

## INTRODUCTION

Dans cette partie, nous montrons une analyse des résultats obtenus durant nos essais dans le cas de la pollution non uniforme pour les différentes configurations de pollution, de conductivité, et de la largeur des couches salines qu'on a déjà présenté dans la partie des techniques expérimentales.

Après l'interprétation des résultats des essais de contournement effectués sur le modèle plan au laboratoire, on s'intéresse à l'évolution du courant de fuite ainsi la régression qui est un des paramètres essentiels pour la prédiction de l'état de surface de l'isolateur.

### IV.1. Etude de la tension de contournement

La tension de contournement est un paramètre essentiel pour l'isolateur, elle permet de définir la rigidité diélectrique du système. Dans notre cas, avant de procéder aux enregistrements du courant de fuite nous avons mesuré la tension de contournement pour les différentes configurations de conductivité et de pollution.

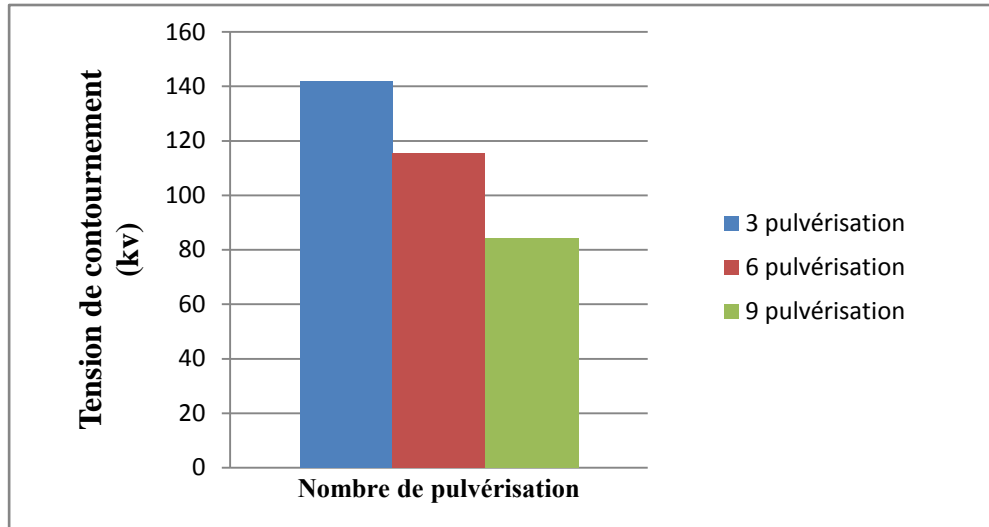
#### IV.1.1. Influence du nombre de pulvérisation

Les résultats obtenus pour les essais concernant modèle de J. Danis [3], conductivité est 1mS/cm, largeur de chaque bande propre  $L_{bp} = 1\text{cm}$  sont donnés dans le tableau IV.1.

D'après la figure IV.1, nous constatons que la tension de contournement est inversement proportionnelle au nombre de pulvérisation, ce qui peut justifier les conséquences majeurs de la sévérité de pollution sur le comportement des isolateurs.

N° d'essai		Essai N°1	Essai N°2	Essai N°3	Moyenne
U <sub>c</sub> (KV <sub>eff</sub> )	3 pulvérisation	144	148	134	142
	6 pulvérisation	124	112	110	115.33
	9 pulvérisation	77	90	86	84.33

**Tableau IV.1:** Mesures de la tension de contournement avec 3 configurations de pulvérisation



**Figure IV.1:** Influence du nombre de pulvérisation sur la tension de contournement

#### ***IV.1.2. Influence de la largeur des bandes propres***

Les résultats obtenus pour les essais concernant modèle de J. Danis [3], conductivité est 1mS/cm, six pulvérisations sont donnés dans le tableau IV.2.

D'après la figure IV.2, nous constatons que la tension de contournement est importante pour la largeur de bande propre 3cm et faible pour le cas des largeurs des bandes propres 1, 3 ,5 cm successives.

La tension de contournement pour le cas de la largeur des bandes propres 1 cm dispersées est plus importante que celle trouvée pour la largeur des bandes propres 1 cm adjacentes (3 cm coté HT), ce qui justifie la dispersion des nervures dans l'isolateur réel.

N° d'essai		Essai N°1	Essai N°2	Essai N°3	Moyenne
U <sub>c</sub> (KV <sub>eff</sub> )	1cm	124	112	110	115.33
	3cm	128	124	132	128
	3cm coté HT	104	113	108	108.33
	5cm	114	108	116	112.66
	1,3 et 5cm	104	108	100	104

**Tableau IV.2:** Mesures de la tension de contournement avec différentes largeurs des bandes propres

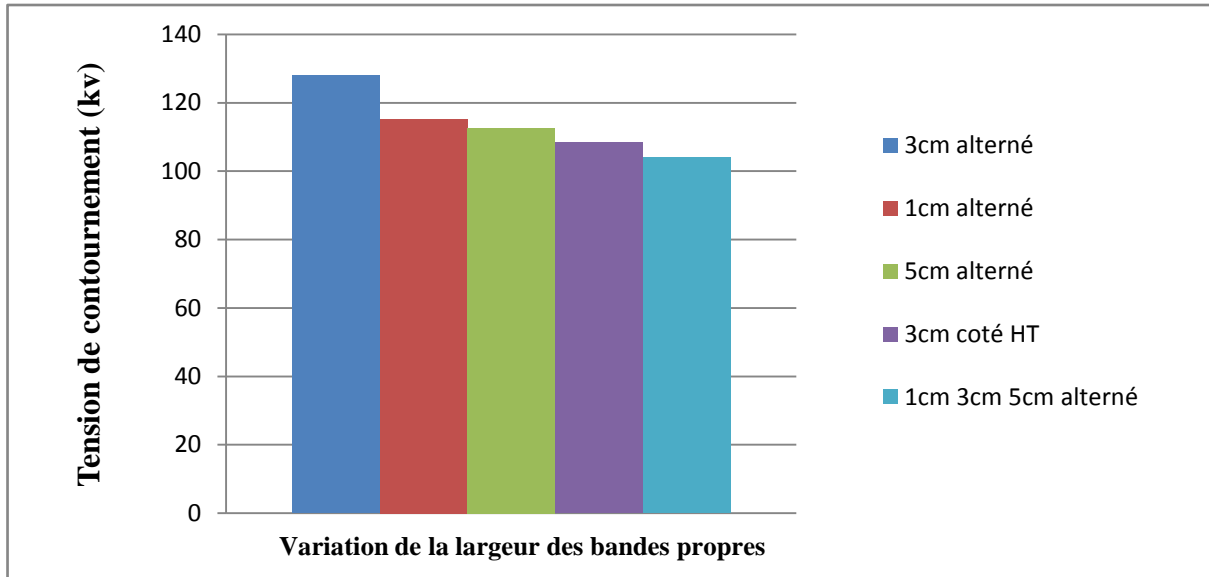
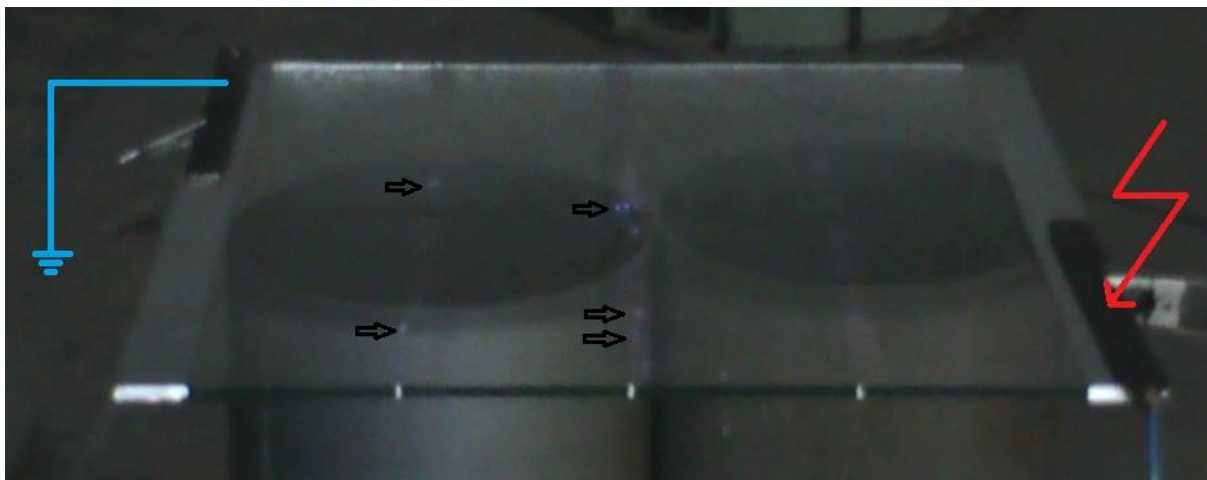


