 2, 1934.
- [5] N. L. Allen and D. C. Faircloth, "Corona propagation and charge deposition on a PTFE surface", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 10, No. 2, pp. 295-304, 2003.
- [6] M. Farzaneh and J. Kiernicki, "Flashover problems caused by ice build-up on Insulators", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, pp. 1602-1613, 1997.
- [7] I. Ndiaye, I. Fofana and M. Famaneh, «Contribution a l'étude de l'apparition et du développement des décharges couronnées a la surface de glace», CCECE 2003 – CCGEI 2003, Montréal, May/mai 2003.
- [8] I. Fofana and M. Farzaneh, "A simplified model of corona discharge development on an ice surface", IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (CEIDP), pp. 667-670, 2004.



Banque de graines des sols des périmètres céréaliers abandonnés de la région d'Ouargla

M. MARFOUA, A. EDDOUN, A. M. CHEHMA

Laboratoire de bio-ressources sahariennes
Université Kasdi Merbah OUARGLA, BP 511-Algérie

**Corresponding author: marfouameriem@gmail.com

Résumé - Des milliers d'hectare autrefois parcourus sahariens pour le camelin, ont été perturbé par la mise en valeur agricole. Et Après utilisation, des centaines d'hectares de ces terres agricoles sont délaissées, Ne sachant quel avenir pour ces terres, nous nous proposant par cette étude de mettre en évidence l'aptitude de restauration écologique de ces surfaces par l'étude de la banque des graines.

Pour réaliser notre étude sur la banque de graines des périmètres céréaliers abandonnés de la région d'Ouargla. Nous avons échantillonné le sol dans 03 pivots céréaliers abandonnés suivant 03 âges d'abandon: 03 ans, 05 ans et 10 ans, selon deux profondeurs 0-25 cm et 26-50 cm. La germination des graines a été suivie pendant quatre mois dans une serre tunnel. On a identifié 10 espèces de plantes à graines dans l'horizon de sol 0-25 cm avec une densité totale variant entre 500 à 29 500 graines/m² et 04 espèces seulement pour la deuxième profondeur 26-50 cm avec une densité qui varie de 500 à 3 500 graines/m². Les *Poaceae* et les *Amaranthaceae* dominent et contiennent surtout des espèces liées à l'activité humaine (flore introduite). Plus la durée d'abandon des pivots est importante, on assiste à une réinstallation de la flore spontanée et un appauvrissement en flore introduite d'où les possibilités de restauration sont à préconiser.

Mots clés - Banque de graines, Flore, Ouargla, Pivot, Restauration.

I - Introduction

Les zones sahariennes qui recèlent de fortes potentialités en eau et en « sol » constituent une alternative pour faire face à la demande croissante des produits céréaliers. Depuis le lancement de la céréaliculture sous centre pivot dans la wilaya d'Ouargla des grandes variations des niveaux de rendement ont été observé qui en général demeurent faibles pour une culture de céréales en intensif et loin des objectifs tracés et de la rentabilité économique, ces résultats ont conduit à une régression des surfaces emblavées et un désintéressement des agriculteurs à cette céréaliculture sous centre pivot.

Devant le problème de messicoles ou mauvaises herbes, l'inefficacité des méthodes (introduites et non adaptées aux conditions sahariennes), la cherté des intrants (semences, engrais, énergie, produits phytosanitaires, ...etc.), les agriculteurs se sont orienté soit vers une autre spéculation, soit (pour la plus part d'entre eux) en abandonnant ces pivots.

Les graines constituent un moyen de conservation important, car elles sont souvent plus tolérantes aux conditions défavorables que la plante elle-même. Ceci est important dans les milieux extrêmes [1].

La persistance de graines dans le sol est une stratégie que les espèces peuvent utiliser afin d'être présentes dans une communauté végétale. Ces graines, stockées dans le sol, constituent la banque de graines qui se forme à partir des graines provenant des communautés végétales locales, voisines ou éloignées. Cette banque constitue une réserve qui va intervenir dans le mécanisme de régénération, seules les graines viables sont prises en compte [2].

Le terme d'une banque de graines du sol a été employé pour indiquer le réservoir viable de graines actuel dans un sol [3].

L'analyse du stock semencier des sols agricoles, reflet du passé cultural parcellaire, réalisée dans différentes conditions géographiques et agronomiques montre que ces sols renferment une quantité importante de semences viables [4] [5] [3]. Même dans les régions où le désherbage chimique et régulièrement pratiqué depuis de nombreuses années [6].

Dans les régions sahariennes, La banque de graines a été peu étudiée : Nous citons à titre d'exemple le travail de BOUKHATEM (1996), dans une étude menée sur le problème des

adventices sous pivots à Ouargla ayant rapporté que la majorité du stock grainier des mauvaises herbes se localise dans les 20 premiers centimètres du profil cultural soit (98,11 %) [7].

Sachant que l'installation des cultures céréalières sous pivot s'est opérée essentiellement dans les zones de parcours qui se caractérisent par une flore spontanée typique (typiquement saharienne, adapté aux conditions de milieu) ; deux situations agro-écologiques se succèdent :

- Dans un premier temps l'installation des cultures s'est marquée par l'apparition d'une flore messicole étrangère « INTRODUITE » à la région. Et qui dans les différents travaux effectués dans la région [8] [9] ont montré sont importance aussi bien sur le plan qualitatif que quantitatif.

- Dans un second temps, l'abandon des pivots se caractérise par une flore différente appelée flore de succession.

La question principale serait donc « QUEL EST LE DEVENIR DE CES TERRES ? ». C'est dans cette problématique que notre étude s'intègre et a pour objectif l'étude de la banque de graines des périmètres céréaliers abandonnés. Ceci contribuera à ramener des éléments de réponses à cette problématique à savoir, donner les premières informations sur la possibilité de restaurer ces terres : soit vers leurs vocation d'origine (parcours) ou vers d'autres activités agricoles.

II - Matériel et méthode

• Site d'étude

Notre étude s'est déroulée dans la région d'Ouargla dans les périmètres agricoles de Hassi Ben Abdallah. La commune est annexée administrativement à la Daïra de Sidi Khouiled, qui se situe à 26 Km au Nord-est de chef lieu de wilaya d'Ouargla. Ces coordonnées géographiques sont les suivantes : Altitude : 157 m ; Latitude : 32°52' N et Longitude : 5°26' E. [10].

Le choix de cette zone est motivé par le faite que Hassi Ben Abdallah constituait auparavant une immense zone de parcours.

Notre échantillon concerne 03 pivots abandonnés (PAI : N°17, PAII : N°16 et PAIII : N°04) au niveau de la station d'E.R.I.A.D. de Hassi Ben Abdallah. Ces pivots se caractérisent par 03 catégories de durée d'abandon des pivots

(âge d'abandon) : 10 ans, 03 ans et 05 ans respectivement (Fig. 1).

