

Annexe 1

L'influence de la densité de courant i

Tableau 1.1 : Conditions opératoires avant conditionnement et après déshydratation pour différentes densités de courant

(T=15 min, pH de la boue brute)

Densité i (A.m ⁻²)	État	Intensité I (A)	Tension U(V)		Température	Conductivité (ms.cm ⁻¹)		Turbidité (NTU)	pH	Masse de l'anode (g)	Fe dissous (g)	Concentration en	Énergie consommée W (kWh.m ⁻³)	
			Générateur	Électrodes										
50	Initial	0.17	5	5.5		17	1.71	/	6.33	289.37	0.04		0.08	0.47
	Final	0.16	5	5.5		19	1.73	61	6.83	289.33				
100	Initial	0.34	9	9.5		18	1.73	/	6.30	289.88	0.05		0.1	1.61
	Final	0.30	9	10		21	1.77	75	6.82	299.38				
150	Initial	0.50	9	9		16	1.84	/	6.35	299.31	0.07		0.14	2.25
	Final	0.46	9	9		19	1.95	53	6.91	298.21				
200	Initial	0.67	14	15		20	1.78	/	6.29	298.21	0.12		0.24	5.02
	Final	0.48	14	15		21	2.00	34	6.99	298.09				

250	Initial	0.84	15	17	18	1.72	/	6.3 4	296.30	0.18	0.36	7.14
	Final	0.75	15	17	22	2.02	33	7.0 1	296.12			
300	Initial	1.00	20	22	17	1.72	/	6.4 0	294.02	0.22	0.44	11.00
	Final	0.73	20	22.5	20	2.01	140	7.1 1	293.80			

Tableau 1.2 : L'influence de la densité de courant sur Siccité Sc, matières en suspension MES, matières volatiles MVS (T=15 min, pH de la boue brute).

Densité i (A.m ⁻²) Masse (g)	Boue déshydratée non conditionnée	50	100	150	200	250	300
capsule vide (M0)	44.24	40.55	40.01	42.82	48.33	40.01	48.33
capsule + gâteau humide (M1)	68.39	52.10	49.40	51.49	56.58	48.28	57.23
capsule + gâteau sèche à 105°C (M2)	47.23	42.59	41.74	44.62	50.16	42.01	50.42
capsule + gâteau sèche à 550°C (Mf)	45.64	41.50	40.87	43.70	49.22	40.93	49.31

Sc (%)	12.38	17.66	18.42	20.75	22.17	24.19	23.48
MES (g.L ⁻¹)	29.90	20.40	17.30	18.00	18.30	20.00	20.90
MVS (g.L ⁻¹)	53.18	53.43	50.29	51.11	51.37	54.00	53.11

Tableau 1.3 : L'influence de la densité de courant sur la résistance spécifique à la filtration r et le volume de filtrat ($T=15$ min, pH de la boue brute).

Densité i ($A.m^{-2}$) Temps de filtration t (min)	Boue déshydratée non conditionnée	50	100	150	200	250	300
Variation des Volumes de filtrat V (mL)							
0	16	18	16	24	20	22	26
1	26	28	22	36	34	34	41
2	32	34	28	44	42	58	52
3	36	40	32	50	47	68	60
4	40	44	36	56	52	75	64
5	42	48	40	60	57	80	68
6	44	52	43	64	62	82	72
7	48	54	46	68	64	84	74
8	50	58	48	72	67	85	76
9	52	60	51	74	69	86	78
10	54	62	54	76	72	87	80
12	58	68	58	80	76	88	81
14	61	71	61	82	78	89	82
16	64	73	64	84	81	90	83
18	66	75	66	84	83		84
20	69	76	69	86	84		84
22	71	78	70	86	85		85
24	73	78	72	87	86		85
26	74	80	73	87	87		86
28	76	80	74	88	87		
30	78	80	76		88		
35	80	81	78				
40	81	82	80				
45	82		82				

Pente a ($s.m^{-6}$)	4.18×10^{11}	2.00×10^{11}	1.94×10^{11}	1.70×10^{11}	1.53×10^{11}	8.18×10^{10}	2.10×10^{11}
r ($m.kg^{-1}$)	5.04×10^{13}	3.53×10^{13}	4.03×10^{13}	3.40×10^{13}	3.02×10^{13}	1.47×10^{13}	3.63×10^{13}

Annexe 2

L'influence du temps d'électrolyse T

Tableau 2.1 : Conditions opératoires avant conditionnement et après déshydratation pour différents temps d'électrolyse ($i= 100 \text{ A.m}^{-2}$, pH de la boue brute).

Temps d'électrolyse T (min)	État	Intensité I (A)	Tension U(V)		Température T (°C)	Turbidité (NTU)		pH	Masse de l'anode (g)	Fe dissous (g)	Concentration en Fe dissous CFe (g.L ⁻¹)	Énergie consommée W (kWh.m ⁻³)
			Générateur	Électrodes								
15	Initial	0.34	9	9.5	18	1.73	/	6.30	289.88	0.05	0.1	1.61
	Final	0.30	9	10	21	1.77	75	6.87	289.83			
30	Initial	0.34	8.5	9	20	1.30	/	6.31	272.31	0.13	0.26	3.06
	Final	0.29	8.5	9.5	22	1.40	22	7.05	272.18			
45	Initial	0.34	8	9	18	1.36	/	6.45	270.83	0.20	0.40	4.59
	Final	0.31	8	9.5	20	1.46	48	7.20	270.63			
60	Initial	0.34	7	8	19	1.41	/	6.40	270.18	0.22	0.44	5.44
	Final	0.20	7	8.5	21	1.46	48	7.25	269.96			
75	Initial	0.34	7.5	8.5	18	1.39	/	6.35	269.21	0.24	0.48	7.22
	Final	0.19	7.5	9	21	1.19	16	7.52	268.97			
90	Initial	0.34	8	9	20	1.46	/	6.55	268.39	0.36	0.72	9.18
	Final	0.25	8	9.5	22	1.28	28	7.48	268.03			

Tableau 2.2 : L'influence du temps d'électrolyse sur Siccité Sc, matières en suspension MES, matières volatiles MVS(i= 100 A.m⁻², pH de la boue brute).

T (min)	15	30	45	60	75	90
Masse (g)						
capsule vide (M0)	40.01	48.32	40.00	40.01	42.79	48.31
capsule + gâteau humide (M1)	49.40	59.30	49.99	52.20	54.68	64.08
capsule + gâteau sèche à 105°C (M2)	41.74	50.35	42.03	41.97	44.77	51.03
capsule + gâteau sèche à 550°C (Mf)	40.87	49.32	40.99	40.95	43.75	49.63
Sc (%)	18.42	18.49	20.32	16.08	16.65	17.25
MES (g.L ⁻¹)	17.30	20.30	20.30	19.60	19.80	27.20
MVS (g.L ⁻¹)	50.23	50.74	51.23	52.04	51.51	51.47

Tableau 2.3 : L'influence du temps d'électrolyse s sur la résistance spécifique à la filtration r et le volume de filtrat ($i= 100 \text{ A.m}^{-2}$, pH de la boue brute).

Temps d'électrolyse T (min)	15	30	45	60	75	90
Temps de filtration t (min)	Variation des Volumes de filtrat V (mL)					
0	16	15	26	20	10	10
0.5	/	25	38	31	18	16
1	22	32	48	36	23	21
1.5	/	37	56	39	26	24
2	28	42	62	42	29	28
2.5	/	46	67	45	32	30
3	32	49	71	48	34	32
3.5	/	52	74	51	36	35
4	36	54	76	54	38	37
4.5	/	56	78	56	40	39
5	40	58	79	58	42	40
6	43	63	80	61	44	43
8	48	70	82	67	49	48
10	54	74	84	73	53	52
12	58	76	84	77	57	56
14	61	77	85	80	61	58
16	64	78	86	82	65	59
18	66	80	87	84	67	61
20	69	81		85	70	62
22	70	82		86	73	63
24	72	83			75	64
26	73				77	65
30	76				81	67
45	82					70

Pente a (s.m^{-6})	1.94×10^{11}	1.79×10^{11}	6.59×10^{10}	2.52×10^{11}	2.92×10^{11}	3.58×10^{11}
r (m.kg^{-1})	4.03×10^{13}	3.18×10^{13}	1.17×10^{13}	4.63×10^{13}	5.31×10^{13}	4.75×10^{13}

Tableau 2.4 : Conditions opératoires avant conditionnement et après déshydratation pour différents temps d'électrolyse ($i= 150 \text{ A.m}^{-2}$, pH de la boue brute).

Temps d'électrolyse T(min)	État	Intensité I (A)	Tension U(V)	Température T (°C)	Conductivité (ms.cm ⁻¹)		Turbidité (NTU)	pH	Masse Fe dissous (g)	Concentration en Fe dissous C _{Fe} (g.L ⁻¹)		Énergie consommée W (kWh.m ⁻³)
			Générateur	Électrodes								
15	Initial	0.50	9	9	16	184	/	6.35	299.38	0.07	0.14	2.25
	Final	0.46	9	9	19	1.95	53	6.91	299.31			
30	Initial	0.50	9	10	18	1.66	/	6.55	279.65	0.19	0.38	5.00
	Final	0.33	9	10.5	20	1.16	13	6.63	279.46			
45	Initial	0.50	10	11	19	1.73	/	6.50	278.81	0.28	0.56	8.25
	Final	0.39	10	11.5	21	1.52	62	6.90	278.53			
60	Initial	0.50	12	12.5	20	1.37	/	6.62	276.71	0.37	0.74	12.50
	Final	0.40	12	13.5	22	1.07	16	7.95	276.37			
75	Initial	0.50	12	12.5	20	1.40	/	6.57	274.56	0.40	0.80	15.62
	Final	0.44	12	13	22	1.52	25	6.89	274.16			
90	Initial	0.50	11	12	19	1.37	/	6.48	273.48	0.47	0.94	18.00
	Final	0.40	11	12.5	21	1.40	22	7.64	273.01			

Tableau 2.5 : L'influence du temps d'électrolyse sur Siccité Sc, matières en suspension MES, matières volatiles MVS(i= 150 A.m⁻², pH de la boue brute).

T (min)	15	30	45	60	75	90
Masse (g)						
capsule vide (M0)	42.82	48.30	42.79	40.01	42.79	40.02
capsule + gâteau humide (M1)	51.49	58.00	52.77	49.86	54.45	52.13
capsule + gâteau sèche à 105°C (M2)	44.62	50.32	45.08	41.74	45.04	42.30
capsule + gâteau sèche à 550°C (Mf)	43.70	49.28	43.83	40.81	43.81	41.07
Sc (%)	20.75	20.84	22.94	17.56	19.29	18.82
MES (g.L ⁻¹)	18.00	20.02	22.90	17.30	22.50	22.80
MVS (g.L ⁻¹)	51.11	51.48	54.58	53.75	54.67	53.95

Tableau 2.6 : L'influence du temps d'électrolyse s sur la résistance spécifique à la filtration r et le volume de filtrat ($i= 150 \text{ A.m}^{-2}$, pH de la boue brute).

Temps d'électrolyse T (min) Temps de filtration t (min)	15	30	45	60	75	90
	Variation des Volumes de filtrat V (mL)					
0	24	20	30	32	22	16
0.5	/	29	44	42	34	26
1	36	36	52	47	42	34
1.5	/	41	58	53	48	39
2	44	46	64	57	54	44
2.5	/	50	69	61	58	48
3	50	54	74	64	62	52
3.5	/	56	76	67	66	55
4	56	60	78	69	68	58
4.5	/	62	79	72	71	61
5	60	64	81	74	73	63
6	64	70	83	76	76	68
8	72	75	85	80	80	76
10	76	80	86	83	82	80
12	80	82	87	84	84	84
14	82	83	88	85	85	85
16	84	84	89	85	85	86
18	84	85		86	86	86
20	86	86			87	87
22	86	87				
24	87	88				

Pente a (s.m^{-6})	1.70×10^{10}	7.90×10^{10}	5.56×10^{10}	1.18×10^{11}	7.55×10^{10}	8.50×10^{10}
r (m.kg^{-1})	3.40×10^{13}	1.41×10^{13}	8.74×10^{12}	2.46×10^{13}	1.21×10^{13}	1.34×10^{13}

Tableau 2.7 : Conditions opératoires avant conditionnement et après déshydratation pour différents temps d'électrolyse ($i = 200 \text{ A.m}^{-2}$, pH de la boue brute).

Temps d'électrolyse T (min)	État	Intensité I (A)	Tension U(V)	Température T (°C)	Conductivité (ms.cm^{-1})		Turbidité (NTU)	pH	Masse Fe dissous (g)	Concentration en Fe dissous C _{Fe} (g.L^{-1})		Énergie consommée W (kWh.m^{-3})
			Générateur	Électrodes								
15	Initial	0.67	14	15	20	1.78	/	6.29	298.21	0.12	0.24	5.02
	Final	0.48	14	15	21	2.00	34	6.99	298.09			
30	Initial	0.67	14.5	16	17	1.65	/	6.61	286.44	0.26	0.52	10.72
	Final	0.47	14.5	16.5	20	1.07	14	6.93	286.18			
45	Initial	0.67	13	14	18	1.62	/	6.65	285.39	0.32	0.64	14.07
	Final	0.45	13	14.5	20	1.53	71	7.03	285.07			
60	Initial	0.67	13.5	14	18	1.64	/	6.53	283.27	0.39	0.78	18.76
	Final	0.43	13.5	15	21	1.66	110	7.10	282.88			
75	Initial	0.67	12	12	19	1.61	/	6.58	282.03	0.42	0.84	20.01
	Final	0.35	12	12.5	21	1.27	15	7.23	281.61			
90	Initial	0.67	12.5	13	19	1.60	/	6.59	281.05	0.48	0.96	26.13
	Final	0.34	12.5	14	20	2.17	97	7.25	280.57			

Tableau 2.8 : L'influence du temps d'électrolyse sur Siccité Sc, matières en suspension MES, matières volatiles MVS(i= 200 A.m⁻², pH de la boue brute).