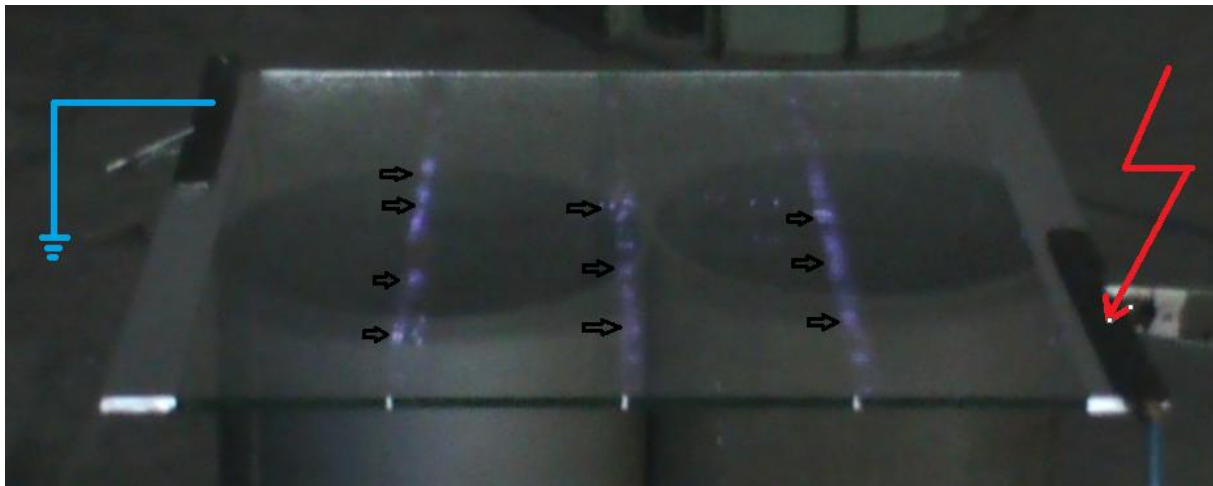
Figure IV.2: Evolution de la tension de contournement en fonction de la largeur des bandes propres.

**✚ Déroulement de contournement pour lbp 1cm :**

La figure IV.3 represent les étapes de deroulement de contournement, (a,b) l'apparition des arcs électriques à 30 kV et 62 kV, (c) progression des arcs et apparition des décharges électrique au niveau des bandes polluées 90 kV,(d) saut final (contournement) 112kV.



(a)



(b)



(c)

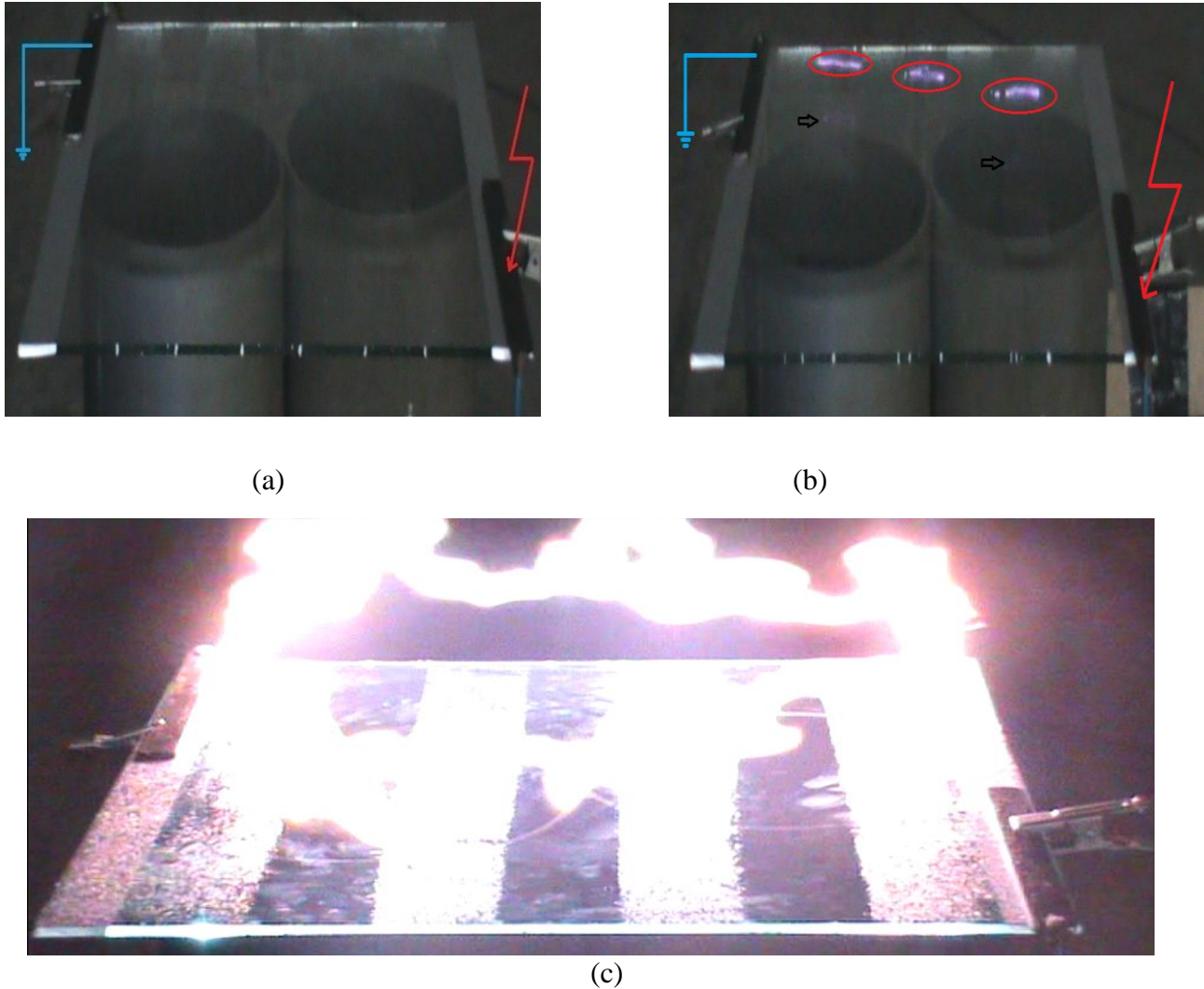


(d)