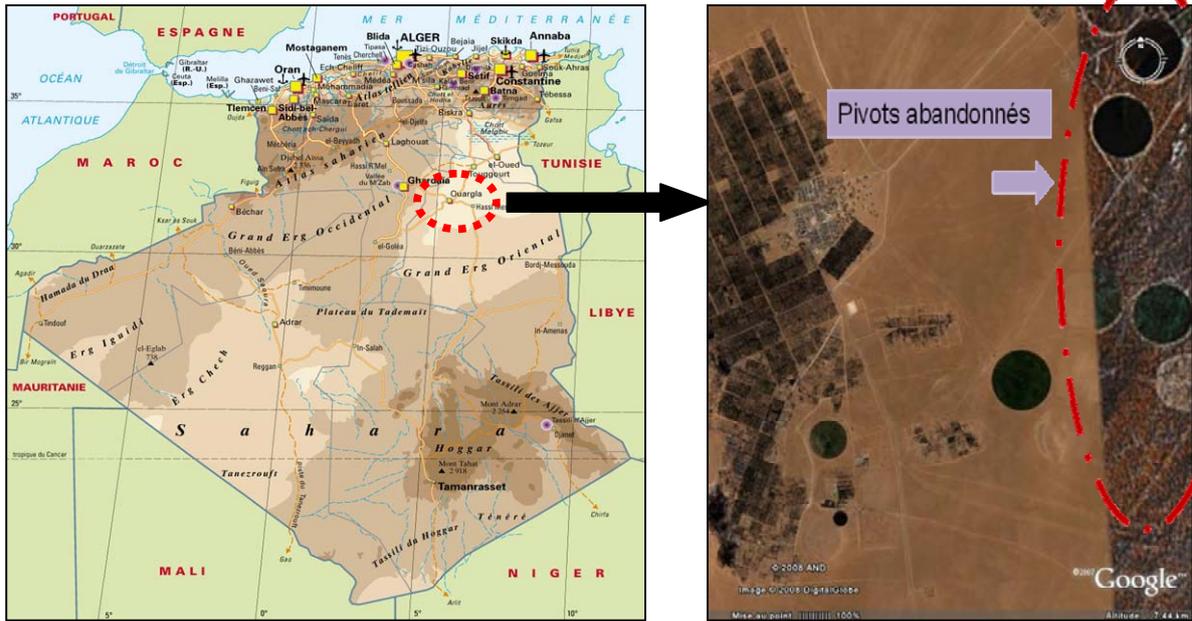


Fig.1. Situation de la région et des stations d'étude

1. Protocole d'estimation de la flore potentiel

Les échantillons du sol ont été prélevés le 12 novembre 2007 (avant la période pluviale).

Pour estimer la banque de diaspores dans le sol, LECK *et al.* (1989) préconise **la technique indirecte** : elle consiste à mettre en germination des échantillons de terre et de compter les plantules qui apparaissent, correspondant ainsi

aux semences présentes dans les échantillons du sol [11].

L'échantillonnage a été effectué suivant 03 niveaux : la périphérie (p), le milieu (m) et le centre (c) en divisant chaque pivot en 04 sections sur une profondeur de 50cm, à raison d'un échantillon par 25cm d'épaisseur (Fig. 2).

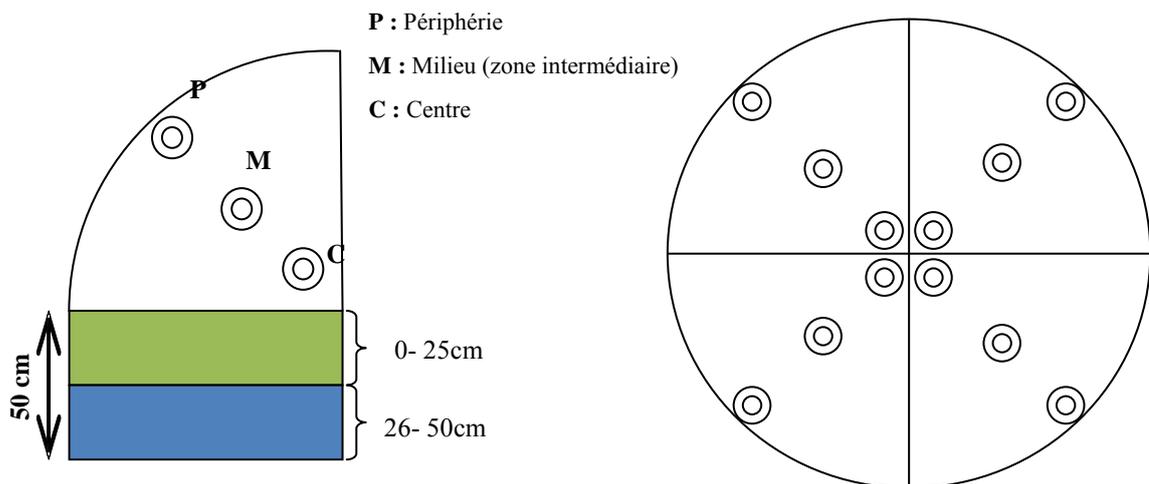


Fig.2. Méthode d'échantillonnage du sol

Avec la collaboration d'un chercheur du CNRS France (E. BUISSON), on a opté pour la méthode dite de flottaison qui consiste à mettre chaque échantillon (500 cm³) en flottaison dans l'eau pendant 30 minutes, lavé puis passé sur un tamis de 200µm afin de libérer les graines des

argiles présentes dans les échantillons du sol, avant d'être étalé dans des pots de plastique du gravier puis du terreau ont été déposés. On recouvre l'ensemble par une compresse médicale afin d'éviter l'effet vent et l'effet eau (pluie ou jet d'eau) [12].

Les pots ont été laissés dans une serre tunnel pendant 04 mois (du 10 décembre jusqu'au 10 avril) afin de favoriser un maximum de germination, tout en déplaçant plusieurs fois les pots pour assurer des conditions de germinations homogènes pour tous les échantillons. Un micro-labour a été effectué après trois mois, car cette action est connue pour accroître le nombre de germination [13].

Les plantules ont fait l'objet d'un comptage journalier, celles non identifiées ont été mis en pots remplis de terreau uniquement et placées dans la même serre pour l'identification (taxonomie).

Les relevés de température ont été enregistrés 03 fois par jour. En fonction de cette dernière, l'arrosage a été réalisé avec l'eau du forage de l'exploitation de l'I.T.A.S. afin de conserver le sol toujours humide (on a été obligé de passer à 2 arrosages par jour, voir plus).