T (min)	15	30	45	60	75	90
Masse (g)						
capsule vide (M0)	48.33	48.30	40.01	42.82	40.01	48.32
capsule + gâteau humide (M1)	56.58	57.21	49.28	51.72	49.12	59.52
capsule + gâteau sèche à 105°C (M2)	50.16	50.41	42.35	44.91	42.08	50.88
capsule + gâteau sèche à 550°C (Mf)	49.22	49.29	41.08	43.82	41.02	49.53
Sc (%)	22.17	23.67	25.23	23.48	22.72	22.86
MES (g.L ⁻¹)	18.30	21.10	23.40	20.90	20.70	25.60
MVS (g.L ⁻¹)	51.37	53.08	54.27	52.15	51.21	52.73

Tableau 2.9 : L'influence du temps d'électrolyse s sur la résistance spécifique à la filtration r et le volume de filtrat ($i=200 \text{ A.m}^{-2}$, pH de la boue brute).

Temps d'électrolyse T (min) Temps de filtration t (min)	15	30	45	60	75	90
Variation des Volumes de filtrat V (mL)						
0	20	25	24	23	18	22
0.5	/	32	34	34	25	34
1	34	44	42	43	30	43
1.5	/	49	47	48	35	50
2	42	55	53	54	41	55
2.5	/	60	59	59	46	60
3	47	65	63	64	51	65
3.5	/	68	69	67	56	67
4	52	71	71	69	61	69
4.5	/	73	74	72	65	71
5	57	75	76	75	68	74
6	62	77	79	78	71	76
8	67	80	81	80	75	78
10	72	82	83	82	77	80
12	76	83	85	83	79	82
14	78	84	86	84	80	83
16	81	85	87	85	82	84
18	83	86	88	85	84	85
20	84	86	89	86	85	86
22	85	87		87	86	86
24	86	88		88	86	87
26					87	

Pente a (s.m^{-6})	1.53×10^{11}	4.78×10^{10}	4.09×10^{10}	5.02×10^{10}	5.46×10^{10}	6.45×10^{10}
r (m.kg^{-1})	3.02×10^{13}	8.15×10^{12}	6.29×10^{12}	8.66×10^{12}	9.50×10^{12}	9.08×10^{12}

Annexe 3

L'Influence de la dose de biofloculant D

Tableau 3.1 : Conditions opératoires avant conditionnement et après déshydratation pour différents dose de biofloculant
($i= 100 \text{ A.m}^{-2}$, $T=45\text{min}$, pH de mélange boue brute/jus de cactus).

Dose de biofloculant (g/kg MS)	État	Intensité I (A)	Tension U(V)		Conductivité (ms.cm^{-1})	Turbidité (NTU)	pH		Masse de l'anode (g)	Fe dissous (g)	Concentration en Fe dissous (g.L^{-1})	Énergie consommée W (kWh.m^{-3})	
			Générateur	Électrodes									
1.33	Initial	0.34	7	8	19	1.60	/	6.21	256.04	0.19		0.38	4.08
	Final	0.24	7	8.5	21	1.62	100	6.52	255.85				
2.67	Initial	0.34	7	7.5	19	1.70	/	6.22	258.23	0.21		0.42	3.82
	Final	0.33	7	8	21	1.75	97	6.59	258.02				
4.00	Initial	0.34	9	10	18	1.69	/	6.25	256.82	0.20		0.40	5.1
	Final	0.33	9	10.5	20	1.84	63	6.61	255.62				
5.33	Initial	0.34	7	8	20	1.48	/	6.30	260.60	0.19		0.38	4.08
	Final	0.30	7	8.5	22	1.49	21	6.69	260.41				
6.67	Initial	0.34	8	8.5	18	1.61	/	6.24	259.01	0.19		0.38	4.33
	Final	0.25	8	9	20	1.47	9	6.95	258.82				
8.00	Initial	0.34	6.5	7	19	1.59	/	6.27	259.95	0.20		0.40	3.57
	Final	0.27	6.5	7	21	1.48	9	6.84	259.75				

Tableau 3.2 : L'Influence de la dose de biofloculant D sur Siccité Sc, matières en suspension MES, matières volatiles MVS (i= 100 A.m⁻², T=45min, pH de mélange boue brute/jus de cactus).

Dose D (g/kg MS)	1.33	2.67	4.00	5.33	6.67	8.00
Masse (g)						
capsule vide (M0)	40.01	42.79	39.90	48.17	39.89	39.90
capsule + gâteau humide (M1)	53.19	53.54	49.79	57.68	49.84	52.29
capsule + gâteau sèche à 105°C (M2)	42.61	45.00	42.15	50.48	42.05	42.48
capsule + gâteau sèche à 550°C (Mf)	41.25	43.85	40.95	49.25	40.90	41.12
Sc (%)	19.73	20.56	22.75	24.30	21.71	20.82
MES (g.L⁻¹)	26.00	22.10	22.50	23.10	21.60	28.80
MVS (g.L⁻¹)	52.31	52.04	53.33	53.25	53.24	52.71

Tableau 3.3 : L'Influence de la dose de biofloculant D sur la résistance spécifique à la filtration r et le volume de filtrat

($i= 100 \text{ A.m}^{-2}$, $T=45\text{min}$, pH de mélange boue brute/jus de cactus).

Dose D (g/kg MS)	1.33	2.67	4.00	5.33	6.67	8.00
Temps de filtration t (min)						
	Variation des Volume de filtrat V (mL)					
0	16	28	18	32	18	15
0.17	20	33	22	38	26	22
0.33	24	37	28	44	33	28
0.50	27	41	32	46	38	32
0.67	30	44	34	50	43	35
0.83	33	47	36	54	46	37
1	35	50	38	58	50	41
1.5	42	56	46	64	60	48
2	47	62	52	69	67	54
3	56	70	62	76	74	64
4	62	74	68	79	78	71
5	68	76	72	81	81	75
6	72	78	75	83	82	78
7	74	79	77	85	83	80
8	76	80	79	86	83	81
9	78	80	80	87	84	82
10	79	81	81	88	85	82
11	80	81	82			83
12	80	82	83			
13	81		84			
14	81					
15	82					

Pente a (s.m ⁻⁶)	6.53×10^{10}	4.56×10^{10}	4.63×10^{10}	1.31×10^{10}	3.13×10^{10}	5.93×10^{10}
r (m.kg ⁻¹)	9.04×10^{13}	7.43×10^{12}	7.41×10^{12}	2.04×10^{12}	5.22×10^{12}	8.28×10^{12}

Tableau 3.4 : Conditions opératoires avant conditionnement et après déshydratation pour différents dose de biofloculant (i= 150 A.m⁻², T=45min, pH de mélange boue brute/jus de cactus).

Dose de biofloculant (g/kg MS)	État	Intensité I (A)	Tension U(V)		Conductivité (ms.cm ⁻¹)	Turbidité (NTU)	pH		Masse de l'anode (g)	Fe dissous (g)	Concentration en Fe (g.L ⁻¹)	Énergie consommée W (kWh.m ⁻³)	
			Générateur	Électrodes									
1.33	Initial	0.50	11	12	21	1.63	/	6.33	255.28	0.27	disso us	0.54	9
	Final	0.35	11	13	23	1.65	99	6.46	255.01				
2.67	Initial	0.50	13	14	21	1.65	/	6.48	254.49	0.27	CFe (g.L ⁻¹)	0.54	10.5
	Final	0.45	13	14.5	22	1.70	104	6.65	254.22				
4	Initial	0.50	8	9	21	1.63	/	6.42	253.74	0.28		0.56	6.75
	Final	0.31	8	9.5	23	1.74	50	6.82	253.46				
5.33	Initial	0.50	11	12	20	1.59	/	6.38	252.95	0.28		0.56	9
	Final	0.42	11	12	22	1.68	41	6.75	252.67				
6.67	Initial	0.50	12	13	19	1.68	/	6.40	252.07	0.27		0.54	9.75
	Final	0.37	12	13	21	1.54	12	7.06	251.80				
8	Initial	0.50	11	12	20	1.50	/	6.33	251.24	0.28		0.56	9
	Final	0.37	11	12	22	1.40	6	6.86	250.96				

Tableau 3.5 : L'Influence de la dose de biofloculant D sur Siccité Sc, matières en suspension MES, matières volatiles MVS (i= 150 A.m⁻², T=45min, pH de mélange boue brute/jus de cactus).

Dose D (g/kg MS) Masse (g)	1.33	2.67	4.00	5.33	6.67	8.00
capsule vide (M0)	39.89	39.89	48.17	40.65	39.90	48.18
capsule + gâteau humide (M1)	52.18	52.04	59.28	50.85	52.24	61.72
capsule + gâteau sèche à 105°C (M2)	42.58	42.40	50.76	43.29	42.57	50.84
capsule + gâteau sèche à 550°C (Mf)	41.16	41.07	49.37	41.86	41.16	49.43
Sc (%)	21.88	20.66	23.31	25.88	21.64	19.65
MES (g.L ⁻¹)	26.90	25.10	25.90	26.40	26.70	26.60
MVS (g.L ⁻¹)	52.79	52.99	53.68	54.17	52.81	53.01

Tableau 3.6 : L'Influence de la dose de biofloculant D sur la résistance spécifique à la filtration r et le volume de filtrat

($i= 150 \text{ A.m}^{-2}$, $T=45\text{min}$, pH de mélange boue brute/jus de cactus).

Dose D (g/kg MS)	1.33	2.67	4.00	5.33	6.67	8.00
Temps de filtration t (min)						
	Variation des Volume de filtrat V (mL)					
0	26	22	22	25	10	13
0.17	30	29	26	32	18	20
0.33	34	34	32	37	25	25
0.50	40	38	35	43	29	29
0.67	43	42	38	48	33	33
0.83	46	46	41	53	37	36
1	48	50	44	58	40	39
1.5	54	58	51	67	48	46
2	60	65	56	72	56	52
3	66	73	65	80	65	61
4	70	78	70	82	71	67
5	74	80	74	84	76	70
6	76	82	78	86	79	73
7	78	83	80	87	81	75
8	79	84	82	88	82	77
9	80	84	83	88	83	79
10	81	85	84	89	84	81
11					85	82

Pente a (s.m^{-6})	6.86×10^{10}	3.90×10^{10}	4.59×10^{10}	9.70×10^9	4.26×10^{10}	4.37×10^{10}
r (m.kg^{-1})	9.19×10^{13}	5.61×10^{12}	6.38×10^{12}	1.32×10^{12}	5.75×10^{12}	5.92×10^{12}

Annexe 4

L'Influence du pH

Tableau 4.1 : Conditions opératoires avant conditionnement et après déshydratation pour différents valeur de pH
($i= 100 \text{ A.m}^{-2}$, $T=45\text{min}$, $D =5.33 \text{ g/kg MS}$).

pH	État	Intensité I (A)	Tension U(V)		Température T (°C)	C o n d i t i o n n e m e n t	Turbidité (NTU)		pH	Énergie consommée W (kWh.m ⁻³)
			Générateur	Électrodes						
2	Initial	0.34	0.5	0.5	23		22.34	/	2.00	0.25
	Final	0.28	0.5	0.5	27		27.67	16	1.10	
4	Initial	0.34	2	2	23		7.35	/	4.00	1.02
	Final	0.33	2	2	27		7.79	300	5.51	
6	Initial	0.34	5.5	6.5	18		1.83	/	6.00	3.31
	Final	0.32	5.5	7	22		2.23	140	6.98	
8	Initial	0.34	5	6	18		1.34	/	8.00	3.06
	Final	0.19	5	6.5	22		2.69	10	8.17	
10	Initial	0.34	3	3.5	19		24.4	/	10.00	1.78
	Final	0.18	3	4	24		4.24	8	11.52	
12	Initial	0.34	1	1	18		47.51	/	12.00	0.51
	Final	0.20	1	1	22		6.32	9	12.97	

Tableau 4.2 : L'Influence du pH sur Siccité Sc, matières en suspension MES, matières volatiles MVS
($i= 100 \text{ A.m}^{-2}$, $T=45\text{min}$, $D =5.33 \text{ g/kg MS}$).

Masse (g) pH	2	4	6	8	10	12
capsule vide (M0)	39.90	48.18	40.65	39.90	48.18	40.65
capsule + gâteau humide (M1)	58.41	60.45	52.27	54.14	78.12	74.80
capsule + gâteau sèche à 105°C (M2)	42.82	50.37	43.17	42.44	50.37	42.73
capsule + gâteau sèche à 550°C (Mf)	40.95	48.99	41.83	41.12	49.28	41.73
Sc (%)	15.77	17.84	51.68	17.83	07.31	06.09
MES (g.L ⁻¹)	29.20	21.90	25.20	25.40	21.90	20.80
MVS (g.L ⁻¹)	64.04	63.01	53.17	51.97	49.77	48.08

Tableau 4.3 : L'Influence du pH sur la résistance spécifique à la filtration r et le volume de filtrat ($i= 100 \text{ A.m}^{-2}$, $T=45\text{min}$, $D =5.33 \text{ g/kg MS}$).

Temps de filtration t (min)	pH				Temps de filtration t (min)	pH	
	2	4	6	8		10	12
	Variation des Volumes de filtrat V (mL)					Variation des Volumes de filtrat V (mL)	
0	8	10	12	7	0	5	2
0.17	/	/	20	/	1	9	5
0.33	/	/	26	/	2	11	7
0.50	17	25	30	19	3	13	8
0.67	/	/	34	/	4	14	9
0.83	/	/	38	/	6	15	10
1	23	32	42	24	12	20	14
1.5	26	39	50	29	16	23	16
2	28	45	56	32	20	26	18
2.5	31	49	62	36	24	28	20
3	33	53	67	39	28	30	22
4	38	58	74	44	32	32	24
5	42	65	78	48	40	36	28
6	44	69	80	52	50	40	32
7	47	72	82	56	60	44	36
10	53	78	85	64	70	48	39
13	57	81	86	70	80	51	41
16	60	82		73	90	54	43
19	63			76	100	56	45
22	65			78			
25	67			80			

Pente a (s.m ⁻⁶)	2.04×10^{11}	7.86×10^{10}	2.72×10^{10}	1.78×10^{11}	Pente a (s.m ⁻⁶)	1.94×10^{12}	3.79×10^{12}
r (m.kg ⁻¹)	2.52×10^{13}	1.29×10^{13}	3.89×10^{12}	2.53×10^{13}	r (m.kg ⁻¹)	3.20×10^{14}	6.57×10^{14}

Annexe 5 Calcul de la résistance spécifique à la filtration (exemple)

Les calculs ont été faits par un programme en utilisant logiciel MATLAB.