Figure IV.3: phases de contournement du modèle pollué pour  $L_{bp}=1\text{cm}$ , (a) 30 kV, (b) 62kV (c) 90 kV, (d) 112 kV

### ✚ Déroulement de contournement pour $L_{bp}$ est 5cm

La figure IV.4 montre les étapes de déroulement de contournement pour  $L_{bp}$  est 5cm, (a) l'absence des arcs électrique à 50 kV, (b) apparition des légers arcs électrique à 90 kV, (c) saut final c'est à dire un contournement direct car  $(3 \times 5 > 1/3 \text{ Ligne de fuite})$  [13]



**Figure IV.4:** Contournement direct sans apparition de décharges préliminaires ( $L_{bp} = 5\text{cm}$ ). (a) 50kV, (b) 90kV, (c) 116 kV

#### IV.1.3. Etude de l'influence du type de pollution

Le tableau IV.3 montre les résultats obtenus pour les essais concernant modèles de J. Danis [3], largeur des bandes propres 1cm, six pulvérisations.

D'après la figure IV.5, nous constatons que la tension de contournement est plus importante pour le sable des dunes et plus faible pour le sable de la mer.

N° d'essai		Essai N°1	Essai N°2	Essai N°3	Moyenne
U <sub>c</sub> (KV <sub>eff</sub> )	Sable de sol	124	130	126	126.66 kv
	Sable des dunes	126	134	140	133.33 kv
	Sable de mer	61	55	60	58.66 kv

Tableau IV.3: mesure de la tension de contournement des types de pollution.

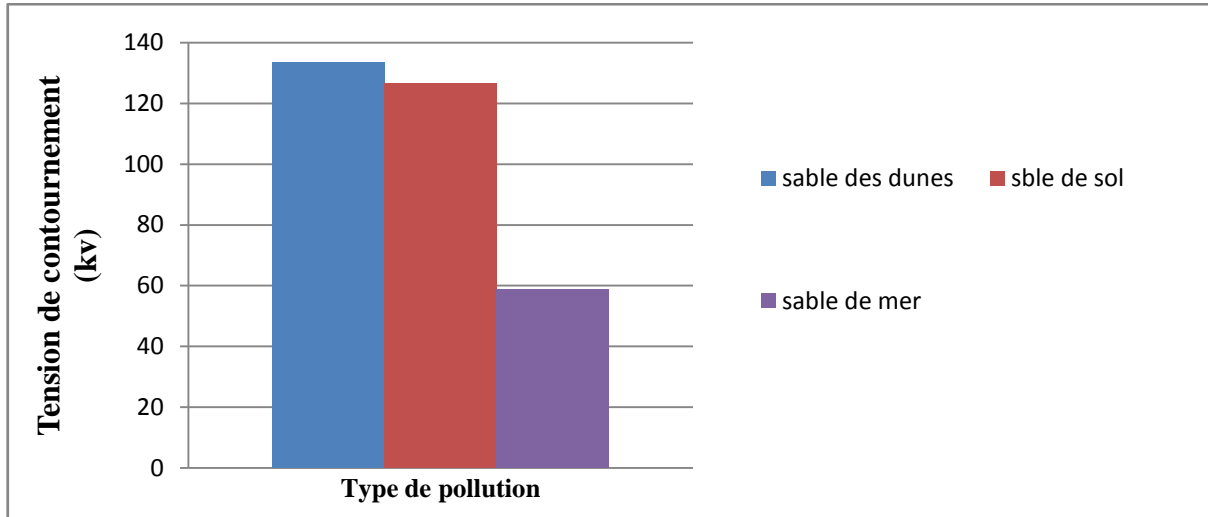
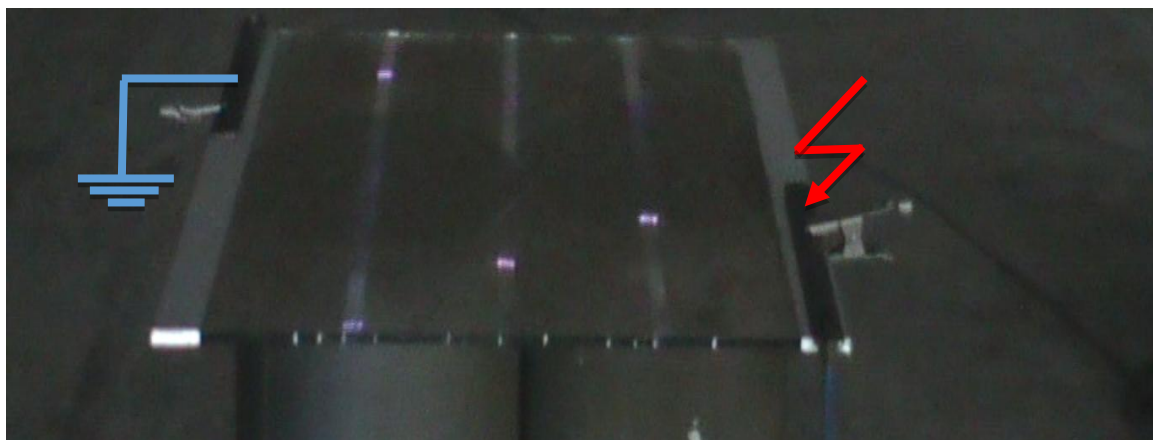


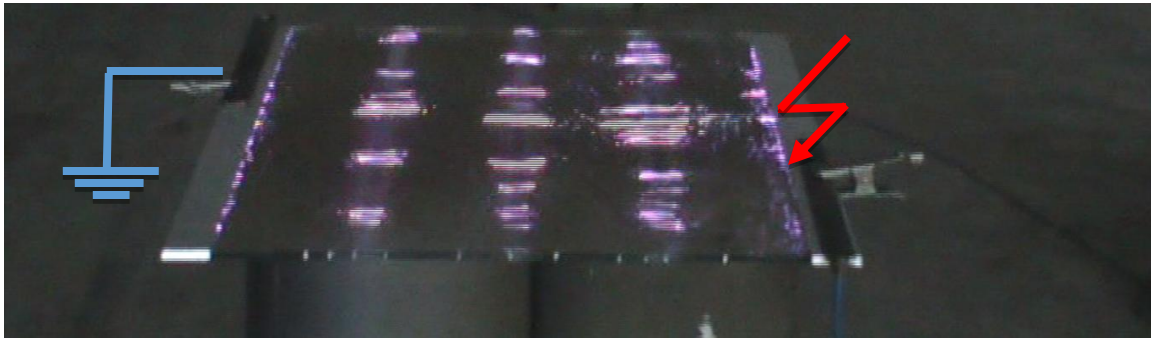
Figure IV.5: Variation de la tension de contournement en fonction du type de pollution.