III - Résultats et discussions

1. Espèces inventoriées dans la banque de graines du sol (flore potentielle)

La mise en culture des différents échantillons du sol prélevés au niveau des pivots

Tableau 1. Liste des espèces inventoriées au niveau de la banque de graines du sol

Classes	Familles	Espèces	Noms communs (vulgaires)
Monocotylédones	Poaceae	<i>Lolium multiflorum</i> Lamarck	Ray-grass d' Italie
		<i>Pholiurus incurvus</i> (L.) Schinz & Thell.	/
		<i>Setaria verticillata</i> (L.) P. Beauv.	/
Dicotylédones	Amaranthaceae	<i>Beta vulgaris</i> L.	Betterave sauvage
		<i>Chenopodium murale</i> L.	Chénopode des murs
	Asteraceae	<i>Launaea glomerata</i> (Cass.) Hook	/
	Caryophyllaceae	<i>Spergula fallax</i> (Lowe) E.H.L. Krause	/
	Fabaceae	<i>Melilotus indica</i> (L.) Allioni	Mélilot
	Polygonaceae	<i>Polygonum argyrocoleum</i>	/
	Primulaceae	<i>Anagalis arvensis</i> L.	Mouron rouge

abandonnés selon 03 catégories d'âge 03, 05 et 10 ans ont permis de recenser 10 espèces réparties sur 08 familles botaniques. La liste des espèces inventoriées est reportée dans le tableau 1 qui suit :

Le chiffre de 10 espèces est faible si on le compare à la richesse de la flore messicole recensée dans la région. A ce titre ACHOUR (2005) et GUEDIRI (2007) ont recensé respectivement 83 et 75 espèces, dans la même région d'étude (Hassi Ben Abdallah).

2. Aspects qualitatifs de la flore potentielle

2. 1. Répartition des espèces par classe

Parmi les 10 espèces recensées au niveau de banque de graines du sol, la classe des dicotylédones est la plus représentée avec 07 espèces (Fig. 3).

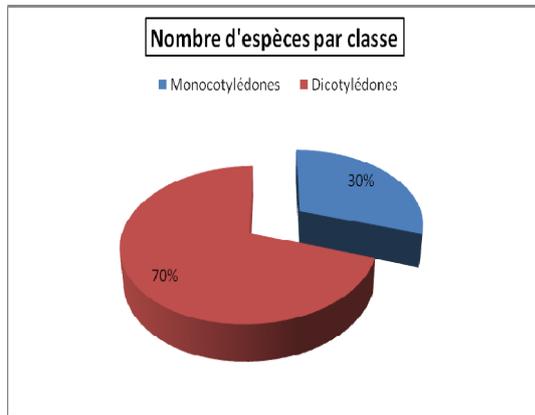


Fig.3. Répartition des espèces par classe

2. 2. Répartition des familles par classe

Ainsi que sur les 07 familles qui constituent la flore potentielle 06 familles appartiennent à la classe des dicotylédones (Fig. 4).

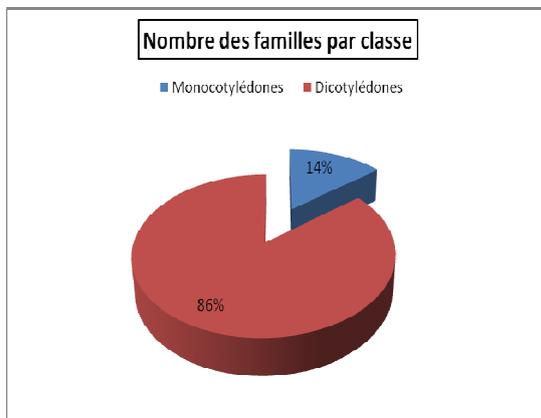


Fig.4. Répartition des familles par classe.

La prédominance de la classe des dicotylédones est confirmée au niveau de la flore réelle à travers des travaux réalisés au niveau de la même zone d'étude. Dans les pivots abandonnés les dicotylédones prédominent avec 09 familles [14].

2. 3. Répartition des espèces par type biologique

L'analyse de la banque de graines du sol en fonction des types biologiques a permis de recenser 02 groupes essentiellement les

thérophytes (annuelles) avec 09 espèces et les *géophytes* (vivaces) avec une seule espèce (Fig.5).

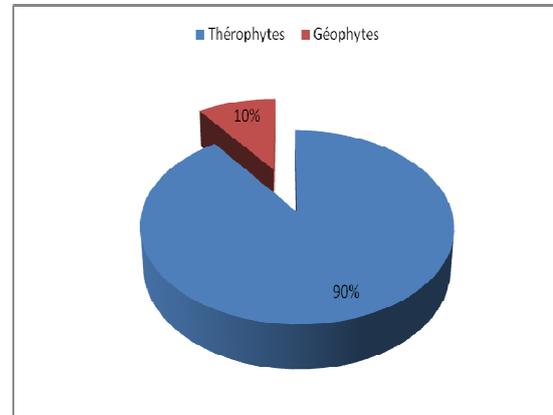


Fig.5. Répartition des espèces par type biologique

2. 4. Répartition des espèces par famille

Il faut noter que sur les 07 familles recensées 02 familles représentent la moitié des

espèces inventoriées qui sont respectivement : les *Poaceae* et les *Amaranthaceae*. Cependant, les 05 autres familles ne sont représentées que par une seule espèce (Fig. 6).

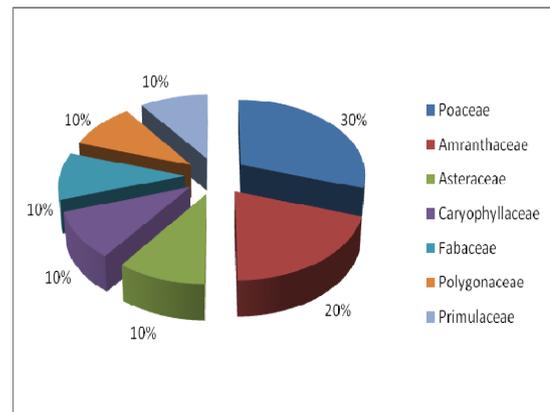


Fig.6. Répartition des espèces par famille

L'importance des *Poaceae* et des *Amaranthaceae* est directement liée à l'origine des échantillons du sol à savoir d'une parcelle ayant subi une activité agricole.

En effet les *Poaceae* et les *Amaranthaceae* sont des familles qui sont rencontrées dans les milieux agricoles et les milieux anthropisés (villes, villages...etc.) [15] [16] [17] [18] [19] [20].

2. 5. Répartition des familles par catégorie d'âge

Pour apprécier l'effet de la durée d'abandon des pivots, la figure 7 représente la répartition des familles.

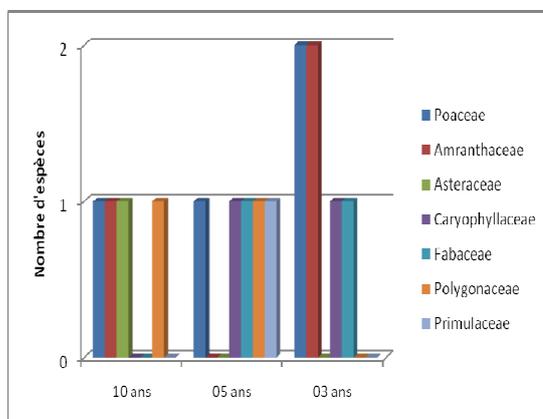


Fig.7. Répartition des familles en fonction de la durée d'abandon des pivots

Le pivot de la première catégorie d'âge (03 ans) présente 04 familles à savoir les *Amaranthaceae*, les *Poaceae*, les *Fabaceae* et les *Caryophyllaceae*. On remarque que les deux premières prédominent dans les pivots abandonnés.