Étape 1 : porter les différents volumes de filtrat V_x (V_1, V_2, V_3, \dots) correspondant aux temps t_x (t_1, t_2, t_3, \dots) sur le graphe $F(V_x) = t_x / V_x$.

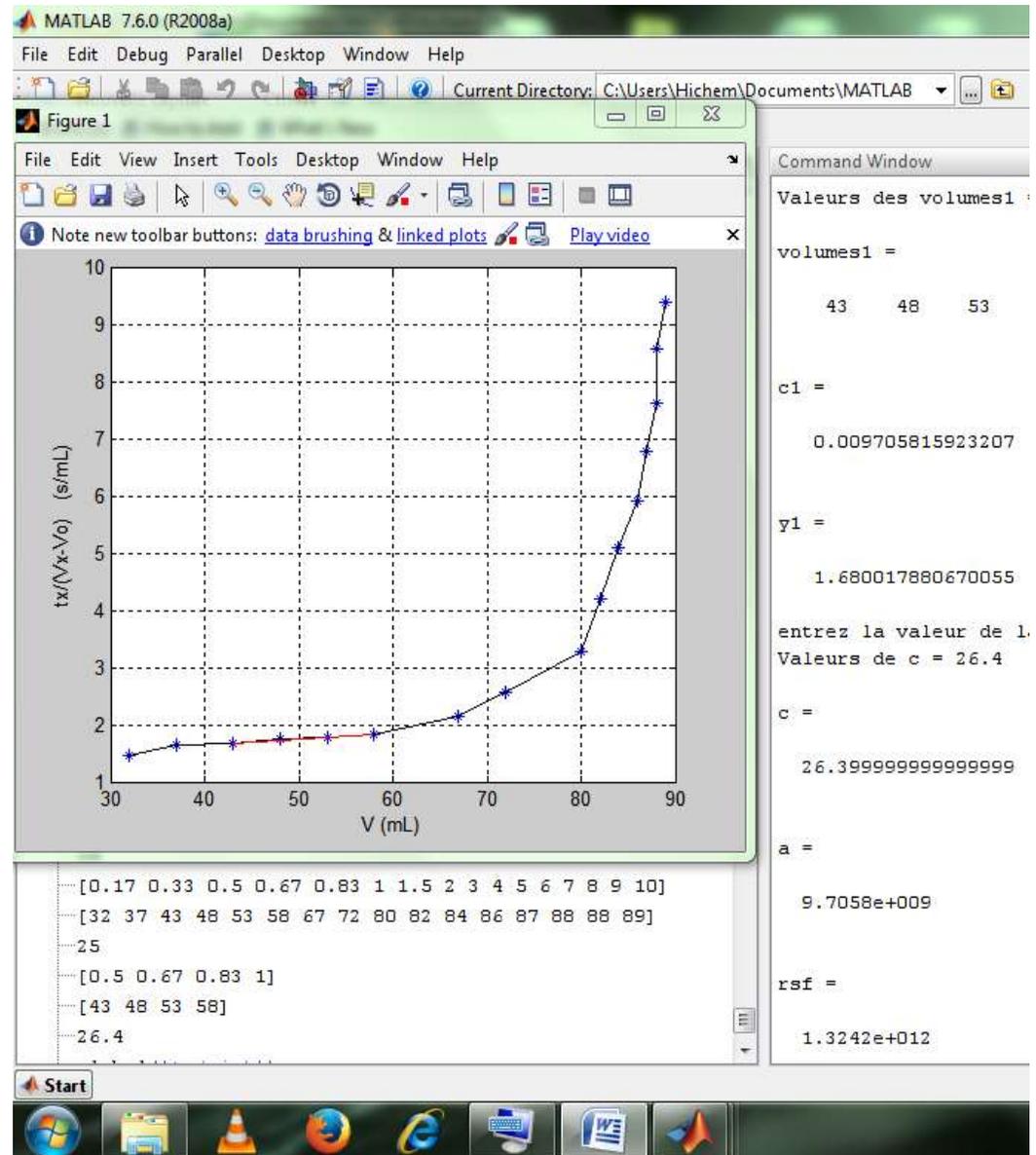
Étape 2 : Tracer la partie linéaire par approximation "méthode des moindres carres".

Étape 3 : calculer la pente 'a' de la partie linéaire de la courbe obtenue.

a : pente de la partie linéaire (s.m ⁶)	9.70×10⁹
P : pression de filtration (pa)	49×10³
S : surface filtrante (m ²)	63.58 ×10⁻⁴
η : viscosité dynamique du filtrat (pa.s)	11×10⁻⁴
C : concentration de la boue (kg.m ⁻³)	26.4
r : résistance spécifique (m.kg ⁻¹)	1.32×10¹²

Étape 4 : calculer $r_{0.5}$ qui est donnée : $r = 2.a.P.S^2 / \eta.C$.

t_x	V_x	$T_x / (V_x - V_0)$
0	25	
0.17	32	
0.33	37	
0.50	43	1.67
0.67	48	1.75
0.83	53	1.78
1	58	1.82
1.5	67	
2	72	
3	80	
4	82	
5	84	
6	86	
7	87	
8	88	
9	88	
10	89	



Annexe 6 : Principaux dispositifs et ouvrages de la STEP de Béni-Messous.

Entrée des eaux usées



Déversoir d'orage



Dégrillage grossier



Dégrillage fin



Dessableur déshuileur



Décanteur primaire



Décanteurs secondaires



Épaisseur



Fosse de dépotage



bassin de stabilisation



filtre à bande



Annexe 7 : Matériel utilisé



Voltmètre



Ampèremètre



Générateur de courant



pH - mètre



Turbidimètre

Conductimètre	Balance analytique	Agitateur magnétique	Four	Etuve
				
Acide Chlorhydrique HCl		Acide Chlorhydrique HCl		Hydroxyde de Sodium NaOH

I.1. Introduction

Les boues sont composées d'éléments recueillis à différents stades de l'épuration d'une eau usée : matières minérales en suspension, matières organiques non biodégradables et microorganismes, ces derniers résultant de l'épuration biologique.

Parmi les boues, on distingue les boues urbaines et les boues industrielles. Les premières sont produites dans les stations d'épuration traitant des effluents dits 'urbains', c'est-à-dire majoritairement des eaux usées d'origine domestique. Les secondes sont issues du traitement d'eaux usées industrielles. Ces eaux sont le plus souvent traitées directement en aval de leur production (Léonard, 2002). Dans ce travail, nous nous préoccupons uniquement de boues urbaines.

I.2. Les eaux usées

I.2.1. Définition d'une eau usée

Les eaux usées sont l'ensemble des eaux ménagères, des eaux industrielles, des eaux de drainages et des eaux-vannes (partie liquide contenue dans les fosses d'aisance, dans les bassins de vidange ...etc) (Moatamri, 2003). Ces eaux usées doivent être traitées avant d'être rejetées dans la nature.

I.2.2. Description d'une station d'épuration classique

Les eaux usées qu'elles soient d'origine domestique ou industrielle, sont collectées par un réseau d'assainissement complexe pour être dirigées et traitées dans une station d'épuration, avant d'être rejetées dans le milieu naturel.

La station rassemble une succession de dispositifs, empruntés tour à tour par les eaux usées. Chaque dispositif est conçu pour extraire au fur et à mesure les différents polluants contenus dans les eaux. La succession des dispositifs est bien entendu calculée en fonction de la nature des eaux usées recueillies sur le réseau et des types de pollutions à traiter.

La Figure I.1 représente schématiquement les opérations rencontrées dans une station d'épuration.

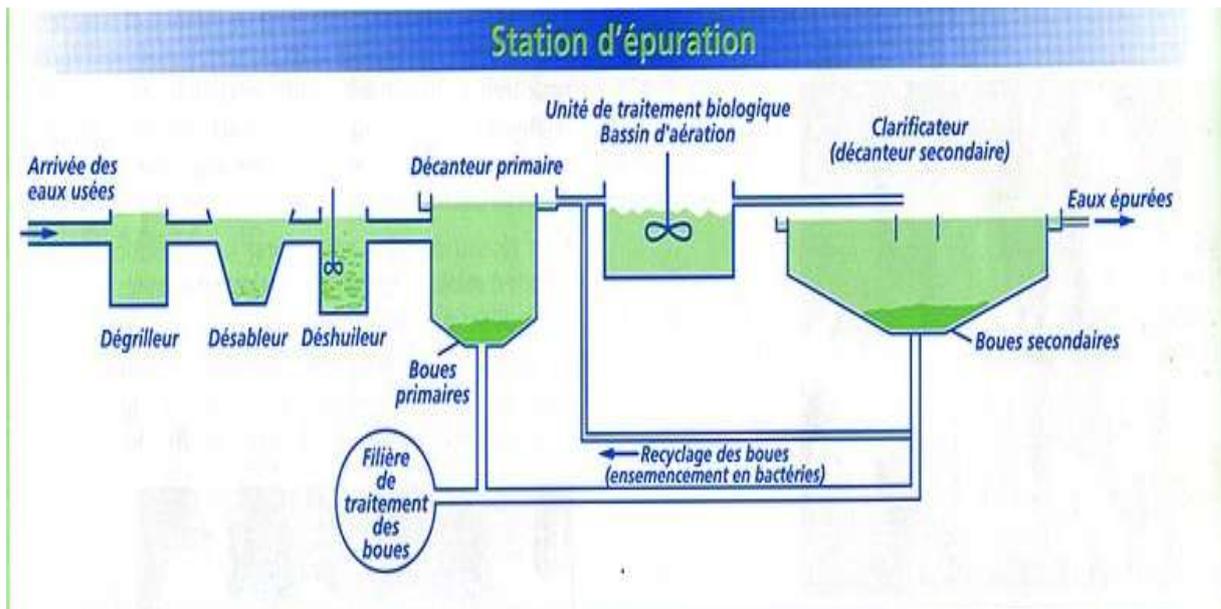


Figure I.1 : Schéma d'une station d'épuration (g).

I.2.2.1. Les prétraitements

Ils sont indispensables dans toutes les stations, quels que soient les processus mis en œuvre en aval.

Le dégrillage consiste à faire passer les eaux usées au travers de grilles à barreaux plus ou moins espacés ou de tamis rotatifs qui retiennent les éléments les plus volumineux (morceaux de bois, plastiques, objets divers, etc) qui seront évacués vers les centres de traitement des ordures ménagères.

Le dessablage et le déshuilage/dégraissage est la seconde opération : elle consiste à éliminer les sables et graisses en faisant passer l'eau à vitesse réduite dans des bassins de sorte que les sables sédimentent et les graisses surnagent ; une partie du sable est recyclé après lavage et les graisses sont incinérées (Guy Atlan, 2002).

I.2.2.2. Le traitement primaire

Après les prétraitements, il reste dans l'eau une charge polluante dissoute et des matières en suspension que ce traitement va permettre d'éliminer en partie. La nature (organique ou minérale), les dimensions (particules grossières non piégées lors des étapes de prétraitements, finement dispersées ou à l'état colloïdal) et la densité de ces particules sont

très variables. Le traitement primaire correspond à une étape gravitaire qui permet d'isoler par décantation les particules décantables (Jarde, 2002).

I.2.2.3. Le traitement secondaire

Ce traitement est biologique et permet de éliminer les polluants dissous. Pour cela on utilise des populations de micro-organismes capables de les consommer. Dans les cas étudiés, le principe général est de favoriser la croissance de communautés de bactéries aérobies, c'est-à-dire qui prélève l'O₂ pour leur métabolisme.

On en distingue différents types :

- a) **Le lagunage naturel** : Les eaux usées sont stockées dans des plans d'eau peu profonds : les lagunes. L'activité microbienne se fait naturellement : échange avec l'atmosphère, photosynthèse..., Des aérateurs peuvent être utilisés pour brasser l'air et optimiser l'activité des bactéries. Ces processus induisent la formation de boues de lagunage au fond des bassins qui sont récupérées.
- b) **Les boues activées** : On force ici le mélange du dioxygène, des eaux usées et des bactéries dans des bassins. Les espèces sont sélectionnées selon ce que l'on souhaite éliminer : carbone, azote, phosphore. Les bactéries et les déchets du métabolisme forment, dans un bassin appelé clarificateur, des boues (boues secondaires) qui sont ensuite traitées et utilisées pour la fertilisation des sols par exemple. Une partie de ces boues retourne dans les bassins pour éviter une trop grande perte en bactéries.
- c) **Les biofiltres et filtres bactériens** : On peut également faire percoler l'eau à travers un matériau où se développent des bactéries. Cela peut être des galets ou des supports (lits bactériens) ou des argiles cuites, des schistes, des sables (biofiltres). Ces traitements sont utilisés en plus du processus des boues activées, permettant d'éliminer une plus grande diversité de polluants. En effet, on va alors concentrer les bactéries et ainsi localiser leur action, la rendant plus efficace (Moulin et al, 2013).

I.2.2.3. Traitement tertiaire

Le traitement tertiaire a pour but d'affiner l'épuration selon les qualités exigées pour l'eau rejetée. Les traitements tertiaires les plus courants sont la nitrification, dénitrification et la déphosphatation. Dans ces deux cas, il s'agit également de procédés biologiques qui

produisent des boues dites tertiaires. Dans certains cas, le traitement tertiaire a lieu au sein du réacteur biologique secondaire (par un séquençage dans le temps) et les boues secondaires et tertiaires sont confondues.

Jusqu'à ces dernières années, la majorité des stations ne comportaient pas de traitement tertiaire. Il est devenu habituel de parler de boues mixtes en référence au mélange des boues primaires et secondaires qui est effectué avant le traitement des boues proprement dit.

I.3. La filière boue

À côté des traitements ciblés sur l'épuration de l'eau, la filière boue reprend les opérations concernant spécifiquement les boues. Au pied du décanteur, les boues contiennent encore une forte proportion d'eau, plus de 95% pour les boues primaires et plus de 99% pour les boues secondaires (Ben-Aïm, 2000). Les différentes étapes du traitement des boues ont pour but leur stabilisation et leur concentration par déshydratation. Ces opérations se situent en amont du séchage et sont importantes car elles déterminent la qualité des boues.