**✚ Déroulement de contournement pour le sable de mer :**

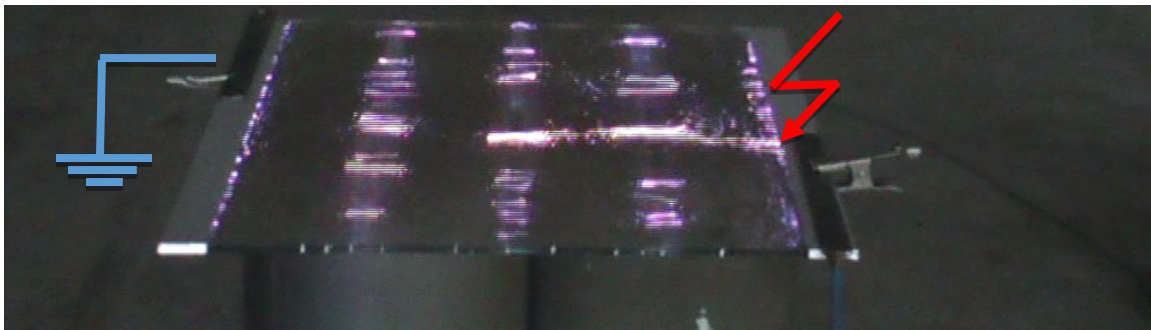
La figure IV.6 représente les étapes de déroulement de contournement, (a) l'apparition des arcs électriques à 20 kV, (b) Intensification des arcs et apparition des décharges dans les bandes polluées 40 kV, (c) Progression des décharges électriques 55 kV, (d) saut final (contournement) 60 kV.



(a)



(b)



(c)



(d)

**Figure IV.6:** phases de contournement du modèle pollué avec le sable du mer, (a) 20 kV, (b) 40 kV, (c) 55kV, (d) 60kV.

## **IV.2. Courant de fuite**

### **IV. 2 .1. Définition de courant de fuite**

C'est un courant de faible amplitude circulant à travers la couche polluante humide le long de la surface isolante. Il est de type électrolytique et peut être un courant résistif pour une isolation totalement polluée ou un courant capacitif dans le cas d'une isolation parfaitement propre [14].

### **IV. 2 .2. Courant de fuite critique**

Le courant de fuite critique  $I_{max}$  est le courant minimal nécessaire pour provoquer un contournement. Sa valeur est obtenue dans la dernière demi-période avant le contournement. [15].

### **IV. 2 .3. Mesure de courant de fuite**

La mesure du courant de fuite est effectuée à l'aide d'un oscilloscope à mémoire, relié à une résistance, ce dispositif permet également de visualiser simultanément le signal de la tension appliquée et celui du courant de fuite sur l'oscilloscope, Un ordinateur sert à l'acquisition des données de la tension appliquée et du courant de fuite qui traverse la surface du modèle.

#### **IV.2.3.1. Influence de la largeur des bandes propres sur le courant de fuite**

les tableaux IV.4, IV.5, IV.6 et IV.7, montrent les courants de fuites mesurés pour différentes tensions appliquées et une conductivité de 1mS/cm.

D'après la figure IV.7, nous concluons que le courant de fuite augmente lentement en fonction de la tension appliquée sauf pour 1 cm et à partir de 35 kV , le courant augmente brusquement.



**a) Largeur des trois bandes propres 1cm**

N°d'essai ( $\mu\text{A}$ ) Vapp (kv)	1	2	3	4	I <sub>f</sub> moyenne
10	48	38	45.1	64.2	48.825
15	82	88	89.9	85.6	86.375
20	100	129	108	121	114.5
30	235	174	214	207	207.5
40	382	359	383	357	370.25
50	1190	1150	1150	1220	1177.5

**Tableau IV.4:** évolution du courant de fuite en fonction de la tension appliquée (3bandes de 1cm)**b) Largeur des bandes propres 3cm**

N°d'essai ( $\mu\text{A}$ ) Vapp (kv)	1	2	3	4	I <sub>f</sub> moyenne
10	45.3	43.2	41.1	41.7	42.825
20	64.6	64.6	72.8	64.2	66.55
30	82	89	84	89.7	86.175
40	112	118	118	115	115.75
50	145	144	142	142	143.25

**Tableau IV.5:** Evolution du courant de fuite en fonction de la tension appliquée (3 bandes de 3cm).**c) Largeur des bandes propres de 5 cm**

N°d'essai ( $\mu\text{A}$ ) Vapp (kv)	1	2	3	4	I <sub>f</sub> moyenne
10	28	33.5	29	33.6	31.025
20	56.1	51.3	53.9	62	55.825
30	115	119	108	119	115.25
40	147	148	155	140	147.5
50	221	226	221	208	219

**Tableau IV.6:** évolution du courant de fuite en fonction de la tension appliquée (3 bandes de 5cm)

## a) Largeur des bandes propres de 1,3,5 cm

N°d'essai ( $\mu\text{A}$ ) Vapp (kv)					$I_f$ moyenne
	1	2	3	4	
10	50	53	56	55	53.5
20	116	109	113	118	114
30	197	206	205	206	203.5
40	242	241	248	236	241.75
50	379	375	373	377	376

Tableau IV.7: évolution du courant de fuite en fonction de la tension appliquée (3 bandes de 1,3,5cm) 11kV.

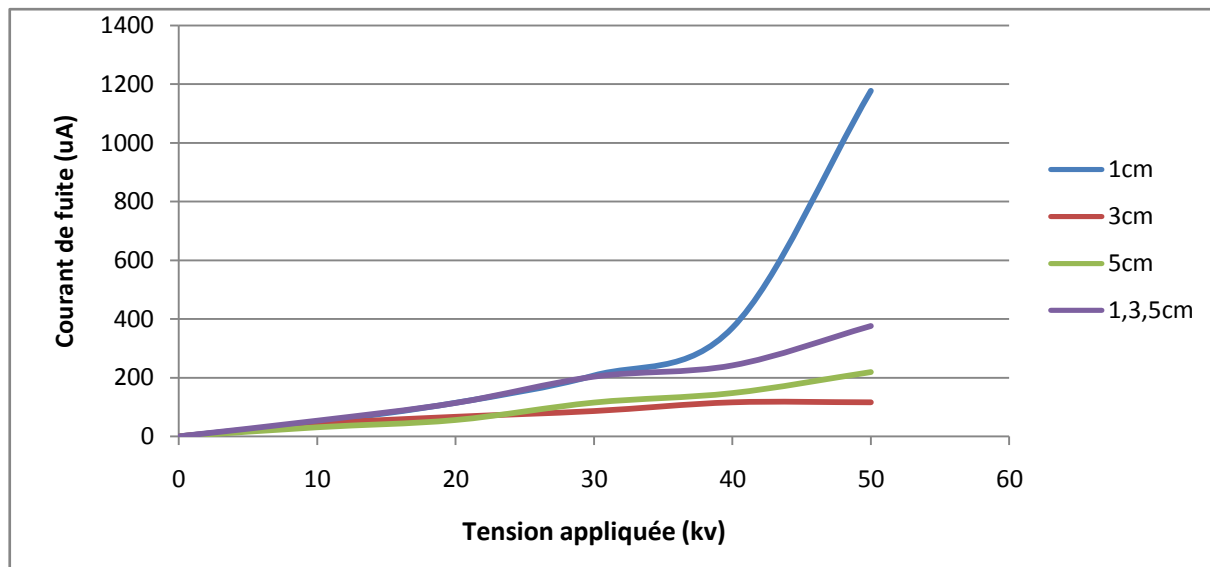


Figure IV.7: Evolution du courant en fonction de la tension appliquée pour différentes largeurs des zones propres.