Après 05 ans, En abandonnant des pivots d'autres familles apparaissent: les *Polygonaceae* et les *Primulaceae* en plus des *Poaceae*, *Caryophyllaceae* et des *Fabaceae* déjà existantes avec des taux moins important.

Pour la troisième catégorie d'âge (10 ans), les pivots montrent l'apparition des *Asteraceae* alors que les *Poaceae*, les *Amaranthaceae* et les *Polygonaceae* persistent.

Ceci s'explique par l'hypothèse que pour certaines espèces nécessitent une conservation dans le sol pendant plusieurs années pour pouvoir germer.

Par contre on rapporte que la flore potentielle (banque de graines) des sols cultivés après abandon est très variable d'une parcelle à une autre et pour la même parcelle d'un endroit à un autre. Cette variation est liée essentiellement à deux éléments essentiels : l'origine des matériaux biologiques (semence, sol, matière organique) et la banque de graine initiale (messicoles ou flores initiales) [21] [22].

2. 6. Répartition des espèces par catégorie d'âge

Comme il a été mentionné dans la partie matériel et méthodes, le choix des stations d'étude repose sur l'âge d'abandon. Ainsi une étude comparée de ce paramètre a permis de détecter une différence entre les pivots.

Le nombre d'espèces inventoriées au niveau de la banque de graines du sol des pivots abandonnés varie d'un pivot à un autre (Fig. 8).

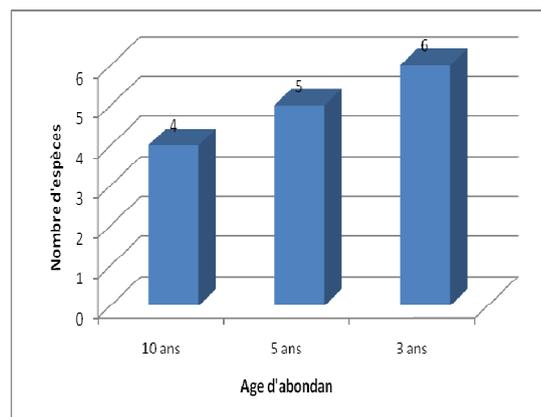


Fig.8. Nombre d'espèces en fonction de la durée d'abandon des pivots

La lecture de la figure 8, montre que plus la durée d'abandon des pivots des pivots augmente plus le nombre d'espèces recensées dans la banque de graines du sol diminue.

En essayant d'appliquer un test de tendance sur les résultats obtenus on note qu'il existe une relation très significative entre le nombre d'espèce et l'âge d'abandon (Fig. 9).

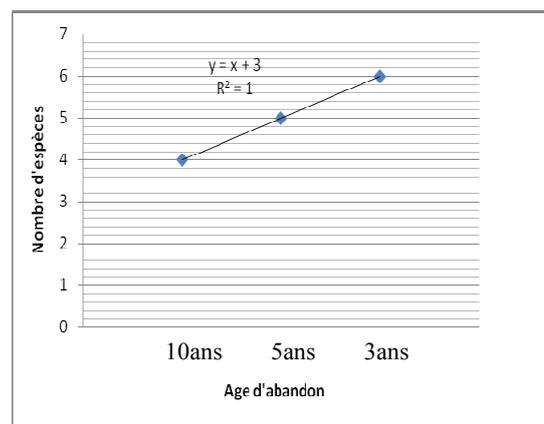


Fig.9. Courbe de tendance du nombre d'espèces en fonction de la durée d'abandon des pivots

L'abandon des parcelles après une activité agricole contribue à une réduction de la flore messicole et plus la durée d'abandon s'étale on assiste à une installation d'une flore plus

compétitive dans certains cas elle se limite à une ou très peu d'espèces.

L'activité agricole permet certes une augmentation de la diversité floristique mais l'abandon de ces parcelles entraîne une réduction considérable de cette diversité [23] [24] [25] [26].

Ainsi pour mieux comprendre le phénomène, une analyse des résultats en fonction du type de flore permet de faire ressortir une certaine cinétique entre la durée d'abandon des pivots et l'évolution de la flore (spontanée ou introduite).

2. 7. Répartition des espèces par type de flore

Une analyse des espèces inventoriées au niveau de la banque de graines du sol basée sur le type de flore (spontanée ou introduite) montre que la flore introduite prédomine la flore spontanée (Fig. 10).

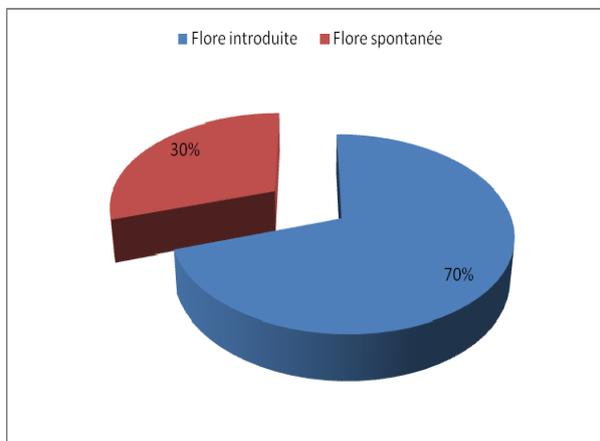


Fig.10. Répartition des espèces par type de flore

La lecture de la figure 10 montre que la flore introduite reste dominante comparée à la flore spontanée même après l'abandon des sols cultivés.

Nos résultats rejoignent la majorité des travaux réalisés dans la région [7] [27] [28] [8] [9].

2. 8. Répartition des espèces par type de flore et la durée d'abandon des pivots

La figure 11 montre que pour les pivots abandonnés on assiste à une recolonisation de la flore spontanée (qui reste faible mais à signalé) et une régression de la flore introduite.

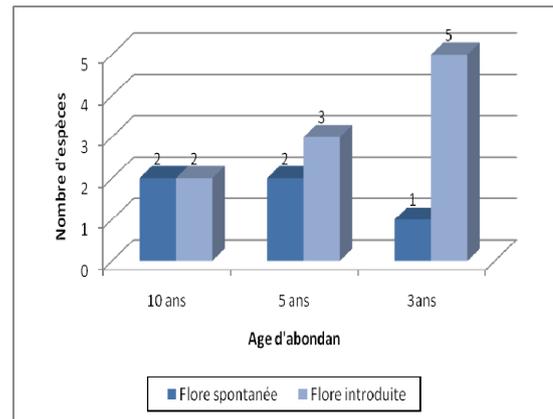


Fig.11. Nombre d'espèces en fonction du type de flore et de la durée d'abandon des pivots

En essayant d'appliquer un test de tendance sur les résultats obtenus.