I.3.1. Définition de la boue

Le terme « boues » est le terme générique employé pour caractériser les résidus ou sous-produits issus des procédés de séparation liquide-solide des installations de traitement et d'épuration des eaux usées résiduaires.

Les boues sont composées d'éléments recueillis à différents stades de l'épuration d'une eau usée : matières minérales inertes, d'azote, de phosphore et de matières organiques. Ces boues sont considérées comme un déchet et sont aussi susceptibles de polluer l'environnement. Elles peuvent être urbaines ou industrielles. Les premières sont produites dans les stations d'épuration traitant des effluents dits 'urbains', c'est-à-dire majoritairement des eaux usées d'origine domestique. Les secondes sont issues du traitement d'eaux usées industrielles. Les boues sont classées suivant le système d'où elles sont soutirées. Selon le stade de traitement, on les réfère à des boues primaires, secondaires, tertiaires ou la combinaison des trois, et peuvent être digérées ou non (Emilian, 2004).

I.3.2. Origine et composition des boues d'épuration

Plusieurs types de boues doivent être différenciés en fonction de leur origine, dans la mesure où leur traitement doit être conçu différemment, on distingue :

- a) **Les boues primaire** : Elles sont produites par simple décantation des matières en suspension (MES) contenues dans les eaux usées.
- b) **Les boues biologiques** : Elles sont essentiellement formées par les résidus de bactéries « cultivées » dans les ouvrages d'épuration. Ces bactéries se nourrissent des matières organiques contenues dans les eaux usées et les digèrent.

D'une façon générale, les boues sont composées de particules solides non retenues par les prétraitements. Elles sont essentiellement composées d'eau, de matières organiques non dégradées, de matières minérales dissoutes ou insolubles et d'éléments indésirables tels que les éléments de traces métalliques (ETM) et les composés de traces organiques (CTO) (Ju-Zhen et Li-Ming, 2008).

- c) **Les boues physico-chimiques** : Les boues de traitement physico-chimique, ou boues secondaires, sont issues de l'agglomération des matières organiques particulaires ou colloïdales contenues dans les eaux par l'addition d'un réactif coagulant dont les plus courants sont les acides, les bases et les sulfates d'aluminium ou de fer, les chlorures ferreux ou ferriques, etc. Les boues sont ensuite séparées par décantation. (Ju-Zhen et Li-Ming, 2008).
- d) **Les boues mixtes** : telle est l'appellation du mélange de boues secondaires avec les boues primaires.

Le constituant majeur d'une boue à la sortie d'une station d'épuration est l'eau (94% à 98%). Les boues sont très riches en matières organiques (50 à 70% de la matière sèche). Par tonne de matière sèche, elle contient à peu près autant de MO qu'un fumier.

La décomposition des boues d'épuration libère de grandes quantités d'azote (principalement sous forme de nitrate) et de phosphore.

Les métaux lourds représentent, en moyenne, moins de 0,15 % de la matière sèche. La réglementation évolue avec l'efficacité croissante de la gestion des déchets et les avancées techniques de leur traitement. La concentration maximale autorisée tend ainsi à diminuer au fil des années. La boue à la sortie d'une station est pauvre en potasse.

La nature de la matière organique des boues est très différente de celle du fumier, la quelle est constituée principalement de composés celluloseux et des lignines dérivant de la structure des végétaux.

Dans les boues la partie principale de la matière organique est constitué par des corps microbiens ou des produits d'excrétions de ces derniers (Selhani, 2009).

I.3.3. caractéristiques physicochimique des boues

Les caractéristiques physiques et chimiques essentielles des boues sont définies ainsi :

I.3.3.1. Matière sèche MS et siccité Sc

C'est le paramètre principal de la définition de filière et surtout un des plus faciles à mesurer. La matière sèche (MS) est exprimée en g/L. Rapporté à la masse totale de boue, on l'exprimera en fraction massique Sc qui correspond à la siccité.

Il permet de connaître la quantité de boue à traiter, quel que soit son niveau de concentration dans la filière de traitement (Guibelin, 1999).

I.3.3.2. Matières en suspension (MES)

Les MES rencontrées dans les eaux sont très diverses. Elles peuvent être classées selon leurs origines, nature, et/ou dimension (tableau I.1). Dans une eau de surface, les MES proviennent en grande partie de l'érosion des roches, de la dissolution des minéraux et de la décomposition des matières organiques (Dihang, 2007).

Tableau I.1 : Classement des MES selon la taille (Valentin, 2000)

Matières en suspensions (dispersions grossières)	Supérieures à 1µm	Supérieures à 10 ⁹ atomes
Matières colloïdales (dispersions colloïdales)	10 ⁻³ - 1 µm	10 ³ - 10 ⁹ atomes
Matières dissoutes (dispersions moléculaires)	Inférieures à 10 ⁻³ µm	Inférieures à 10 ³ atomes

I.3.3.3. Matières volatiles en suspension

C'est la quantité de matières organiques contenues dans les matières en suspension, en première approximation on considère que MV=MO (Navas et al, 1992).

I.3.3.4. La consistance des boues

C'est une donnée obligatoire à connaître pour toutes manipulations des boues. La consistance est un état physique dépendant de la siccité.

- boues liquides : siccité de 0 à 10%.
- Boues pâteuses : siccité de 10 à 25%.
- Boues solides : siccité de 25 à 85 %.
- Boues sèches : siccité supérieure à 85% (degrémont, 2005).

I.3.3.5. Paramètres d'appréciation de la pollution organique

Les matières organiques nécessitent de l'oxygène pour leur métabolisation par les micro-organismes. Cette demande en oxygène peut être représentée biologiquement ou chimiquement, suivant divers paramètres tels que la DBO (demande biochimique en oxygène), la DCO (demande chimique en oxygène).

❖ La demande chimique en oxygène (DCO)

La demande chimique en oxygène traduit la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder chimiquement les matières organiques et minérales contenues dans l'effluent. La mesure de la DCO se fait à l'aide d'un oxydant énergétique comme le bichromate de potassium, en milieu acide, et à chaud pendant deux heures. On estime que cette oxydation détruit à 90-95 % des composés (Gaid, 1985).

❖ La demande biochimique en oxygène (DBO₅)

La demande biochimique en oxygène est, par définition, la quantité d'oxygène nécessaire aux micro-organismes vivants pour assurer l'oxydation et la stabilisation des matières organiques présentes dans l'eau usée. Par convention, la DBO est la valeur obtenue après cinq jours d'incubation, DBO₅ (Eckenfelder, 1982).

I.3.3.6. Résistance spécifique à la filtration r

C'est un critère fiable de dimensionnement d'un filtre presse, et étudier l'aptitude à la déshydratation (Guibelin, 1999).

I.3.4. Traitement des boues

La figure I.2 résume le principe général d'une filière boue, avec toutes les étapes possibles.

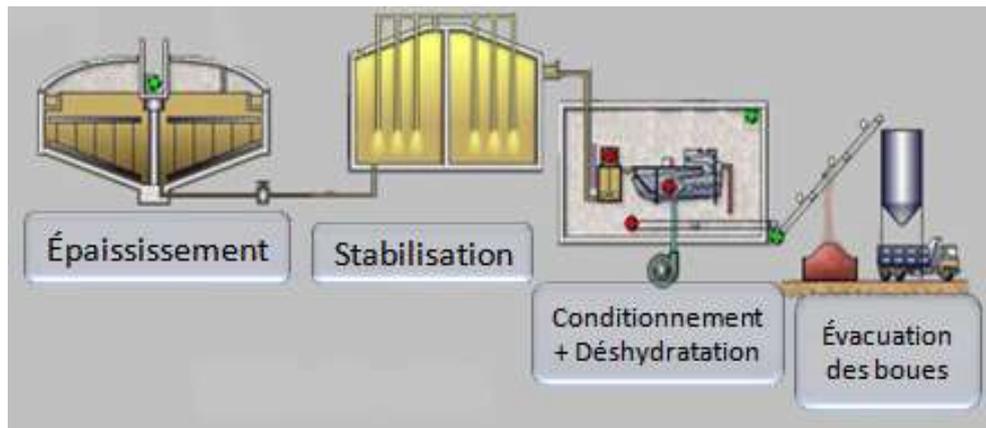


Figure I.2 : le principe général de traitement d'une filière boue (h).

I.3.4.1. L'épaississement

L'épaississement est la première étape du traitement par concentration, il réduit le volume à transférer sur la filière et permet d'obtenir une boue dont la concentration varie de 15 à 100 g/l. elle peut être donc pompée. L'épaississement peut être statique ou dynamique (Baes et Mesmer, 1976).

a) L'épaississement statique gravitaire

Il s'effectue par décantation dans une cuve cylindrique à fond conique, sous la seule action de la pesanteur, la boue épaissie est évacuée par le bas.

b) L'épaississement dynamique

Il est réalisé sous l'action de forces mécaniques, et s'effectue selon différentes méthodes :

❖ Par flottation :

De fines bulles d'air permettent à la boue de remonter en surface, par captation. Ce procédé est principalement réservé aux boues biologiques de faible densité.

❖ Par égouttage : la boue floculée est épaissie par égouttage sur une toile filtrante.

❖ Par centrifugation : la boue floculée est épaissie sous l'effet de la force centrifuge.

I.3.4.2. La Stabilisation

La stabilisation consiste à réduire la quantité de matières organiques pour limiter les risques de fermentation et donc d'odeurs nauséabondes. Une stabilisation n'est évidemment mise en œuvre que sur des boues dont la teneur en matières rapidement biodégradables est importante (Degrémont, 1989).

Les traitements de stabilisation utilisés sont de type biologique, chimique. Ils s'appliquent aux boues mixtes fraîches, aux boues secondaires ou à l'ensemble des boues.

a) **Stabilisation biologique** La stabilisation biologique se fait soit par :

❖ **Digestion anaérobie**

Est une fermentation bactérienne réalisée dans une cuve appelée digesteur. Les bactéries dégradent la matière organique en dioxyde de carbone et en méthane. Cette technique s'applique aux boues épaissies et a pour objectif la réduction de la masse de boue en dégradant une partie des matières volatiles (MVS) et donc matières sèches (MS) (Perez, 2009).

❖ **Digestion aérobie**

La stabilisation aérobie s'effectue dans des bassins aérés. L'aération est assurée par des aérateurs de surface ou par insufflation d'air, et elle permet de maintenir une concentration d'oxygène dissout d'au moins 2 mg.L^{-1} .

Au cours de la digestion aérobie, les bactéries aérobies impliquées dans le processus se multiplient en métabolisant la matière organique soluble en dioxyde de carbone (CO_2) et en eau (H_2O) (Bureau, 2004).

b) **Stabilisation chimique**

Elle est obtenue par adjonction massive de chaux aux boues. L'élévation de pH a pour effet de bloquer les fermentations et d'éviter ainsi le dégagement de mauvaises odeurs. On procède généralement à l'adjonction de chaux éteinte (sous forme de lait de chaux) soit en amont d'un épaisseur de boues pour y stopper les fermentations, soit sur les boues liquides épaissies avant valorisation agricole. Même avec des fortes doses de chaux allant jusqu'à 30 % en masse de la matière sèche, il ne s'agit en réalité que d'une stabilisation temporaire, qui n'autorise pas un stockage de longue durée (Degrémont, 1989).

1.3.4.3. Conditionnement et déshydratation des boues

L'étape de déshydratation mécanique permet de donner une consistance plus solide à la boue en atteignant des siccités variant de 15 à 40 % (Léonard, 2002). Telle quelle, la boue peut être difficilement déshydratée (et parfois épaissie) et doit être conditionnée, Le conditionnement des boues est la disposition d'une énergie ou un produit de floculation afin de casse la stabilité colloïdale et augmente artificiellement la taille des particules. (voir chapitre II pour plus de détail).

I.3.4.4. Séchage

Après déshydratation, le gâteau récupéré contient encore une fraction importante d'eau (Matière sèche de 10 à 70 %).

Le séchage peut être nécessaire soit pour faciliter l'incinération ultérieure de la boue soit pour faciliter sa valorisation agricole sous forme sèche. On peut atteindre des siccités de 90 %. Dans le sécheur rotatif (comme les fours de cimenterie). Les boues sont mises en contact direct avec des gaz chauds de combustion. Le contact direct est aussi possible dans un lit fluidisé. Le séchage s'effectue aussi par contact indirect entre la boue et des parois chaudes (Grandjean, 2010).

I.3.5. Élimination finale des boues

Les trois destinations finales des boues de STEP sont :

- ❖ Valorisation agricole.
- ❖ Incinération.
- ❖ Mise en décharge.

I.3.5.1. Valorisation agricole

La valorisation agricole De par leurs teneurs en éléments minéraux et organiques, les boues peuvent être utilisées comme substituts d'engrais en agriculture. Il s'agit de distinguer la valeur humique des boues de leur valeur fertilisante. La première est représentée par le taux de matières organiques ne subissant pas de minéralisation, la seconde par l'apport en azote, phosphore, potassium, calcium, magnésium et certains oligo-éléments. Le rapport C/N définit le potentiel de minéralisation. Plus celui-ci est faible, plus la minéralisation est rapide.

I.3.5.2. Incinération

L'incinération des boues doit permettre l'oxydation complète de leur fraction organique, à 800-900°C, en atmosphère oxydante (excès d'air). Différentes mises en œuvre sont possibles.

a) **Incinération dans un four spécifique**

Cette solution est adoptée par des stations qui produisent de grandes quantités de boue mais peut aussi être le résultat d'une association de plusieurs stations d'épuration qui valorisent leurs boues conjointement.

b) **Co-incinération avec ordures ménagères**

Cette option est envisagée lorsque le volume de boue ne justifie pas la construction d'un four et qu'un incinérateur ménager est situé à proximité.

La capacité thermique du four doit être telle qu'elle permet l'introduction de boues. La boue sous forme pâteuse (15 à 30% MS) est plutôt considérée comme un fluide de refroidissement alors qu'une boue de teneur en matières sèches supérieure à 60% possède un pouvoir calorifique inférieur proche des ordures et fait office de combustible (Léonard, 2002).

I.3.5.3. Mise en décharge

La destination finale la plus fréquente des boues est actuellement la décharge des ordures ménagères ou spéciales.