## IV.2.3.2. Influence de différents types de pollution sur le courant de fuite

Les tableaux IV.8, IV.9 et IV.10 montrent le courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour le sable de sol, des dunes et de la mer avec Lbp est 1 cm.

D'après la figure IV.9, nous remarquons que le courant de fuite pour les trois types de sable augmente lentement sauf pour le sable de la mer où le courant augmente brusquement à partir de 11kV.

N°d'essai ( $\mu A$ ) Vapp (kv)	1	2	3	4	Moyenne
10	120	114	109	118	115.25
15	111	123	120	123	119.25
20	134	137	134	127	133

Tableau IV.8: Mesures du courant de fuite ( pollution avec le sable du sol).

N°d'essai ( $\mu A$ ) Vapp (kv)	1	2	3	4	Moyenne
10	61	54	58	61.8	58.7
15	69.1	64.3	65.3	69.9	67.15
20	125	124	119	111	119.75

Tableau IV.9: Mesures du courant de fuites (pollution avec le sable des dunes).

N°d'essai ( $\mu A$ ) Vapp (kv)	1	2	3	4	Moyenne
10	117	121	121	108	116.75
15	227	291	224	268	252.5
20	741	716	735	618	702.5

Tableau IV.10: Mesures du courant de fuite (pollution avec le sable de la mer).

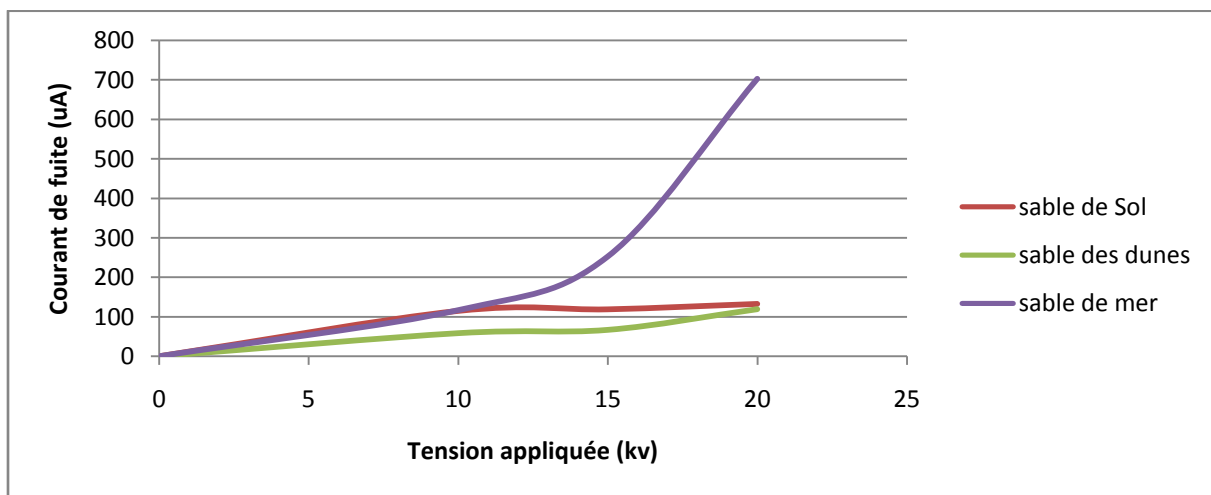


Figure IV.8: Variation du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différents types de sable.

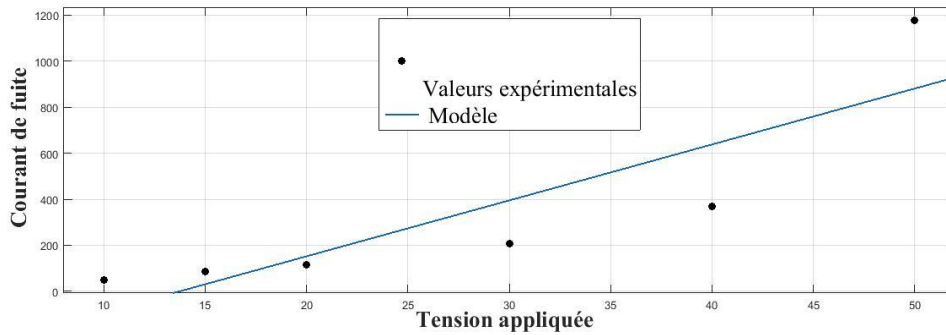
**IV.3. Modélisation par la méthode de régression**

**IV.3.1. Modèle de courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes largeurs des bandes propres**

**IV.3.1.1 Largeur des trois bandes propres 1cm**

Les figures IV.9 et IV.10 présentent la modélisation de courant de fuite en fonction de la tension appliquée par la régression linéaire et non linéaire.

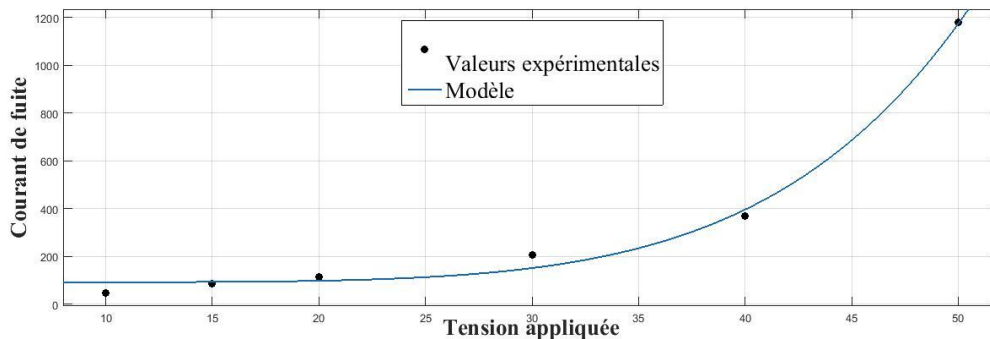
Les tableaux IV.11 et IV.12 montrent les modèles utilisés pour prédire les valeurs du courant de fuite en fonction de la tension appliquée, le coefficient de détermination d'un modèle linéaire  $R^2=0.762$  et pour un modèle non linéaire  $R^2=0.9934$ , la somme des carrés des erreurs pour un modèle non linéaire vaut :  $SSE=6044$ , alors que pour le modèle linéaire  $SSE=2.188e+005$ , cela signifie que l'ajustement par la régression non linéaire est la meilleur.