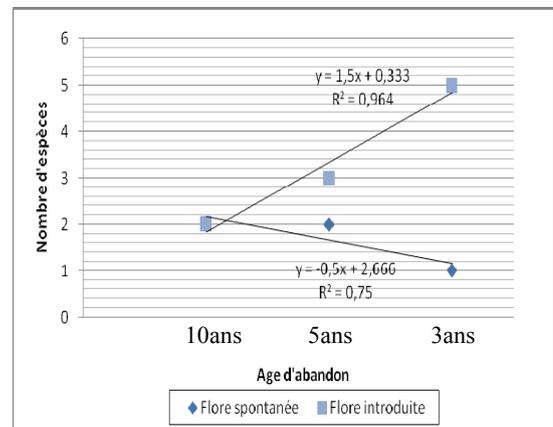


Fig.12. Courbe de tendance du nombre d'espèces en fonction du type de flore et la durée d'abandon des pivots

On note qu'il existe une relation très significative entre la réinstallation de la flore spontanée en pivots abandonnés et une régression de la flore introduite en s'étalant dans la durée d'abandon des pivots (Fig. 12).

L'abandon des perturbations conduit rapidement à une disparition des plantes les plus caractéristiques de milieux extrêmes au profit d'une flore banale et universelle [29] [30].

3. Aspects quantitatifs liée à la flore potentielle

3. 1. Densité des espèces inventoriés au niveau de la banque de graines du sol

Le suivie de la germination de la banque de graines pour l'ensemble des pivots nous a permis de dresser le graphe suivant (Fig. 13).

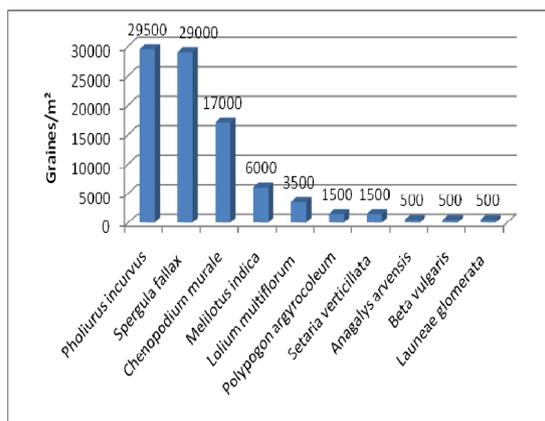


Fig.13. Densité des espèces au niveau de la banque de graines du sol

L'espèce qui a la densité la plus importante est *Pholirus incurvus*, on peut classer les autres espèces en trois grands groupes :

- Groupe 1 : Les espèces à forte densité *Spargula fallax*, *Chenopodium murale*, *Melilotus indica* et *Lolium multiflorum*.
- Groupe 2 : D'autres ont une densité moyennement faible de 1500 graines/m² : *Setaria verticillata*, *Polygonum monspeliensis* ;
- Groupe 3 : Celles qui se trouve en très faible densité de 500 graines/m² tel que : *Anagalis arvensis*, *Beta vulgaris*, et *Launaea glomerata*.

Plusieurs facteurs liés à l'espèce même intervient pour déterminée la variation de densité en fonction de la durée d'abandon des pivots, par exemple son type biologique, la quantité des graines qu'elle produit...etc.

IV - Discussion générale

La banque de graines comprend les graines se trouvant dans le profil du sol résultant des populations existantes sur place en plus d'autres immigrantes des espaces proches. La gestion de la banque de graines est l'une des applications de la lutte préventive contre les mauvaises herbes [31].

L'étude de la banque de graines d'un sol suppose la connaissance historique de la flore, à savoir les différentes successions végétales qui se sont manifestées. Car la banque de graines se compose de deux type de graines : les permanentes ou persistantes (celle qui sont très recherchées dans l'écologie de la restauration) et les provisoires (permettent de retracer l'histoire de la parcelle).

L'étude de la banque de graines des sols céréaliers sous centre pivots abandonnées dans la région d'Ouargla a permis de recenser 10

espèces. Ce nombre reste faible par rapport à la richesse de la flore messicole inventoriée dans des travaux réalisés au niveau de la même région d'étude [8] [27] [28] [9] [14].

La répartition des espèces en fonction des classes montre l'importance des dicotylédones pour l'ensemble des pivots. Alors qu'on rapporte que le taux de levée au champ a tendance à être plus élevé chez les graminées que chez les dicotylédones [32].

L'analyse des résultats en fonction du type biologique montre la prédominance des *thérophytes*. Cette « Thérophytisation » (prédominance des thérophytes) est une caractérisation des zones arides et exprime une stratégie d'adaptation vis-à-vis des conditions défavorables et une forme de résistance aux rigueurs climatiques [33] [34].

Puisque les *Thérophytes*, plantes dont le mode de persistance exclusif est la graine, sont particulièrement adaptées aux milieux très instables dont font partie les sols régulièrement retournés et donc les terres agricoles. Ces espèces ont une stratégie de reproduction de courte durée de vie, elles réalisent un effort de reproduction très élevé. Les graines produites le sont en général en nombre très important, ceci permettant notamment une rapide et large expression de l'information génétique et donc une faculté de réponse accrue aux modifications du milieu [35].

Le travail du sol a une action beaucoup plus nuancée sur les types biologiques adaptés aux perturbations comme les vivaces à fort pouvoir de multiplication végétative (*géophytes*) ou surtout les plantes annuelles (*thérophytes*) [36].

Sept familles botaniques ont été rencontrées dans les pivots abandonnés. Les deux familles qui prédominent sont les *Poaceae* et les *Amaranthaceae*. Puisque ces deux familles ont un grand pouvoir allélopathique souvent les espèces appartenant à ces dernières sont des plantes fortement anthropisés [37].

Après trois ans d'abandon, on a rencontré les mêmes familles : les *Poaceae*, *Amaranthaceae*, les *Fabaceae* et les *Caryophyllaceae*. Après 05 ans d'abandon on assiste à disparition des *Poaceae* et l'apparition de nouvelles familles : les *Polygonaceae* et *Primulaceae*. Après 10 ans d'abandon d'autres familles apparaissent tel que les *Asteraceae*.

La durée d'abandon des pivots à permet à d'autre familles de s'installer. On rapporte que la flore de succession des champs cultivés après

abandon se traduit généralement par des résultats inattendus ceci s'explique par la banque de graines, mais plus aussi par les métabolites accumulées dans le sol et le mode dont été produit les graines (conditions agro- techniques) : de ce fait on peut trouver une flore spontanée qui est fortement concurrente ou tout simplement une flore introduite : On parle souvent d'une banalisation de la flore (aucun indication écologique) [38].

La succession des champs après abandon est toujours dominé par les *Poaceae* et *Amaranthaceae* dans le cas où il ya du pâturage on pu avoir une diversité plus importante : *Brassicaceae*, *Fabaceae* et *Asteraceae* [39].