La mise en décharge des boues s'accompagne de phénomènes complexes relevant des interactions entre les constituants des boues. En effet, ce mode d'élimination entraîne des risques de lixiviation par les eaux de ruissellement (satin et selmi, 1999).

I.3. Conclusion

Dans ce chapitre, on a vu les différentes étapes d'épuration pour les deux filières Eaux usées- boues, ainsi que l'origine et la composition des boues. D'après cette étude bibliographique on constate l'existence de diverses méthodes de traitement des boues, mais leur application dépend à la fois des caractéristiques à traiter et du degré d'épuration désiré.

À la fin du chapitre, on a évoqué la destination finale des boues, on peut conclure que la

mise en décharge est une mauvaise solution pour l'élimination des boues de STEP. Dans la mesure du possible, on lui préférera la valorisation, ou à défaut l'incinération.

II.1. Introduction

Les volumes importants occasionnés par les boues ont conduit les traiteurs à tenter dans une première phase, à réduire ces volumes. Il s'agit de choisir un mode de traitement qui, sans nuisance supplémentaire, atteigne: l'objectif de réduction des volumes de boues.

En vue d'améliorer la déshydratation, il faut procéder à la floculation de la boue pour casser la stabilité colloïdale et augmenter artificiellement la taille des particules. Pour cela, les boues sont généralement conditionnées par plusieurs méthodes.

II.2. Conditionnement des boues

On regroupe sous le terme conditionnement, les différentes opérations permettant la floculation de la boue pour faciliter le drainage, la filtration ou la centrifugation, ce qui optimise la déshydratation.

Le conditionnement des boues est obtenu par l'application de plusieurs principes physique chimique et thermique (Satin et Selmi, 1999).

II.2.1. Conditionnement chimique

Le conditionnement chimique utilise des réactifs minéraux (électrolytes minéraux à Polycations) ou organiques (polymères) dont l'ajout de manière contrôlée (dosage et mélange) provoque la coagulation et/ou la floculation de la suspension. Il en résulte une agglomération des particules sous la forme d'un réseau tridimensionnel : les floccs. La structure de ces floccs dépend fortement du type de réactif utilisé. Les réactifs minéraux (sels de fer, sels d'aluminium, chaux,...) donnent des floccs relativement fins et stables. Ce type de flocc est adapté pour la filtration sous forte pression et sous vide, qui emploient une toile au maillage fin. Les polymères organiques quant à eux conduisent à des floccs volumineux (plusieurs millimètres), plus fragiles, et adaptés pour la centrifugation ou la filtration sur filtre à bandes dont les mailles sont larges. L'usage de ces polyélectrolytes de synthèse se généralise même pour la filtration sous pression (Lotito et al, 1990).

II.2.1.1. Réactifs minéraux

Ils sont mieux adaptés si l'on veut procéder à une déshydratation par filtres-presses ou filtres sous vide possédant des mailles fins généralement inférieures à 100-200 μm . Ces réactifs minéraux conduisent, en effet, à la formation de floccs fins mais mécaniquement stables.

Pour des raisons d'économie et d'efficacité, on emploie le plus souvent des sels métalliques tels que les sels de fer et, à un degré moindre, les sels d'aluminium. Sur les boues organiques, l'ion Fe^{3+} est de loin le plus efficace et le plus utilisé. Le choix entre $FeCl_3$ et $FeSO_4Cl$ est généralement d'ordre économique. L'action de ces électrolytes est double :

- **action coagulante** : leur charge est souvent opposée à celle des particules boueuses,
- **action floculante** : formation d'hydroxydes complexes hydratés qui jouent le rôle d'un polymère minéral (Degrémont, 1989).

II.2.1.2. Polyélectrolytes

Les polyélectrolytes commercialisés se présentent sous forme liquide, solide, émulsions ou sous forme des microbilles. Leur utilisation nécessite une étape de dilution très importante afin de favoriser le mélange au moment de l'injection dans la boue. Les poudres ont un prix inférieur aux liquides mais demandent une unité de préparation plus onéreuse. Le coût des réactifs pour le conditionnement d'une tonne de matières sèches se situe respectivement entre 24 et 39 €, et entre 18 et 23 € selon que le réactif est minéral ou de type polymère de synthèse. (Léonard, 2002).

Il y a le choix entre plusieurs types de polyélectrolytes :

- Les polyélectrolytes cationiques** : sont surtout efficaces pour le conditionnement de boues à teneur élevée en matières organiques colloïdales ou à teneur élevée en fibres cellulosiques. Les doses utilisées sont de l'ordre de 1 à 10 kg/tonne de matières en suspension.
- Les polyélectrolytes anioniques** : trouvent une large application dans les suspensions boueuses à caractères minéral prépondérant (boues denses hydrophobes, boues d'hydroxydes métalliques) (Degrémont, 1989).

II.2.2. Conditionnement thermique

La boue est portée à des températures de 150 à 200 °C pendant 30 à 60 minutes afin de détruire ses caractéristiques colloïdales, et augmenter sa densité de particules. Conjointement cependant, on peut assister à la solubilisation de certaines matières en suspension ainsi qu'à la précipitation d'autres matières solubles.

Les avantages de ce procédé nécessitant un fort investissement sont :

- Versatilité d'application sur tous les types de boues.
- Stabilité des performances (réglage du temps et de la température de cuisson).
- Filtration sans apport de réactifs, gâteaux de filtration avec une bonne siccité (50% en matière sèche) (Guibelin, 1999).

II.2.3. Conditionnement électrochimique

Les traitements électrochimiques constituent de nouvelles méthodes de traitement des boues d'épuration visant d'une part à réduire la quantité de réactifs (diminution du volume de boues générées) et d'autre part à réduire le volume des équipements (diminution du temps de rétention dans le réacteur). Plusieurs processus physiques et chimiques peuvent simultanément intervenir lors du traitement électrolytique.

On a recours à cette technique pour obtenir la déstabilisation et l'agrégation des particules colloïdes ; en produisant des ions métalliques par dissolution d'une anode de fer ou d'aluminium ; les ions interviennent comme ceux apportés dans la floculation chimique par les sels métalliques (chlorure ferrique ou sulfate d'aluminium).

En revanche d'après la littérature très peu de procédés électrochimiques ont été développés à l'échelle industrielle pour le traitement des boues issues des stations d'épuration des eaux usées urbaines ou industrielles (Bureau, 2004). Edeline en 1985 a présenté un électrocoagulateur industriel, que nous présentons sur la figure II.1.

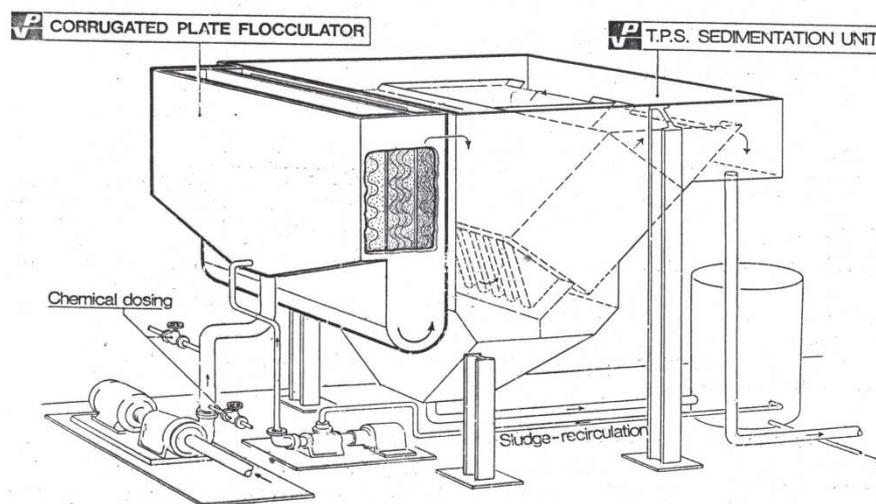


Figure II.1 : Flocculateur à plaques ondulées (électrocoagulation) (Edeline, 1985).

II.3. Déshydratation des boues

C'est une étape majeure de la filière de traitement, elle consiste à une élimination plus ou moins poussée de leur humidité résiduelle de façon à les amener à l'état solide ou tout au moins « pelletable » (siccité minimale de 18 à 20 % en masse MS en fonction de la nature et des caractéristiques physico-chimique de la boue).

On peut avoir recours pour cela à :

- ❖ Une déshydratation naturelle.
- ❖ Une déshydratation mécanique relevant de deux principes, la filtration et la centrifugation. (Eckenfelder, 1982).

II.3.1. déshydratation naturelle

C'est la technique des lits de séchage, se pratique à l'air libre sur des boues liquides et combine l'évaporation naturelle et le drainage de l'eau libre à travers une couche filtrante de sable ou de graviers. Ce système extensif donne des boues solides à 35 – 40 % de siccité mais reste fort dépendant des conditions météorologiques (Treybal, 1981).

II.3.2. déshydratation mécanique

On distingue deux modes de déshydratation mécanique:

II.3.2.1. La centrifugation

La centrifugation sépare l'eau de la boue sous l'effet d'une accélération de plusieurs milliers de g. Les centrifugeuses (figure II.2) sont constituées d'un bol tournant à grande vitesse et d'une vis racleuse hélicoïdale coaxiale au bol qui permet l'extraction des boues déshydratées en continu. L'alimentation peut être centrale ou tangentielle. La circulation de la suspension et de la boue déshydratée peut s'effectuer à co-courant ou contrecourant.

D'autres variables de type constructif (géométrie du bol, rapport longueur/diamètre, angle de conicité,...) peuvent également distinguer les différentes machines commercialisées. Le diamètre du bol se situe généralement entre 0.3 et 1 m (Léonard, 2002).

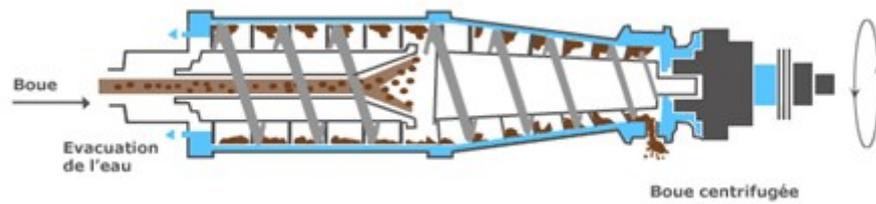


Figure II.2 : Centrifugeuse (b).

Les avantages et inconvénients de la technique sont repris dans le tableau II.1.

Tableau II.1 : Avantages et inconvénients de la centrifugation (Leonard, 2002)

AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
<ul style="list-style-type: none"> - Technique bien adaptée aux boues difficiles à traiter (boues huileuses). - Compacité de l'équipement. - Coût d'investissement compétitif par rapport à la filtration. - Permet de travailler en milieu confiné, sans odeur. 	<ul style="list-style-type: none"> - Faible consistance de la boue déshydratée. - Nécessité de dessabler pour éviter l'usure de la vis d'extraction. - Frais d'exploitation supérieurs à ceux d'un filtre à bandes ou filtre-presse.

II.3.2.2. La filtration

La filtration peut être menée sous vide ou sous pression :

a) Filtration sous vide

La filtration sous vide est une des méthodes les plus courantes de déshydratation des boues d'eaux résiduaires. La filtration sous vide déshydrate une suspension par application du vide à travers un milieu poreux qui retient les matières solides mais permet au liquide de le traverser. Les médiateurs utilisés sont des tissus, des tamis métalliques ou des ressorts à boudins très serrés. Dans l'opération de filtration sous vide, un tambour rotatif (figure II.3) plonge dans la cuve contenant la suspension et les matières solides sont retenues à la surface du tambour sous application du vide.

L'immersion du tambour peut varier de 12 à 60 %. Tandis que le tambour tourne dans la suspension, un gâteau se constitue sur la partie immergée et l'eau est éliminée par filtration à

travers les matières déposées et le medium filtrant. Le temps pendant lequel le tambour reste immergé dans la suspension est le temps de formation. Lorsque le tambour émerge, le gâteau déposé est encore desséché par transfert de liquide dans l'air qui traverse le gâteau par suite de l'application du vide. Cette phase est appelée temps de séchage (Degrémont, 1989).



Figure II.3 : Filtres à tambour sous vide (c).

Le tableau (II.2) résume les avantages et les inconvénients d'une telle filtration.

Tableau II.2 : Avantages et inconvénients de la filtration sous vide (Léonard, 2002)

AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
<ul style="list-style-type: none"> - Fonctionnement parfaitement maîtrisé. - Souplesse de fonctionnement. 	<ul style="list-style-type: none"> - Encombrement important. - Frais d'exploitation élevée. - Productivité moyenne.

b) Filtration sous pression

Il existe deux techniques :

❖ Filtre-presse

La filtration peut s'effectuer sur filtre-presse (figure II.4). Il est important de se rappeler qu'un bon conditionnement est un prérequis au fonctionnement efficace des filtres. Pour les filtre presse une forte surpression d'environ 5 – 15 bars est appliquée (Grandjean, 2010).



Figure II.4 : Filtres-presses (e).

Les avantages et inconvénients de la technique sont repris dans le tableau II.3.

Tableau II.3 : Avantages et inconvénients des filtres-presses (Léonard, 2002)

AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
<ul style="list-style-type: none"> - Siccité élevée. - Solidité. - Grande fiabilité. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fonctionnement discontinu. - Main d'œuvre importante (sauf pour les versions modernes).

❖ **Filtre à bande**

Dans les filtres 'à bandes', la suspension floculée est injectée directement sur la toile filtrante. Une période d'égouttage gravitaire précède généralement l'étape de compression puis de cisaillement de la boue. La pression est exercée par des rouleaux, soit directement, soit par l'intermédiaire d'une bande presseuse. Le procédé peut être mené à basse (400 kPa), moyenne (500 kPa) ou haute pression (700 kPa). Les filtres à basse et moyenne pression sont le plus couramment utilisés, particulièrement dans les petites et moyennes stations qui valorisent les boues en agriculture.

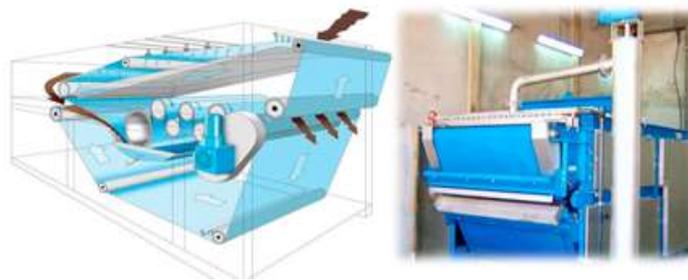


Figure II.5 : Filtres à bandes (f).