**Figure IV.9:** modélisation de courante de fuite en fonction de la tension appliquée(régression linéaire)

<b>Modél</b>	$I= -333.9+0.02429V$
<b>SSE</b>	$2.188e+005$
<b>R<sup>2</sup></b>	0.762

**Tableau IV.11:**résultats statistiques du modèle (régression linéaire)



**Figure IV.10:** modélisation de courante de fuite en fonction de la tension appliquée (régression non linéaire)

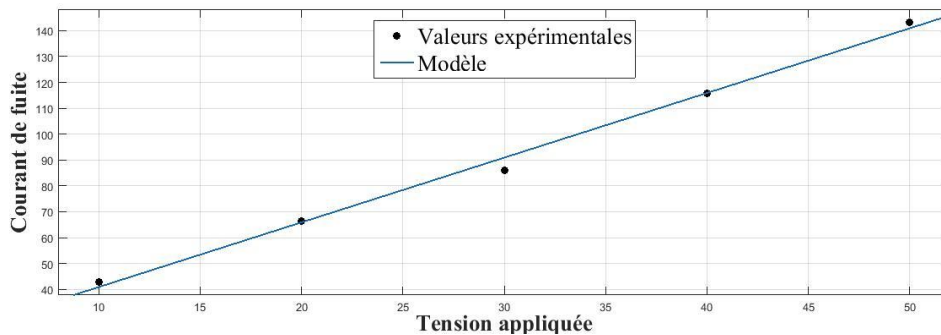
<b>Modél</b>	$I= 29.24+2.335e-7V^{5.689}$
<b>SSE</b>	<b>6044</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	0.9934

**Tableau IV.12:** résultats statistiques du modèle (régression non linéaire)

**IV.3.1.2 Largeur des bandes propres 3cm**

Les figures IV.11 et IV.12 présentent la modélisation de courant de fuite en fonction de la tension appliquée, par la régression linéaire et non linéaire.

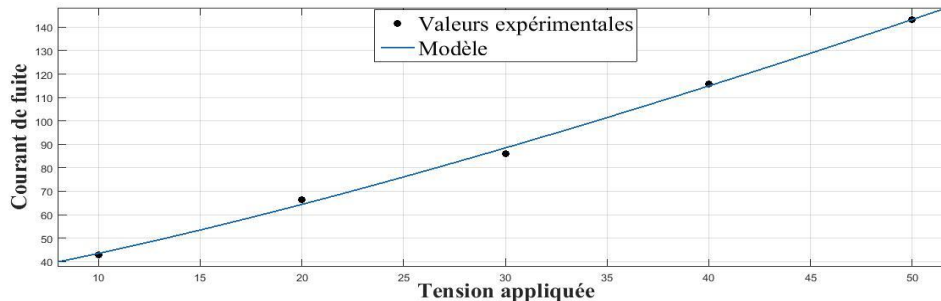
Les tableaux IV.13 et IV.14 montrent les modèles utilisés pour prédire les valeurs du courant de fuite en fonction de la tension appliquée, le coefficient de détermination d'un modèle linéaire  $R^2=0.9949$  et pour un modèle non linéaire  $R^2=0.9982$ , la somme des carrés des erreurs pour un modèle non linéaire vaut :  $SSE=11.13$ , alors que pour le modèle linéaire  $SSE=32$ , cela signifie que l'ajustement par la régression non linéaire est la meilleur.



**Figure IV.11:** modélisation de courante de fuite en fonction de la tension appliquée (régression linéaire)

<b>Modél</b>	$I= 15.89+2.501V$
<b>SSE</b>	<b>32</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	0.9949

**Tableau IV.13:** résultats statistiques du modèle (régression linéaire)



**Figure IV.12:** modélisation de courante de fuite en fonction de la tension appliquée (régression non linéaire)

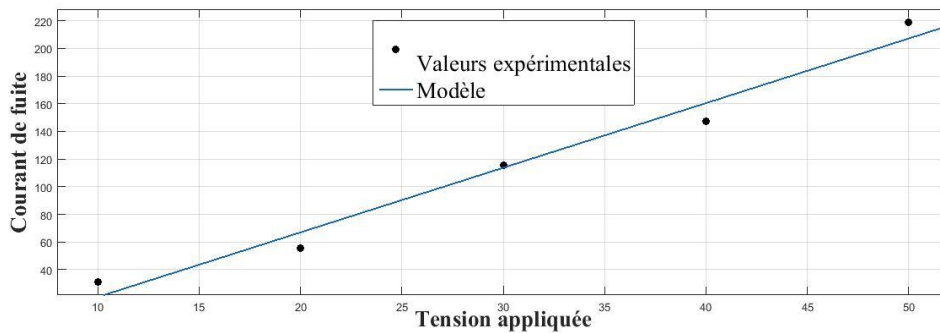
<b>Modél</b>	$I= 28.78+0.7829V^{1.274}$
<b>SSE</b>	11.13
<b>R<sup>2</sup></b>	0.9982

**Tableau IV.14:** résultats statistiques du modèle (régression non linéaire)

**IV.3.1.3 Largeur des bandes propres de 5 cm**

Les figures IV.13 et IV.14 présentent la modélisation de courant de fuite en fonction de la tension appliquée, par la régression linéaire et non linéaire.

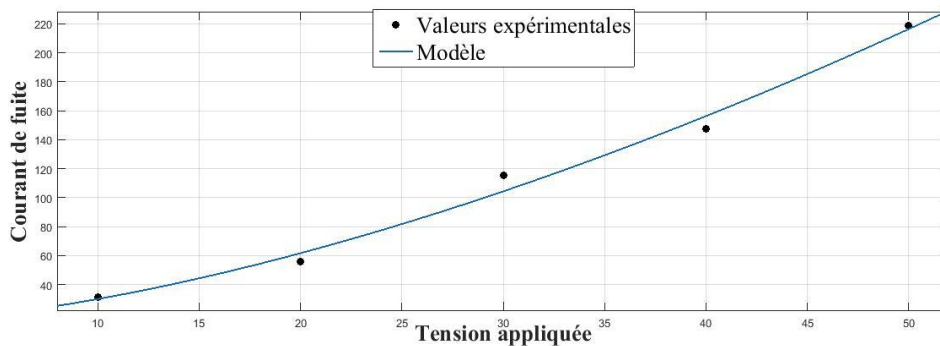
Les tableaux IV.15 et IV.16 montrent les modèles utilisés pour prédire les valeurs du courant de fuite en fonction de la tension appliquée, le coefficient de détermination d'un modèle linéaire  $R^2=0.9755$  et pour un modèle non linéaire  $R^2=0.9894$ , la somme des carrés des erreurs pour un modèle non linéaire vaut :  $SSE=237$ , alors que pour le modèle linéaire  $SSE=550.3$ , cela signifie que l'ajustement par la régression non linéaire est la meilleur.



**Figure IV.13:** modélisation de courante de fuite en fonction de la tension appliquée (régression linéaire)

<b>Modél</b>	$I= -26.57+4.676V$
<b>SSE</b>	550.3
<b>R<sup>2</sup></b>	0.9755

**Tableau IV.15:** résultats statistiques du modèle (régression linéaire)



**Figure IV.14:** modélisation de courante de fuite en fonction de la tension appliquée (régression non linéaire)

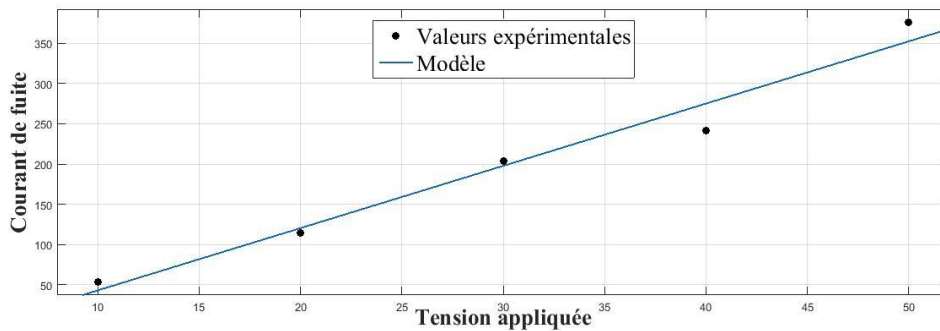
<b>Modél</b>	$I = 14.04 + 0.4184 V^{1.58}$
<b>SSE</b>	237
<b>R<sup>2</sup></b>	0.9894

**Tableau IV.16:** résultats statistiques du modèle (régression non linéaire)

**IV.3.1.4 Largeur des bandes propres de 1,3,5 cm**

Les figures **IV.15** et **IV.16** présentent la modélisation de courant de fuite en fonction de la tension appliquée, par la régression linéaire et non linéaire.