La banque de graines des pivots abandonnés présente plusieurs d'espèces ceci s'explique probablement par le phénomène d'allélopathie : la disparition des molécules allélopatiques cumulées durant l'activité agricole (mise en culture) permettant ainsi la germination des espèces restées en stock.

En effet, les *Poaceae* (cultivées ou spontanées) ont des effets très appréciable sur l'inhibition et l'incitation de la germination des autres familles [40].

La durée d'abandon des pivots à une relation directe avec le nombre d'espèces, ces dernières sont plus importantes dû au fait que plusieurs plantes nécessitent une dormance importante, tout en nécessitant plusieurs imbibitions et dessiccations pour pouvoir germer. C'est le cas de certaines *Poaceae* dans leur milieu naturel [41].

Selon ADKINS et *al.*, (2002), dans un milieu perturbé (agro-système) le nombre de facteurs régissant la germination du stock grainier est tellement important qu'il est pratiquement impossible de mettre en évidence le facteur principal qui provoque ou qui lève la dormance.

En essayant de classer la flore rencontrée en flore introduite et flore spontanée, il ressort que la flore introduite est toujours dominante dans les pivots abandonnés par rapport à la flore spontanée. Ceci s'explique par la fertilisation minérale et organique qui favorise la flore introduite par rapport à la flore spontanée [42].

L'effet de dispersion de la semence (pluie de semence) contribue aussi à la diversité de la flore. Dans les zones ventées on assiste à un appauvrissement de la banque de semence par le transport [43].

Dans les pivots abandonnés, la flore introduite régresse en fonction de la durée d'abandon des pivots alors qu'on assiste à une recolonisation de ces pivots par flore spontanée. ALIOTTA et *al.*, (2006) signalent le faible pouvoir germinatif des plantes spontanées dans le milieu agricole avec la possibilité de passage d'une plante spontanée vers un état invasif. C'est la flore introduite qui prend place parce que ce sont les espèces introduites qui résistent mieux à la salinité (accumulation des sels en surface) par rapport à la flore spontanée dont certains les graines sont très sensibles à la salinité surtout complexe (mortalité des graines) [44].

JAUZEIN (2001), ajoute qu'il y aura un appauvrissement de la flore spontanée et un enrichissement en espèces allochtones. L'image la plus forte qui ressort de ce bilan reste une perte profonde qui touche non seulement la composition floristique des communautés, mais aussi la variabilité génétique des populations. Cette banalisation risque de gagner toute la planète.

La densité est une caractéristique définitive dans la banque de graines du sol elle varie en fonction des espèces. Cette variabilité dépend de plusieurs caractéristiques propres à l'espèce: Le nombre des graines produites par chaque espèce, la viabilité des graines ...etc.

V - Conclusion

La mise en valeur des terres au niveau des régions sahariennes a permis de mettre en place, en dehors de la palmeraie des systèmes de production céréaliers intensifs à irrigation assurée par les centres-pivots, au niveau de la région d'Ouargla. Les résultats encourageants au début de la mise en valeur se sont rapidement dégradés provoquant ainsi la réduction importante des superficies emblavées en céréales.

A partir de notre étude concernant la banque de graines du sol dans les pivots abandonnés dans la région d'Ouargla, il ressort que :

La densité et la composition de la banque de graines du sol sont très hétérogènes dans un même secteur, sont étroitement liées aux antécédents de culture de champ et sont également influencées par les pratiques en matière de travail du sol, l'humidité du sol et le type de sol.

Dans les pivots abandonnés, la banque de graines a été estimée à 10 espèces végétales avec une dominance de la famille des *Poaceae* et des *Amaranthaceae*. Ces familles dominantes contiennent des espèces synoptiques liées à l'activité humaine.

La classe dominante est celle des dicotylédones avec 07 espèces. Et le type biologique fréquent est celui des *thérophytes*.

La famille dominante est celle des *Poaceae* avec 03 espèces et l'espèce la plus dominante est *Lolium multiflorum*.

La flore introduite a envahit les deux types de pivots abandonnés mais avec l'avancement de la durée d'abandon des pivots elle régresse et on assiste à une recolonisation en flore spontanée, plusieurs familles ont réapparue tel que les *Asteraceae*.

Ce travail vise à mettre en évidence les techniques d'estimation et les périodes d'échantillonnage. Au final, en ce qui concerne les pivots abandonnés, il en ressort qu'il est nécessaire d'effectuer des répétitions en utilisant comme témoin des zones naturelles (non-anthropisées) afin de mettre en évidence les différences probables des banques de graines d'un milieu vierge à un milieu perturbé.

VI - Références

- [1] E.R. Chang, R. Jefferies, J. Carleton, *Relationship between vegetation and soil seed banks in an arctic coastal march*, Journal of Ecology, vol. 89, (2001) 367-384.
- [2] C. Zabinski, T. Wojtowicz, D. Cole, *The effects of recreation disturbance on subalpine seed banks in the Rocky Mountains of Montana*, vol. 78, (2000) 577-582.
- [3] H.A. Roberts, *Seed banks in the soil. Advances in applied biology*, Cambridge Academic press, vol. 6, (1981) 1-55.
- [4] Z. Kropac, *Estimation of weed seeds in arable soil*, Pedobiologia, vol. 6, (1966) 105-128.
- [5] H.A. Jensen, *Content of buried seeds in arable soil in Denmark and its relation to the weed population*, vol. 27, (1969) 1-56.
- [6] H.A. Roberts, R. J. Chancellor, *Seed banks of some arable soils in the English midlands*, Weed Res, vol. 26, (1986) 251-257.
- [7] M. BOUKHATEM, *La céréaliculture sous pivot : les mauvaises herbes en question cas de la région d'Ouargla*, Mémoire Ingénieur d'Etat Agronomie Saharienne, Université Kasdi Merbah Ouargla 1996
- [8] L. ACHOUR, *Contribution à la caractérisation de la flore adventice dans un périmètre agricole. Cas de Hassi Ben Abdallah, Ouargla*, Mémoire Ingénieur d'Etat Agronomie Saharienne, Université Kasdi Merbah Ouargla 2005
- [9] K. GUEDIRI, *Biodiversité des messicoles dans la région d'Ouargla : inventaire et caractérisation*, Mémoire Ingénieur d'Etat Agronomie Saharienne, Université Kasdi Merbah Ouargla. 2007
- [10] M. Rouvilois- Brigol, *Le pays d'Ouargla (Sahara Algérien)*, Université de SORBONNE, Paris, 1975
- [11] M.A. Leck, V.T. Parker, R.L. Simpson, *Ecology of soil seed banks*. Academic Press, San Diego, 1989
- [12] E. Buisson, T. Dutoit, C. Rolendo, *Composition et structure de la végétation aux bordures entre friches post-culturelles et végétation steppique dans la plaine de Crau (Bouches-du-Rhone)*, Ecologia mediterranea, vol. 30, (2004) 76p.
- [13] K. Thompson, J.P. Grime, *The soil seed bank of North West Europe: methodology, densit and longevity*. Cambridge University Press, 1979
- [14] S. LEBBA, *Contribution à l'étude de la caractérisation des Messicoles de la région d'Ouargla: Cas des pivots abandonnés à Hassi Ben Abdallah*. Mémoire Ingénieur d'Etat Agronomie Saharienne, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2007.
- [15] A. Wezel, *Weed vegetation and land use of upland maize fields in north-west Vietnam*, Geologie Journal, vol.50 (2000) 349-357.
- [16] P. Pysek, K. Prach, *Research into plant invasions in a crossroads region: history and focus. Biological Invasions*, vol. 5, (2003) 337-348.
- [17] V.P. Vera, V.S. Myroslav, L.M. Sergei, *Deliberate and unintentional introduction of invasive weeds: A case study of the alien flora of Ukraine*, National Academy of