Les avantages et inconvénients de la technique sont repris dans le tableau II.4.

Tableau II.4 : Avantages et inconvénients des filtres à bandes presseuses (Léonard, 2002)

AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
<ul style="list-style-type: none"> - Robustesse, simplicité de construction et de conduite des appareillages. - Procédé continu. - Frais d'exploitation très faibles. 	<ul style="list-style-type: none"> - Grande consommation d'eau propre pour le lavage des toiles. - Coût d'investissements élevé pour les filtres les plus performants. - Siccités plus faibles que pour le filtre- presse.

II.4. Conclusion

Le conditionnement est la principale étape qui introduit la boue à la déshydratation, donc un conditionnement adéquat de la boue est la base du bon fonctionnement de la déshydratation. Les divers types de conditionnement des boues qu'on vient de voir nous expliquent la largeur de la gamme de leurs utilisations et leurs spécificités.

La déshydratation de la boue facilite son transport, son épandage et ses traitements.

III.1. Introduction

Le développement de l'électricité comme nouvelle source d'énergie, l'aspect non polluant et les facilités d'automatisation qu'elle apporte ont permis ces dernières années, un développement important des techniques électrochimiques dans le domaine du traitement des eaux. (Bureau, 2004).

III.2. Historique du procédé d'électrocoagulation

Le premier document rapportant l'utilisation de l'EC pour le traitement des effluents est un brevet américain déposé en 1880 par Webster (Picard, 2000) qui utilisait des électrodes en fer. La même année, une station d'épuration fut construite sur la base de ce brevet, à Salford (Grande-Bretagne) pour traiter les eaux polluées urbaines. En 1909, Harries dépose un nouveau brevet sur ce procédé : les anodes étaient alors constituées par des plaques de fer et d'aluminium. En 1912, deux autres stations de traitements des eaux usées furent construites sur ce principe, aux Etats-Unis. Cependant, leur fonctionnement fut stoppé, quelques années plus tard (1930), en raison du coût qui étaient deux fois plus élevé que celui d'un traitement classique (Mollah et al, 2001). Le tableau III.1 présente quelques études d'électrocoagulation:

Tableau III.1 : Historique des applications du procédé d'électrocoagulation

Date	Auteurs	Types d'électrodes	Applications
1909	Harries	Al et Fe et sel cuivre	Eaux usées urbaines
1947	Bonilla	Al	
1956	Holden	Al	Eau de surface
1970	Sadek	Al et Fe	Eau riche en phosphates
1984	Vik et al.	Al	Eau très chargée en substances humique
1985	Pazenko et al		Emulsions d'huiles
1988	Renk	Al et Fe	Eau riche en sable bitumeux pétrolifères
1989	Ryan et al		Suspension d'argile
1992	Shen et al		Eau de teinture et d'impression
1996	Lin et al		Effluents des industries
2000	Chen et al	Al	Rejets liquides des industries de la restauration
2002	Abuzaid et al		Eau riche en dérivés de nitrates

			Al
2003	Shen et al		Eau industrielle chargée en fluors
2005	Khemis et al		Emulsions d'huiles industrielles
2007	Essadki et al		Rejets de textiles et eaux indutrielles chargées en fluors
2007	Asselin		Eaux usées industrielles
2009	Zongo	Fe et Al	Deux effluents textiles et un effluent simulé de tannerie

III.3. Définition de l'électrocoagulation

L'électrocoagulation est une technique électrochimique dérivée de la coagulation floculation, est une méthode de traitement des eaux basée sur la dissolution d'un métal sacrificiel (généralement l'aluminium ou le fer) qui, une fois dans l'effluent et moyennant les autres réactions connexes telle que l'électrolyse de l'eau, donne des complexes d'hydroxydes métalliques qui vont assurer l'adsorption puis la floculation des particules et des composés polluants dissous (Zongo, 2009), La figure III-1 présente le principe du procédé.

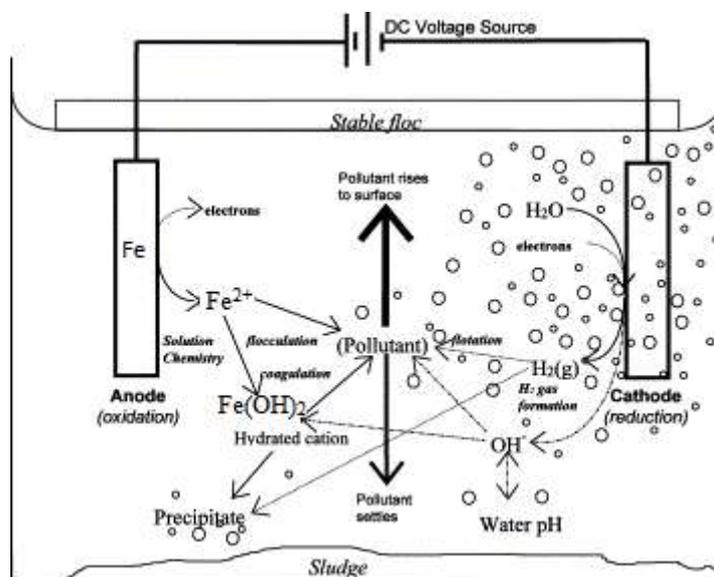


Figure III.1 : Schéma du principe de l'électrocoagulation (a).

Au cours du traitement, plusieurs processus électrochimiques, physicochimiques et chimiques peuvent être observés (Bureau, 2004) :

- l'électrophorèse (déplacement de particules chargées sous l'effet du champ électrique).
- la réduction cathodique et chimique des composés organiques et inorganiques ainsi que la formation de dépôts métalliques à la cathode.
- les interactions chimiques entre les ions Fe^{2+} (ou Al^{3+}) générés par dissolution anodique, et les anions présents dans les eaux usées (sulfures, phosphates, etc.), lesquelles entraînent la formation de composés insolubles.
- la flottation de particules solides et d'impuretés dissoutes dues à la présence de bulles de gaz d'hydrogène (H_2) générées à la cathode et de gaz d'oxygène (O_2) générées à l'anode
- l'adsorption des polluants à la surface des hydroxydes ferreux (ou des hydroxydes d'aluminium), lesquels possèdent une forte capacité d'adsorption.

Remarque

Il est important de noter que la coagulation décrit le phénomène de déstabilisation des particules présentes dans la solution, tandis que la floculation est l'agglomération de ces particule (Asselin, 2007).

III.4. Types d'électrodes

Deux types d'électrodes peuvent être utilisés dans le traitement des eaux par l'électrocoagulation, des électrodes de fer et d'aluminium. Dans les deux cas, les matériaux utilisés peuvent être de qualité secondaire, ce qui diminue les coûts d'achat d'équipement. Ces matériaux sont choisis parce qu'ils permettent la production importante d'hydroxyde lors de l'imposition du courant, ce qui favorise la coagulation. L'anode soluble est donc composé d'un métal qui se dissout facilement sous le passage du courant, comme c'est le cas du fer (Asselin, 2007).

III.5. Mécanisme du procédé

L'électrocoagulation se caractérise par une génération d'ions métalliques (Fe^{2+} ou Al^{3+}) due à l'oxydation de l'anode (équations 1 et 5). Les ions métalliques réagissent à leur tour avec les ions hydroxyles (OH^-) produits à la cathode avec un dégagement d'hydrogène (H_2) (équations 3 et 7). Les matières en suspension interagissent avec les bulles de gaz pour former des floccs qui seront ensuite concentrés, collectés et éliminés. Ce processus contribue aussi à une

coagulation par neutralisation des particules colloïdales chargées négativement. À titre d'exemple, l'oxydation du fer dans le système électrolytique produit l'hydroxyde de fer ($\text{Fe}(\text{OH})_n$) où n est égal à 2 ou à 3 (équations 2 et 6). Deux mécanismes ont été proposés pour expliquer la formation de $\text{Fe}(\text{OH})_n$ (Mollah et al, 2001) :

- **Premier mécanisme :**

Anode



Cathode

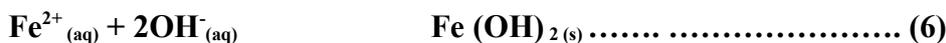
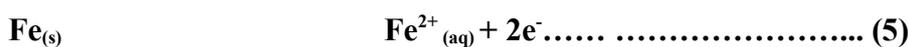


Global

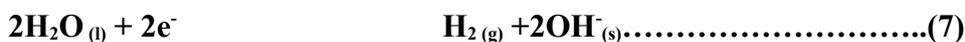


- **Deuxieme mécanisme:**

Anode



Cathode



Global

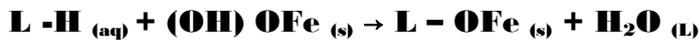


L'hydrogène produit par la réaction participe donc à la flottation des floes et favorise l'élimination des matières en suspension ainsi que l'élimination des composés organiques dissous adsorbés partiellement sur les floes.

Le $\text{Fe}(\text{OH})_n$ (s) reste dans la solution aqueuse comme une suspension gélatineuse, qui peut éliminer les polluants de l'eau usée (Ibanez et al, 1998), soit par :

- **Complexations de surface:**

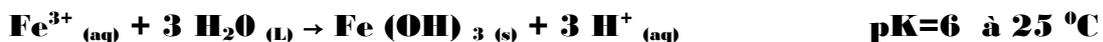
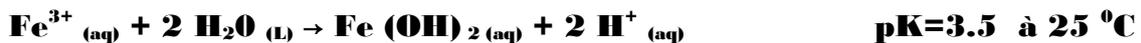
Le polluant est comme un ligand (L) qui se fixe chimiquement à l'hydroxyde de fer :



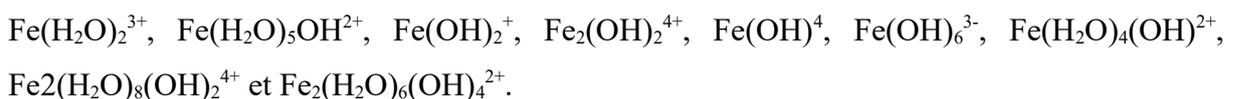
- **Attraction électrostatique:**

Les particules d'oxyde de fer hydratées possèdent des zones chargées positivement et négativement, qui vont attirer les zones opposées des polluants, et les éliminer de la solution par décantation.

Les ions Fe^{3+} subiront une hydratation, la forme du modèle dépendra du pH. En milieu acide, les réactions suivantes ont été proposées (Aoudjhane et al, 2010).



D'autres formes hydratées de l'ion Fe^{3+} , dépendant du pH, ont été suggérées :



III.6. Paramètres influençant l'électrocoagulation

Plusieurs paramètres opérationnels tels que la densité de courant, le temps d'électrolyse, le pH, type (nature) d'électrode influencent le processus d'électrocoagulations.

III.6.1. Densité de courant

La densité de courant i est le courant délivré à l'électrode divisé par l'aire active de l'électrode. Elle est considérée comme un paramètre critique dans l'électrocoagulation. Elle détermine à la fois la vitesse de la dissolution métallique électrochimique dans l'eau et la densité de production électrolytique des bulles. Les densités de courant élevées sont désirables pour le processus de séparation impliquant des cellules de flottation ou de larges bacs de

lavage, alors que les densités de courant faibles sont convenables pour les électrocoagulateurs qui sont intégrés avec des filtres de charbon et de sable conventionnels (Holt et al, 1999).

III.6.2. Temps d'électrolyse

Afin de limiter les pertes inutiles en chaleur et la production exagérée de boues métallique, il est important de faire une étude cinétique pour imposer le courant électrique le moins longtemps possible (Asselin, 2007).

III.6.3. pH

Le pH de la solution détermine la spécification des ions métalliques. Le pH influence l'état des espèces en solution et la solubilité des produits formes. Ainsi le pH de la solution affecte le rendement global et l'efficacité de l'électrocoagulation. Le pH de la solution peut être aisément change. Un pH optimal semble exister pour un polluant donne, par exemple une valeur de pH optimum égal à 7 pour les eaux usées de restaurant (Xinhua, 2004).

Les diagrammes de Pourbaix, aussi appelés diagrammes potentiel-[pH] (ou E,pH), furent initialement développés par Marcel Pourbaix en 1938. Ils indiquent sur un plan E-pH les domaines d'existence ou de prédominance d'un élément (**k**).

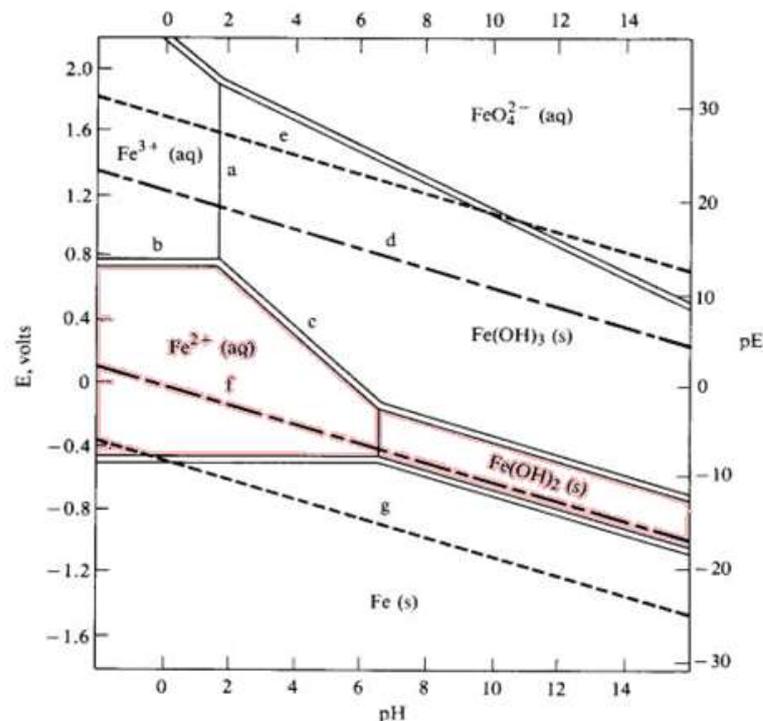


Figure III.2 : Diagramme de Pourbaix du fer (j).