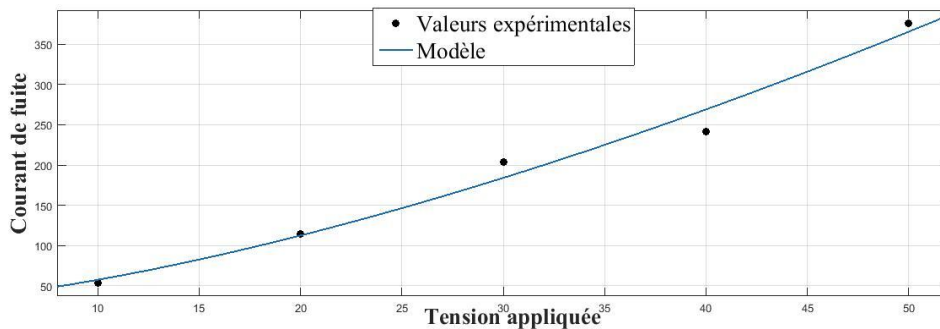
Les tableaux **IV.17** et **IV.18**, montrent les modèles utilisés pour prédire les valeurs du courant de fuite en fonction de la tension appliquée, le coefficient de détermination d'un modèle linéaire  $R^2 = 0.97$  et pour un modèle non linéaire  $R^2 = 0.9797$ , la somme des carrés des erreurs pour un modèle non linéaire vaut :  $SSE = 1248$ , alors que pour le modèle linéaire  $SSE = 1850$ , cela signifie que l'ajustement par la régression non linéaire est la meilleur.



**Figure IV.15:** modélisation de courante de fuite en fonction de la tension appliquée (régression linéaire)

<b>Modél</b>	$I = -34.08 + 7.728V$
<b>SSE</b>	1850
<b>R<sup>2</sup></b>	0.97

**Tableau IV.17:** résultats statistiques du modèle (régression linéaire)



**Figure IV.16:** modélisation de courante de fuite en fonction de la tension appliquée (régression non linéaire)

<b>Modél</b>	$I= 27.79+0.9239V^{1.509}$
<b>SSE</b>	1248
<b>R<sup>2</sup></b>	0.9797

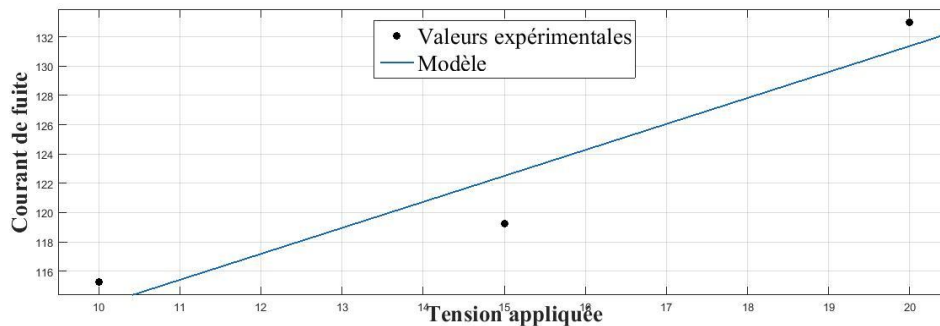
**Tableau IV.18:** résultats statistiques du modèle (régression non linéaire)

### IV.3.2. Modèle courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes types des pollutions.

#### IV.3.2.1. pollution avec le sable du sol

Les figures **IV.17** et **IV.18** présentent la modélisation de courant de fuite en fonction de la tension appliquée, par la régression linéaire et non linéaire.

Les tableaux **IV.19** et **IV.20** montrent les modèles utilisés pour prédire les valeurs du courant de fuite en fonction de la tension appliquée, le coefficient de détermination d'un modèle linéaire  $R^2=0.9086$  et pour un modèle non linéaire  $R^2=1$ , la somme des carrés des erreurs pour un modèle non linéaire vaut :  $SSE=0$ , alors que pour le modèle linéaire  $SSE=15.84$ , cela signifie que l'ajustement par la régression non linéaire est la meilleur.



**Figure IV.17:** modélisation de courante de fuite en fonction de la tension appliquée (régression linéaire)

<b>Modél</b>	$I= 95.88+1.775V$
<b>SSE</b>	15.84
<b>R<sup>2</sup></b>	0.9086

**Tableau IV.19:** résultats statistiques du modèle (régression linéaire)



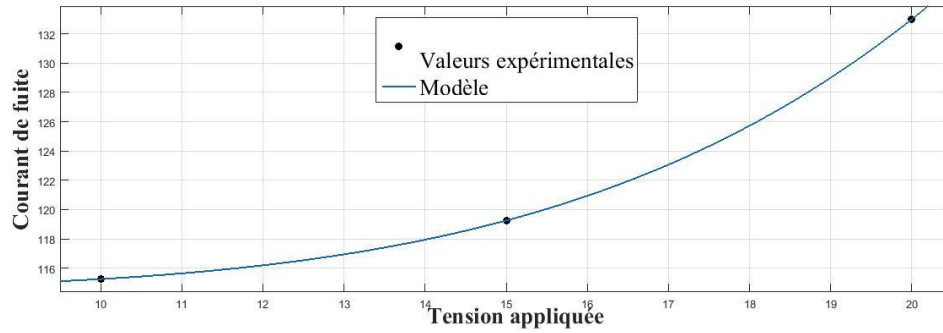


Figure IV.18: modélisation de courante de fuite en fonction de la tension appliquée (régression non linéaire)

<b>Modél</b>	$I = 114.6 + 1.16e-5V^{4.766}$
<b>SSE</b>	0
<b>R<sup>2</sup></b>	1

Tableau IV.20: résultats statistiques du modèle (régression non linéaire)

IV.3.2.2 pollution avec le sable des dunes

Les figures IV.19 et IV.20 présentent la modélisation de courant de fuite en fonction de la tension appliquée, par la régression linéaire et non linéaire.

Les tableaux IV.21 et IV.22 montrent les modèles utilisés pour prédire les valeurs du courant de fuite en fonction de la tension appliquée, le coefficient de détermination d'un modèle linéaire  $R^2=0.8516$  et pour un modèle non linéaire  $R^2=1$ , la somme des carrés des erreurs pour un modèle non linéaire vaut :  $SSE=3.004e-6$ , alors que pour le modèle linéaire  $SSE=324.9$ , cela signifie que l'ajustement par la régression non linéaire est la meilleur.