- Sciences of Ukraine, *Euphytica*, vol. 148, (2006) 17-33.
- [18] J.C. Stevens, D.J. Merritt, G.R. Flematti, E.L. Ghisalberti, K.W. Dixo, *Seed germination of agricultural weeds is promoted by the butenolide 3-methyl-2H-furo[2,3-c]pyran-2-one under laboratory and field conditions*, *Plant Soil*, vol. 298, (2007) 113-124.
- [19] L. Kooist, *Vegetation history and agriculture in the cover-sand area west of Breda (province of Nord-Brabant, The Netherlands)*, *Veget. Hist. Archaeobot*, vol. 17, (2008) 113-125.
- [20] R.S. Shemdoe, F.M. Mbago, I.S. Kikula, P.L. Van Damme, *Weed species diversity on arable land of the dryland areas of central Tanzania: impacts of continuous application of traditional tillage practices*, *Springer Science, Geologie Journal*, vol. 71, (2008) 107-115.
- [21] M. Nemoto, T. Ohkuro, B. Xu, *The role of weed invasion in controlling sand dune reactivation in abandoned fields in semi-arid Inner Mongolia, China*, *Ecological Research*, vol. 12, (1997) 325-336.
- [22] J.H. Li, X.W. Fang, J.J. Jia, G. Wang, *Effect of legume species introduction to early abandoned field on vegetation development*, *Plant Ecology*, vol. 191, (2007) 1-9.
- [23] A.L. Brandon, D.J. Gibson, B.A. Middleton, *Mechanisms for dominance in an early successional old field by the invasive non-native *Lespedeza cuneata**, *Biological Invasions*, vol. 6, (2004) 483-493.
- [24] J. Lu, H. Wang, W. Wang, C. Yin, *Vegetation and soil properties in restored wetlands near Lake Taihu, China*, *Hydrobiologia*, vol. 581, (2007) 151-159.
- [25] K.M. Raatikainen, R.K. Heikkinen, J. Pykala, *Impacts of local and regional factors on vegetation of boreal semi-natural grasslands*, *Plant Ecology*, vol. 189, (2007) 155-173.
- [26] K. Benjamin, A. Bouchard, G. Domon, *Managing Abandoned Farmland: The Need to Link Biological and Sociological Aspects*, *Environmental Management*, vol. 42, (2008) 603-619.
- [27] K. MAAMRI, *Contribution à la caractérisation floristique d'une zone céréalière sous pivot: cas de la ferme d'E.R.I.A.D (Hassi Ben Abdallah)*, Mémoire Ingénieur d'Etat Agronomie Saharienne, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2005
- [28] A. TOUATI, H. TRABELSI, *Cinétique des plantes spontanées après l'abandon d'un pivot: cas de la ferme d'E.R.I.A.D. Hassi Ben Abdallah, Ouargla*, Mémoire Ingénieur d'Etat Agronomie Saharienne, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2005
- [29] H.A. Roberts, *The changing population of viable weed seeds in arable soil*. *Weed Research*, vol. 8, (1968) 253-256.
- [30] C.B. Baniya; T. Solhoy, R.O. Vetaas, *Temporal changes in species diversity and composition in abandoned fields in a trans-Himalayan landscape, Nepal*. *Springer Science+Business Media, Plant Ecology*, (2008)
- [31] R.S. Gallagher, E.C.M. Fernandes, E.L. Meallie, *Weed management through short-term improved fallows in tropical agroecosystems*, *Kluwer Academic Publishers, Agroforestry systems*, vol. 47, (1999) 197-221.
- [32] G. Barralis, F. Dessaint, R. Chadoeuf, *Relation flore potentielle-flore réelle de sols agricoles de Côte-d'Or*, *Agronomie*, vol. 16, (1996) 453-463.
- [33] Ph. Daget, *Sur les types biologiques en tant que stratégie adaptative (cas des thérophytes). Recherche d'écologie théorique, les stratégies adaptatives*, Paris, (1980) 89-114.
- [34] P. Ozenda, *Flore et végétation du Sahara*. 1^{ière} édition, Edition C.N.R.S., Paris. 1983
- [35] F. Olivereau, *Les plantes messicoles des plaines française*, *Courrier de l'environnement de l'I.N.R.A.*, vol. 28, (1996) 5-18.
- [36] P. Jauzein, *L'appauvrissement floristique des champs cultivés*, *I.N.R.A.*, vol. 21, (2001) 65-78.
- [37] G. Aliotta, G. Cafiero, A.M. Otero, *Weed germination, seedling growth and their lesson for allelopathy in agriculture*. In M.J. Reigosa, N. Pedrol, L. Gonzalez, *Allelopathy: Aphysiological process with*

- ecological implication, vol. 2, (2006) 285-297.
- [38] R. Ejrnaes, J. Liira, R.S. Poulsen, B. Nygaard, *When has an abandoned field become a semi-natural Grassland or heathland*, Environmental management, vol. 42 (2008) 707-716.
- [39] S.E. BLATT, A. CROWDER, R. HARMSEN, *Secondary succession in two south-eastern Ontario old field*, Plant ecology, vol. 177, (2005) 25-41.
- [40] L.G. Perry, T.L. Weir, B. Prithiviraj, M.W. Paschke, J.M. Vivanco, *Root exudation and rhizosphere biology : multiple functions of a plant secondary metabolite*, Plant Cell. Monogr, (2006) 403-420.
- [41] S.W. Adkins, S.M. Bellairs, D.S. Loch, *Seeds dormancy mechanisms in warm season grass species*, Euphytica, vol. 126, (2002) 13-20.
- [42] W. Feng, G. Pan, R. Qiang, R. Li, J. Wei, *Influence of long term different fertilization on soil weed seed bank diversity of a paddy soil under rice/rape rotation*, Front. Boil, China, vol. 3, (2008) 320-327.
- [43] W. Geertsma, J.T.C.M. Spraugers, *Plant distribution patterns related to species characteristics and spatial and temporal habitat heterogeneity in a network of ditch banks*, Plant ecology, vol. 162, (2002) 91-108.
- [44] M.A. Khan, B. Gul, : Halophyte seed germination. In M.A. Khan, D.J. Weber, : Ecophysiology of high salinity tolerant plant. Ed. Université Karachi, Pakistan, (2008) 11-30.