Les échelles E, pE sont destinées à représenter la concentration de l'agent réducteur norme, les valeurs pE sont obtenues à partir des potentiels de réduction en divisant E par 0,059 (j).

III.6.4. Conductivité

La conductivité de l'électrolyte a aussi un impact sur le procédé; si elle est trop faible, la résistance de l'eau au passage de courant est forte, la consommation énergétique est très importante ; et sa température peut alors fortement augmenter.

L'ajout d'ions chlorure permet d'éviter la passivation des électrodes. Le problème de la conductivité constitue un inconvénient majeur au fonctionnement d'un procédé d'EC (Holt et al, 2002).

III.6.5. Nature des électrodes

Les électrodes constituent la partie la plus importante, et sont considérées comme le cœur de l'unité d'électrocoagulations. La nature des électrodes, et en particulier celle des anodes, joue un rôle primordial sur l'efficacité et le rendement du procédé. Le matériau d'électrode détermine le cation introduit en solution. En effet, les plaques d'aluminium ou de fer sont les électrodes les plus utilisés en raison de leur bas coût, disponibilité et efficacité prouvée (Holt et al, 1999).

III.6.6. Température

L'efficacité du traitement par oxydation électrochimique des eaux contaminées dépend aussi de la température du milieu (Trong, 1999). En général, la vitesse de la réaction chimique et ou, électrochimique augmente avec l'accroissement de la température du milieu. Cependant, le traitement à des températures élevées diminuera la vie des électrodes. En effet la plupart des anodes en métaux ne peuvent pas résister aux attaques des oxydants abondamment générés (Demim, 2007).

III.6.7. Autres facteurs influençant l'électrocoagulation

Plusieurs autres facteurs peuvent influencer l'électrocoagulation comme :

- La distance entre électrodes.
- La surface immergée des deux électrodes.

- La vitesse d'agitation.

III.7. Avantages et inconvénients de l'électrocoagulation

Les avantages de l'électrocoagulation sont nombreux, mais il existe quelques inconvénients peuvent être énoncés.

III.7.1. Avantages de l'électrocoagulation

- Vis-à-vis de la coagulation, l'électrocoagulation évite l'utilisation des produits chimiques, de ce fait, aucune possibilité de pollution secondaire provoquée par ces produits ajoutés à des concentrations élevées
- Élimination de différentes formes de pollution ; DCO, DBO, COT, MES, métaux lourds, etc
- Les processus électrolytiques dans la cellule d'électrocoagulation sont commandés électriquement sans les pièces mobiles, de ce fait exigeant moins d'entretien (Ghernaout, 2008).
- La technique d'EC peut être utilisée facilement en milieu rural où l'électricité pourrait ne pas être disponible, puisqu'un panneau solaire relié à l'unité peut suffire pour mener à bien le procédé d'EC (Mollah et al, 2001).
- L'utilisation de l'EC permet de réduire le temps de traitement: ce procédé permet un grand gain en compacité des installations et une possibilité d'automatisation.
- Le Champ électrique entre les électrodes conduit à la destruction de certaines souches de bactéries, en utilisant des électrodes en titane (Persin et Rumeau, 1989).

III.7.2. Inconvénients de l'électrocoagulation

- Les électrodes sacrificielles (solubles) ont besoin d'être régulièrement remplacées.
- L'électrocoagulation n'est pas appropriée pour les solutions présentant une conductivité faible (Ghernaout, 2008).

- L'usage d'électricité peut être coûteux dans certains endroits. L'utilisation de l'énergie électrique, assez coûteuse, et le coût des électrodes consommables constituent un désavantage pour le procédé d'EC (Zongo, 2009).

III.8. Conclusion

Dans ce chapitre on a examiné les théories de l'électrocoagulation avec la plupart des mécanismes et réactions chimiques, ainsi qu'on a fait la synthèse des plusieurs paramètres intervenant dans ce procédé.

À l'aide d'un travail expérimental basé sur l'optimisation de la densité de courant, le temps d'électrolyse et une diminution de l'énergie consommée, nous allons essayer d'éliminer et d'éviter les inconvénients de l'électrocoagulation.

IV.1. Introduction

Le cactus *Opuntia ficus-indica* (le figuier de Barbarie) est un xérophyte produisant environ 200-300 espèces et se développe principalement dans les zones arides (250-450 millimètres de précipitation annuelle) et semi-arides (moins de 250 millimètres de précipitation annuelle). A cause de leur variabilité génétique remarquable, la plante d'*Opuntia* montre une adaptabilité écologique élevée et peut être rencontrée dans un endroit virtuelle à toutes les conditions climatiques: centre et sud de l'Amérique, la méditerranée, l'Afrique du Sud, Moyen-Orient, Australie, et l'Inde (Florian et Reinhold, 2005).

IV.2. Origine et diffusion

C'est une plante originaire des régions arides et semi-arides du Mexique et le sud des Etats unis, Le Nopal c'est le nom mexicain de la plante, vient du nom *Nochtli* en nahuatl, langue classique des Aztèques. *Opuntia*, son appellation savante, qui vient du latin *Opuntius*, d'*Opon*te. Il a été introduit d'abord en Espagne et plus tard au 16e siècle au Nord et au Sud de l'Afrique par les expéditeurs (Schweizer, 1997). Le comte Andrien de Gasparin, s'intéressa lui aussi au figuier de Barbarie. Par ses analyses originales de l'économie rurale et par son enthousiasme employé à la diffusion des techniques nouvelles, il contribua beaucoup à l'application des sciences exactes à l'agriculture. Considérant le figuier de barbarie comme la providence des pays pauvres au sol aride, il voulut développer sa culture en Afrique du Nord et y crea des nopaleraies, notamment en Algérie. (Benkaddouri, 2011).

La figure IV.1 représente la distribution géographique de figuier de barbarie.

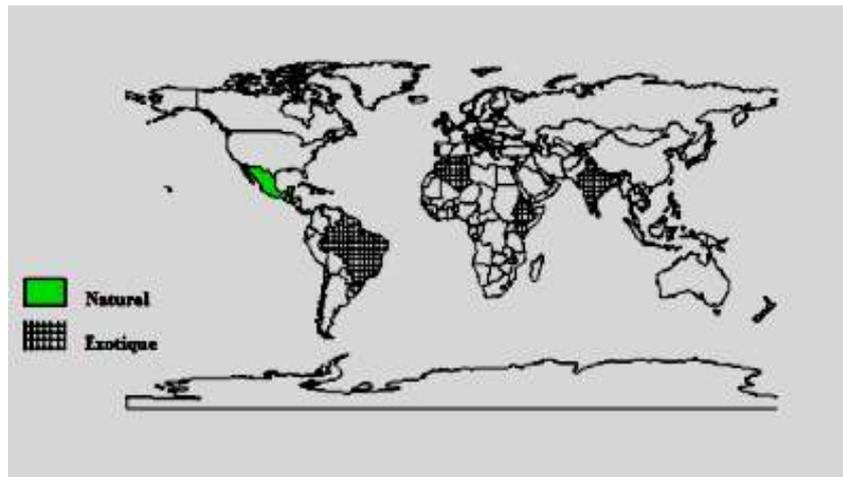


Figure IV.1 : Distribution géographique du figuier de Barbarie (i).

IV.3. position systématique

La position systématique du figuier de Barbarie est la suivante :

Règne : Plantae.

Sous règne : Tracheobionta.

Division : Magnoliophyta

Classe : Magnoliopsida.

Sous classe : Caryophyllidae.

Ordre : Caryophyllales.

Famille : Cactaceae.

Sous-famille : Opuntioideae.

Tribu : Opuntieae.

Genre : Opuntia.

Espèce : *Opuntia ficus indica*.

IV.4. Description de la plante

Le figuier de barbarie est une plante originaire des régions arides et semi-arides du Mexique, qui a été introduite en Afrique du Nord vers le 16^{ème} siècle. C'est une plante robuste qui peut mesurer jusqu'à 5 mètres de hauteur, avec un tronc épais et ligneux. Ses articles aplatis en forme de raquettes (cladodes) de couleur vert mat, ayant une longueur de 30 à 50 cm et une largeur de 15 à 30 cm, sont couverts de petites aréoles, d'épines et de

glochides blancs . Ses fleurs, marginales sur le sommet des cladodes, sont hermaphrodites, de couleur jaune et deviennent rougeâtres à l'approche de la sénescence de la plante. Ses fruits sont des baies charnues ovoïdes ou piriformes pourvues d'épines .Ils sont généralement verdâtres ou jaunes à maturité. La pulpe est toujours juteuse de couleur jaune-orangé, rouge ou pourpre, parsemée de nombreuses petites graines (Feugang et al, 2006).

La figure IV.2 représente un figuier de barbarie du centre de Sidi Aissa (Blida).



Figure IV.2 : *Opuntia ficus indica* du Centre de Sidi Aissa (Blida).

IV.5. Compositions chimiques des raquettes

Les cladodes et les fruits d'opuntia sont connus comme une source d'un nombre divers de composés alimentaires. Leur composition change selon les facteurs édaphiques à

l'emplacement de la culture, à la saison et à l'âge de la comptabilité de la plante. Pour mieux comprendre leurs activités biologiques il faut étudier leur composition chimique.

L'opuntia est une plante connue par sa richesse en eau avec un taux d'humidité très élevé de 85 à 90% (donc MO élevée), et une faible teneur en matière sèche d'environ 6-7 % (Felker, 1995).

Les raquettes de cactus sont très riche en matière minérale (tableau IV.1), tels que le calcium, le magnésium, le potassium et le cuivre (Smirnov, 1981), mais elles sont pauvres en matière azotées totales, elles ne renferment que 2 à 4.6 % de la MS (Nefzawi et Chermitti, 1991).

Le cactus est riche en composés organique surtout en glucides solubles qui constituent la fraction essentielle de l'extractif non azoté où les teneurs sont en général comprises entre 46.80 % et 71 % de la MS (Felker, 1995).

Les raquettes de figue de barbarie ont d'excellentes activités antioxydants, La présence de plusieurs antioxydants (acide ascorbique, carotenoïdes, glutathion réduit, cystéine, taurine et flavonoïdes telles que la quercétine, le kaempferol et l'isorhamnetin) a été détectée dans les raquettes (Nazareno et González, 2008).

Tableau IV.1: la composition chimique des raquettes d'*Opuntia ficus-indica* (Nefzawi et Chermitti, 1991)

Eau en % de poids brut	MS en % de poids brut	Constituants en % de MS							
		MM	MO	CB	MAT	Ca	P	K	Na
89.76	10.24	30.29	69.71	9.42	6.18	7.94	0.07	2.95	0.03

Les raquettes d'opuntia est riche aussi en mucilage, le tableau IV.2 montre la composition de mucilage des raquettes en quelque substances.

Tableau IV.2: Composition de mucilage des raquettes d'*Opuntia* (Monjauez et Le Houerou, 1965)

Substance	Composition en %	
	Raquette d'un an	Raquette de 2 ans
Sucre réducteurs (en fructose)	1.90	5.10

Sucre totaux (en glucose)	2.45	6.30
Furfural	5.32	7.66
Acide polygalacturonique	22.60	32.60
Glucomannes	2.22	3.64

IV.6. Importance économique et écologique

L'adaptation du figuier de barbarie aux conditions désertiques et semi-désertiques lui

permet de constituer une culture à intérêts écologiques et socio-économiques indéniables.

IV.6.1. Importance écologique

Le cactus croit principalement dans les zones arides et semi-arides. Sa remarquable variabilité génétique lui procure une forte adaptabilité écologique, ce qui lui permet de vivre sous différentes conditions climatiques, D'ailleurs, il croît dans les plaines, les régions côtières et les plateaux. Il craint les fortes gelées et peut supporter des températures minimales jusqu'à -10°C pour quelques heures (Habibi, 2004).

Il constitue un bouclier contre la désertification et l'érosion des sols. Le figuier de Barbarie est capable de produire de grandes quantités de biomasse végétale même dans les conditions extrêmes. Avec une pluviosité comprise entre 150 et 400 mm/an et en l'absence de fertilisation, la variété inerme peut produire jusqu'à 100 tonnes de raquettes/ ha/an (Monjauze et Le Houerou, 1965).

IV.6.2. Importance économique

Les avantages économiques se résument en :

IV.6.2.1. Consommation des fruits

La composition minérale et chimique du fruit a montré qu'il a la même valeur nutritive que les autres fruits. Il contient en moyenne 85 % d'eau, 15 % de sucres, 0.3% de sels et moins de 1 % de protéines. C'est une bonne source de vitamine C avec un apport énergétique important (Saenz, 2000).

IV.6.2.2. Production fourragère

Le cactus est considéré comme une réserve fourragère sur pied ; il peut constituer un appoint alimentaire pour les périodes de transition en été et en automne et lors des années de sécheresse. En effet, sa production en matière sèche varie de 12 à 16 tonnes/ha en fonction des régions. En terrain irrigué, cette production peut atteindre 30 tonnes/ha ce qui fait du cactus l'espèce la plus productive des zones arides : 1.37kg/m²/an pour le cactus et 0.71kg/m²/an en moyenne pour d'autres espèces. Une fertilisation azotée et phosphorique améliore sa valeur nutritive et sa productivité en biomasse (Dey et Brinson, 1984).

IV.6.2.3. Production maraîchère

Il est consommé dans son pays d'origine à l'état frais, bouilli dans l'eau ou séché. Les jeunes raquettes (Nopals ou Nopalitos) de 10-15cm de longueur sont consommées comme légumes et ingrédients dans la confection d'autres préparations alimentaires. Le mucilage aux propriétés visqueuses est utilisé en industrie alimentaire.

Les jeunes pousses d'*Opuntia*, appelées "Nopalitos" sont consommées comme légume au Mexique et dans le sud des Etats Unis. Elles sont riches en vitamine C et en Calcium et leur valeur nutritive est proche de celle de la laitue et des épinards (Saenz, 2002).