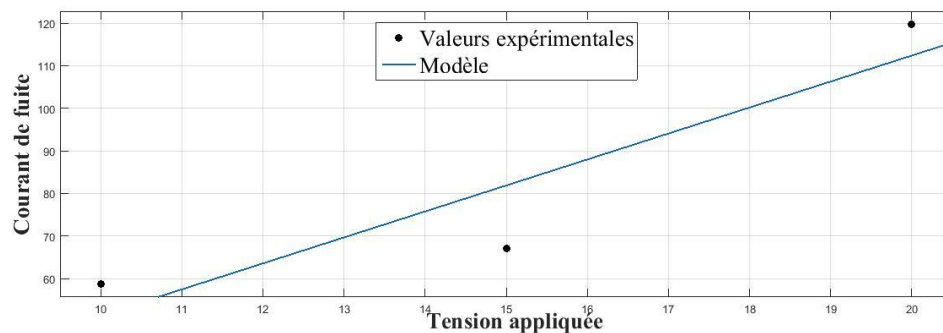


Figure IV.19: modélisation de courante de fuite en fonction de la tension appliquée (régression linéaire)

<b>Modél</b>	$I = 9.708 + 6.105V$
<b>SSE</b>	324.9
<b>R<sup>2</sup></b>	0.8516

Tableau IV.21: résultats statistiques du modèle (régression linéaire)

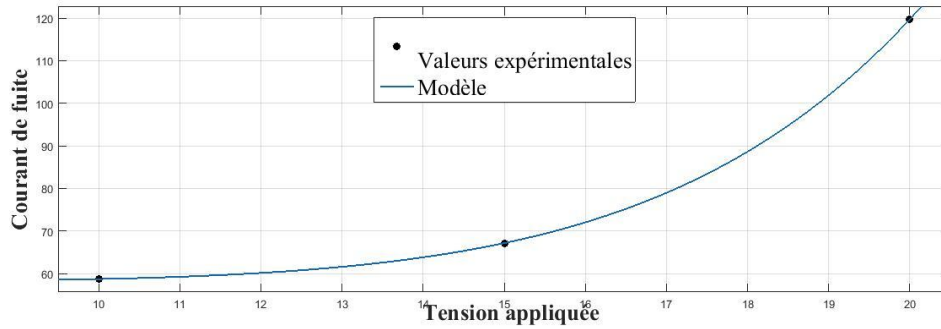


Figure IV.20: modélisation de courante de fuite en fonction de la tension appliquée (régression non linéaire)

<b>Modél</b>	$I = 58.1 + 1.301e-7V^{6.668}$
<b>SSE</b>	$3.004e-6$
<b>R<sup>2</sup></b>	1

Tableau IV.22: résultats statistiques du modèle (régression non linéaire)

IV.3.2.3 pollution avec le sable de la mer

Les figures IV.21 et IV.22 présentent la modélisation de courant de fuite en fonction de la tension appliquée, par la régression linéaire et non linéaire.

Les tableaux IV.23 et IV.24 montrent les modèles utilisés pour prédire les valeurs du courant de fuite en fonction de la tension appliquée, le coefficient de détermination d'un modèle linéaire  $R^2 = 0.9125$  et pour un modèle non linéaire  $R^2 = 1$ , la somme des carrés des erreurs pour un modèle non linéaire vaut :  $SSE = 2.989e-0.24$ , alors que pour le modèle linéaire  $SSE = 1.646e+004$ , cela signifie que l'ajustement par la régression non linéaire est la meilleur.

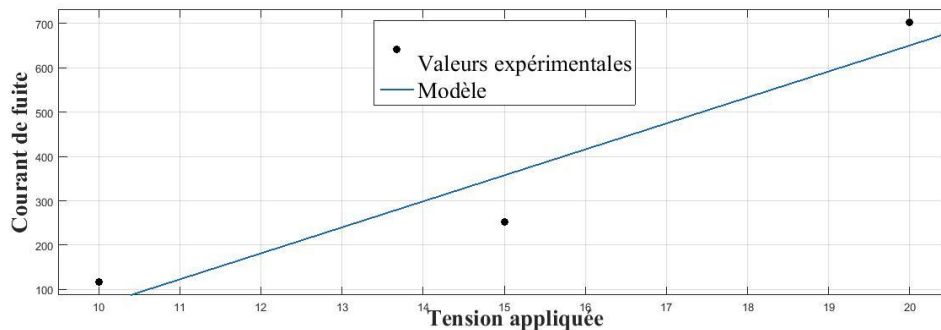


Figure IV.21: modélisation de courante de fuite en fonction de la tension appliquée (régression linéaire)

<b>Modél</b>	$I = -521.4 + 58.58V$
<b>SSE</b>	$1.646e+004$
<b>R<sup>2</sup></b>	0.9125

Tableau IV.23: résultats statistiques du modèle (régression linéaire)

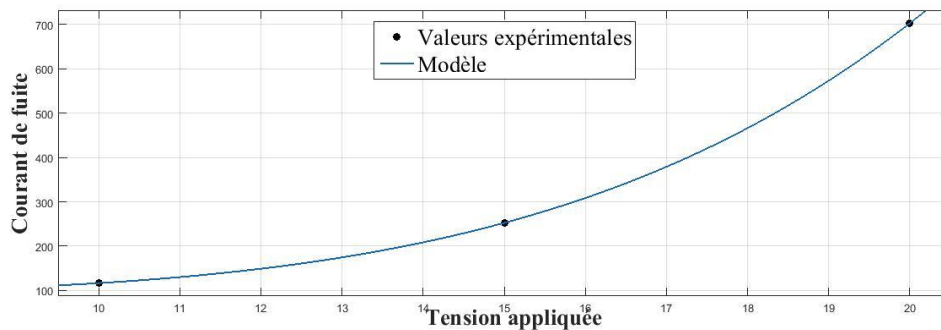


Figure IV.22: modélisation de courante de fuite en fonction de la tension appliquée (régression non linéaire)

<b>Modél</b>	$I = 92.48 + 0.0005413V^{6.668}$
<b>SSE</b>	$2.989e-0.24$
<b>R<sup>2</sup></b>	1

Tableau IV.24: résultats statistiques du modèle (régression non linéaire)

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les courbes que nous avons pu tracer à partir des résultats obtenus au laboratoire pour les différents types de pollution et selon la largeur des couches propres,

Nous avons utilisé la méthode de régression pour élaborer les relations qui existent entre les différentes grandeurs que nous avons mesurées durant nos essais.

Nous avons conclu que :

- La tension de contournement diminue avec l'augmentation de la conductivité de surface contaminée (augmentation du nombre de pulvérisation), et avec l'élargissement des couches polluées ou bien la réduction de la largeur des bandes propres.
- La formation d'arcs contournant la zone sèche a eu lieu avant le contournement pour les largeurs de la couche sèche inférieures au tiers de la ligne de fuite, au-delà de cette grandeur, le contournement se fait directement.
- Le facteur de détermination est plus proche de 100% dans le modèle non linéaire est supérieure à celui de modèle linéaire et la somme carré d'erreur en modèle non linéaire inférieure à la somme carré d'erreur en modèle linéaire
- Le modèle peut être utilisé pour prédire la valeur de courant de fuite pour différents niveaux de tension.
- Le modèle de régression non linéaire est plus proche du modèle expérimental.
- La relation qui existe entre le courant de fuite et la tension appliquée est modélisée par une fonction croissante. Cela signifie que le courant de fuite augmente en fonction de la tension appliquée.
- La régression non linéaire utilise une procédure différente de celle utilisée dans la régression linéaire pour réduire la somme des carrés de l'erreur résiduelle (SSE).