Modèle « format » de rédaction d'un article dans la

« Revue des Sciences et Sciences de l'Ingénieur »

Le manuscrit, en recto seul, doit être saisi en double colonne sauf pour la première page qui doit être saisie en une seule colonne. Il doit comporter un titre, les noms et prénoms des auteurs et leurs affiliations, un résumé, des mots clés, une introduction, le texte et une bibliographie. Il doit être saisi suivant les instructions indiquées ci-dessous.

1. Mise en page : La mise en page est établie comme suit :

Le papier est en format A4 de marges : Haut : 2,5 cm ; Bas : 2 cm ; Droite : 1,5 cm ; Gauche : 2,5 cm ; Reliure : 0,5 cm.

2. Titre de l'article : Le titre de l'article est de taille 16, Times New Roman, gras, aligné au centre.

3. Noms et affiliations des auteurs : Les initiales des prénoms et les noms complets doivent être figurés et séparés par des virgules, les initiales du prénom en majuscule suivi du nom tout majuscule, taille de 12, Times New Roman, gras, alignés au centre, suivis par leurs références en lettres mentionnées en exposant d'une taille de 12, Times New Roman centré. Exemple **P.** (initiales du Prénom) **NOM^a**, **P. NOM^b**. L'email de l'auteur à qui la correspondance et les tirés à part électroniques doivent être envoyés doit être mentionné.

4. Résumé : Un résumé en français et en anglais, ne dépassant pas une quinzaine de lignes chacun, doit être mis dans la première page en une seule colonne, la police est Times New Roman, gras de taille 11.

5. Mots clés : 6 mots clés maximum, en français et en anglais, doivent être saisis juste après le résumé correspondant, la police est Times New Roman, gras, de taille de 11.

6. Corps du texte : La rédaction de l'article se fait en deux colonnes. Le corps du texte est rédigé en Times New Roman de taille **11** normal d'interligne simple. Les paragraphes ont un retrait positif de 0,5 cm et un espacement avant et après de 6 points.

7. Équations et nombres : Les équations doivent être soigneusement saisies avec un éditeur d'équation. Celles auxquelles il est fait référence dans le texte [sous la forme : équation (1), par exemple] doivent être numérotées en chiffres arabes entre parenthèses au bord de la marge droite. Une attention particulière doit être apportée afin de bien différencier le chiffre zéro (0) et la lettre O, le chiffre un (1) et la lettre l, la lettre romaine v et la lettre grecque nu (ν). Le logarithme décimal s'écrit log et le logarithme népérien ln.

8. Figures et tableaux : Toutes les illustrations (schémas ou photographies) doivent être appelées dans le texte. On abrégera figure entre parenthèses Fig.1. Les figures et tableaux seront numérotés en chiffres arabes croissant au fur et à mesure de leur apparition dans le texte. Aucune figure n'est redessinée ; elles doivent donc être suffisamment nettes pour permettre une reproduction directe (elles ne doivent donc comporter aucune surcharge manuelle). Elles doivent être tracées sur du papier blanc.

9. Bibliographie : Les références bibliographiques sont numérotées par ordre croissant au fur et à mesure de leur apparition dans le texte, en chiffres arabes entre crochets. La bibliographie en fin d'article se déroule de [1] à [n]. Toutes les références de la liste doivent correspondre à des références citées dans le texte et vice versa. Les titres des périodiques doivent être abrégés selon les normes officielles (cf. ISI, Current Contents, Physical abstracts, par exemple). Écrire en toutes lettres les mots pour lesquels aucune abréviation n'est répertoriée. Le style et la ponctuation des références doivent être conformes aux modèles illustrés dans les exemples suivants (à noter que les titres des revues sont en italique).

▪ **Article de revue (indiquer tous les auteurs)**

[1] S. Gyimóthy, J. Pávó, and H. Tsuboi, Conceptual evaluation of inversion models used for layered structures, *IEEE transactions on magnetics*, vol. 42, no. 4, (2006) 1091-1094.

▪ **Ouvrage ou thèse publiée**

[2] G. Eason, B. Noble, and I. N. Sneddon, "On certain integrals of Lipschitz-Hankel type involving products of Bessel functions," *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, vol. A247, pp. 529–551, April 1955.

[3] Richard M. Martin, *Electronic Structure, Basic Theory and Practical Methods*, Cambridge University Press, 2004

[4] Y. OUSSAR, Réseaux d'ondelettes et réseaux de neurones pour la modélisation statique et dynamique de processus, Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, France 1998.

▪ **Communication (publiée) d'un colloque ou d'un congrès :**

[5] A. Bossavit, G. Griso, B. Miara, A. Razek, Homogenization of three-dimensional structured materials and metamaterials, *Proceedings of International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications*, Turin, IT, September 2005.



SOMMAIRE

- Développement d'un nouveau système coopératif de localisation des nœuds dans un réseau à forte mobilité** 01
S. BENKOUIDER, M. B. YAGOUBI, N. LAGRAA
- Modélisation thermodynamique de la ségrégation de surface du soufre dans le Nickel** 10
D. BOUTASSOUNA, I. K. LEFKAIER, R. LE GALL, G. SAINDRENAN
- Synthèse et caractérisation de la solution solide $ZN_{1-x}CU_x(IO_3)_2$** 17
M. B. TAOUTI, A. GACEMI, D. BENBERTAL, I. GAUTIER-LUNEAU
- Effect of complexing agent on the structural properties of BI_2S_3 thin films prepared by CBD technique** 22
N. SELMANE, N. E. HAMDADOU, M. BOUHMIDI, D. CHALABI, A. SAIDANE
- Kinetic scheme of the nonequilibrium discharge in Oxygen** 27
K.HAMEURLAINE, A.BELASRI
- Contribution à l'évaluation du gisement solaire à Laghouat** 34
M. MESRI, A.CHEKNANE, M. BOUGRINE
- Contribution à l'analyse de la stabilité des problèmes de bifurcation en utilisant la méthode de dérivation optimale** 40
A. CHIKHAOUI, T. BENOUAZ
- Simulation de la diffusion anisotrope en traitement d'images par la méthode des éléments finis** 48
S. Y. IDRISSE, S. BELFKIH, S. NAJAH, P. MONTESINOS
- Hybridations métaheuristiques en lots appliquée à l'écoulement optimal de la puissance réactive** 59
M. LAHDEB, A. HELLAL, S. ARIF
- Simulation d'un modèle physique de configuration tige-plan pour l'étude du champ d'apparition des streamers positifs sur une surface de glace** 67
B. ALILI, B. ZEGNINI
- Banque de graines des sols des périmètres céréaliers abandonnés de la région d'Ouargla** 74
M. MARFOUA, A. EDDOUN, A. M. CHEHMA