IV.6.2.4. Utilisations médicinales

En Australie et en Afrique du Sud, l'effet hypoglycémique des "Nopalitos" est utilisé dans le traitement des diabètes non dépendants de l'insuline. Le mucilage isolé des raquettes permet de réduire le cholestérol total dans le sang. Les femelles des cochenilles *Dactylopius coccus*

costal ou *Dactylopius opuntiae* cockerell, qui prolifèrent sur des raquettes de l'*Opuntia ficus-indica*, sont utilisées pour la production d'un colorant de couleur rouge le carmin ou l'acide carminique. Ce colorant (E-120) est très utilisé par les industries alimentaires, cosmétiques et médicinales. Récemment au Mexique et en Afrique du Sud, des producteurs ont adopté des systèmes de production intensifs en micro-tunnels pour la culture de ces cochenilles (Benkaddouri, 2011).

IV.6.2.5. Utilisations dans le domaine d'épuration et de traitement des eaux

Les bons résultats de coagulation par l'*Opuntia* sont très probablement attribués à la présence de mucilage qui est un hydrate de carbone visqueux et complexe entreposé en cactus intérieur et garnitures externes qui ont une grande capacité de conservation de l'eau. Des études ont établis que le mucilage dans l'*Opuntia* de cactus contient des hydrates de carbone tels que le l-arabinose, d-galactose, l-rhamnose, d-xylose et l'acide galacturonique.

Au Venezuela Diaz (1999) a étudié la capacité du cactus d'agir comme un coagulant naturel, en utilisant une eau synthétique d'une turbidité de 100 NTU. Le traitement a permis d'obtenir une eau potable pour la ville de Marakaibo, une eau dont la turbidité finale est proche de 5 NTU.

Jingdong Zhang et al (2006) ont étudié l'effet coagulant du cactus dans le traitement des eaux prélevés d'une station de traitement d'eau usée située à Wuhan (Chine), Les résultats montrent une efficacité d'élimination de la turbidité de 98%, il a été testé aussi pour traiter une eau usée, les résultats montrent que le cactus a pu diminuer la turbidité de 70 à 10.5 NTU.

Au Maroc, Abid et al (2008) ont étudié utilisation de l'extrait de jus de cactus, dans un procédé physico-chimique (coagulation floculation) afin de traiter des rejets liquides chargés en chrome, Ce bio-floculant a permis de réduire la turbidité de l'effluent industriel de 100 NTU à des valeurs au dessous de 2 NTU.

Abid, en 2009 avec d'autres auteurs ont étudié le traitement des rejets liquides chargées en cuivre, en zinc et en matière en suspension par l'ajout de différentes dose de jus de cactus et aussi pour tester l'efficacité de ce jus vis-à-vis des autres produits couramment utilisés dans le traitement des eaux usées. Le biofloculant a montré un effet très significatif, le pourcentage d'abattement des métaux dépasse 95 % pour le cuivre et le zinc.

Chan-Yang Yin (Malaisie 2010), a utilisé des coagulants à base de plantes pour le traitement de l'eau et des eaux usées, le cactus est l'un de ces coagulants. Les processus, l'efficacité et les mécanismes de coagulation pour le traitement de l'eau et des eaux usées ont été présentés, L'utilisation de ces coagulants représente un progrès important dans la technologie de l'environnement durable car ils sont des ressources renouvelables et leur application est directement liée à l'amélioration de la qualité de vie des communautés sous-développées.

S. Hadj-Kouider (Blida 2011) a réalisé un conditionnement chimique de la boue provenant de la station d'épuration des eaux usées de Baraki. Le cactus a été utilisé, afin d'augmenter la siccité des boues déshydratées. Les résultats obtenus par le jus de cactus sont encourageants, puisqu'il diminue la turbidité de 96% pour une eau filtrée de la boue de Baraki, et permet d'obtenir une siccité de 31%, obtenue par centrifugation.

IV.7. Conclusion

Ce chapitre présente le cactus *Opuntia ficus-indica*, et son importance économique et écologique dans le domaine de la valorisation des ressources naturelles de notre pays, comme il indique la possibilité d'introduire ce nouveau biofloculant dans les processus de traitement et d'épuration des eaux usées.

V.1. Introduction

La première partie de ce chapitre porte sur la présentation de la STEP de Béni-Messous, La seconde partie est consacrée à la description de matériel ainsi que les différentes méthodes et calculs utilisés au cours de l'expérimentation pour caractériser la boue.

V.2. Objectifs de l'étude expérimentale

Ce travail, concerne l'étude du conditionnement et de la déshydratation de la boue d'une station d'épuration des eaux usées urbaines de la région d'Alger. Le jus de cactus algérien a été utilisé comme un bio-floculant en combinaison avec l'électrocoagulation, afin de diminuer la résistance spécifique à la filtration r et augmenter la siccité des boues. Donc, le but principal de cette étude a d'une part, une valeur technique qui est le conditionnement électrochimique des boues, et d'autre part une valeur et une dimension économique, c'est la baisse des frais de conditionnement par la réduction d'énergie consommée en remplaçant les fortes intensités du courant par des volumes optimaux de jus de cactus.

V.3. Présentation de la station d'épuration

V.3.1. Situation géographique

Le site d'implantation de la station d'épuration de Béni-Messous est localisé sur le territoire de la commune de Aïn Bénian (Wilaya d'Alger), à environ 14 Km à l'ouest d'Alger Centre, nichée au bord de la mer méditerranée et à l'embouchure de l'oued Béni-Messous, l'entrée principale de la STEP est juste à côté de la route nationale N⁰11 (figure V.1).

Pour être plus précis, la STEP est limitée :

- Au Nord, par la plage Savaillon (El Bahdja).
- Au Sud, par la cité Belle-Vue (Aïn Bénian) et Les Dunes (Chéraga).
- A l'Ouest, par la nouvelle résidence d'Etat, et par le club des pins, la commune de Staouali.
- A l'Est, par El Djamila (anciennement La Madrague) la commune de Ain Benian.



Figure V.1 : Situation géographique de la STEP de Béni-Messous (d).

V.3.2. Réalisation de la STEP

“VA TECH WABAG”, c’est la société Autrichienne qui a lancé la réalisation de la station en mai 2005 en collaboration avec des sociétés algériennes.

Les travaux de réalisation ont été achevé en juin 2007, mais elle a été inaugurée et mis en service en juillet 2008.

V.3.3. Le Principe du traitement et les ouvrages

La station se compose de deux différentes filières, la première est la filière eau, conçue pour procéder à la chaîne d’opérations unitaires du type mécanique suivi d’un traitement biologique, achevé par une décantation secondaire (figure V.2). La deuxième est la filière boue (épaississement, stabilisation, conditionnement et déshydratation).

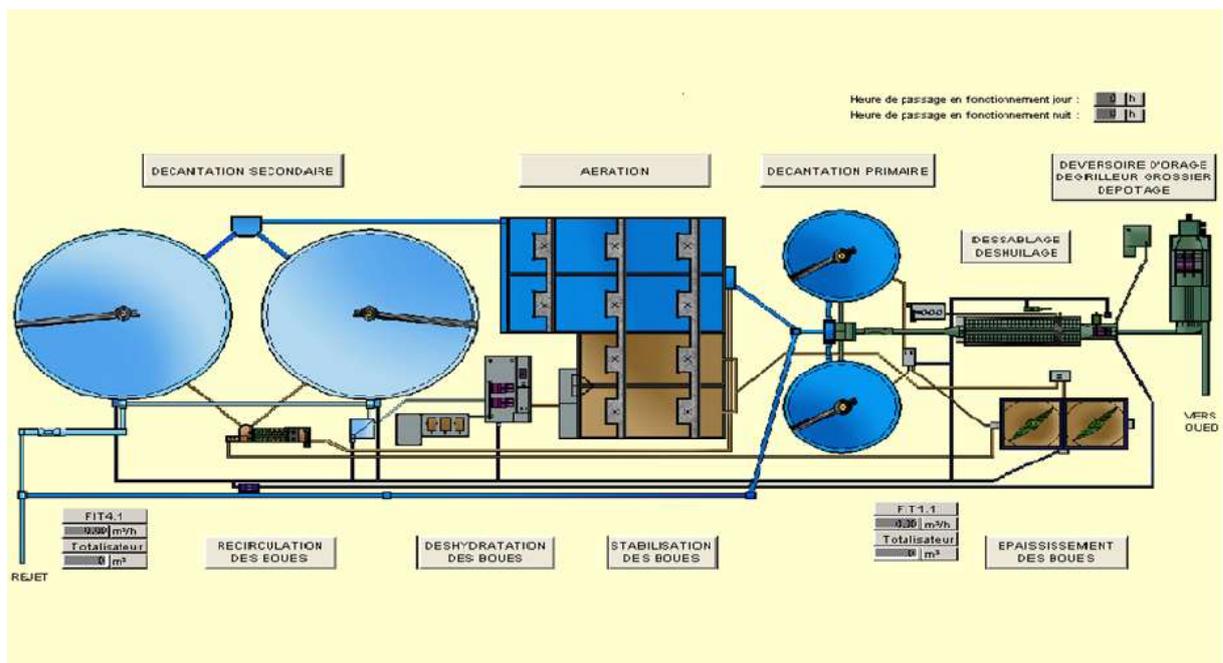


Figure V.2 : Schéma synoptique de la STEP de Béni-Messous.

La STEP englobe plusieurs dispositifs et ouvrages, définis comme suit :

❖ **Le prétraitement**

- Déversoir d'orage.
- Dégrillage mécanique grossier.
- Dégrillage mécanique fin.
- Dessableur déshuileur.

Venturi de mesure des eaux brutes.

❖ **Traitement primaire**

- Deux décanteurs primaires circulaires.
- Local boues primaires.

❖ **Traitement secondaire**

- Deux bassins d'aération, possédant chacun trois (03) aérateurs.

- Deux décanteurs secondaires circulaires.
- Station de recirculation des boues.
- Station de pompage des eaux trouble.
- Venturi de mesure des eaux traitées.
- Regard de collecte des eaux décantées.

❖ **Traitement des boues**

- Deux épaisseurs de boues.
- Local boues épaissies.
- Deux bassins de stabilisation des boues, possédant chacun deux (02) aérateurs.
- Deux chaines de déshydratation avec deux filtres à bandes.
- Station de lavage des filtres à bandes.
- Station de préparation des polymères et groupe hydrophore pour le conditionnement.
- Local de stockage des boues séchées.

❖ **Autres ouvrages**

- Fosse de dépotage.
- Poste de pesage.
- Local des surpresseurs.
- Poste de livraison électrique.
- Sous- local poste de livraison électrique.

V.4. Matériels et Méthodes

V.4.1. Matériels

On a utilisé le matériel suivant :

❖ **Verreries**

Béchers, pipettes, burettes, éprouvettes graduées, erlenmeyers, pipettes jaugées, verres de montres, thermomètre, tamis, capsules.....

❖ **Produits chimiques**

- Acide Sulfurique H_2SO_4
- Acide Chlorhydrique HCl.
- Hydroxyde de Sodium NaOH.

❖ Appareils

- Agitateur magnétique IKAMAG.
- pH - mètre HANA INSTRUMENTS, modèle pH209.
- Conductimètre TACUSSEL électronique, modèle CDRV 62.
- Turbidimètre HACH, modèle 2100A.
- Four de marque Heraeus INSTRUMENTS, modèle M110.
 - Etuve de marque Heraeus INSTRUMENTS, modèle B-6120 .
 - Balance analytique de marque PI, modèle YP402N.
 - Cellule de filtration sous vide conçue au laboratoire pour la mesure de la RSF.
- Générateur de courant de marque PHYWE type STELLTRAFO MIT GLEICHR
- Ampèremètre DIGITAL MULTIMETERE modèle DT-830D.
- Voltmètre PHYWE 07035-00.

Remarque

Toutes les photos du matériel et des produits chimiques sont présentées dans l'annexe 7.

V.4.2. Description des montages**V.4.2.1. L'électrocoagulation**

L'application d'un courant électrique à l'aide d'un Générateur de courant entre deux électrode en fer, de mêmes dimensions ($L=192$ mm, $l=51$ mm, $E_p=3$ mm) sont plongées verticalement dans un bûcher contenant 500 mL de boue (Figure V.3). La distance entre les deux électrodes est fixée à 20 mm, l'agitation est constante durant tous les essais (40 tour /min). La surface immergée (active) de chaque électrode est toujours de 3366 mm². Un ampèremètre est branché sur le circuit électrique entre le générateur de courant et l'anode pour mesurer l'intensité passant dans la solution, et aussi un voltmètre entre les deux électrodes afin de mesurer la tension (Figure V.3, Figure V.4).

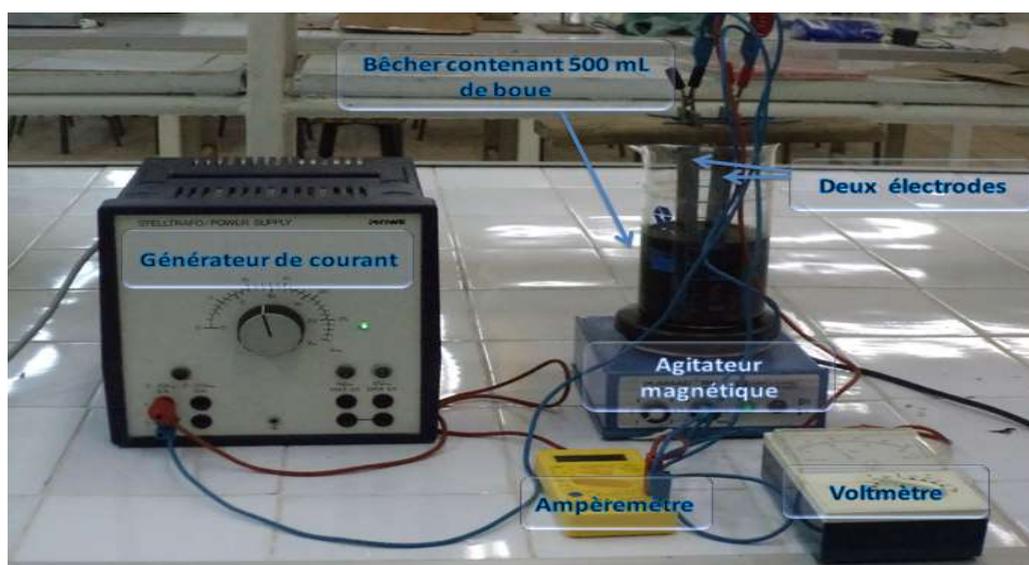


Figure V.3 : Photo du montage expérimentale d'électrocoagulation.

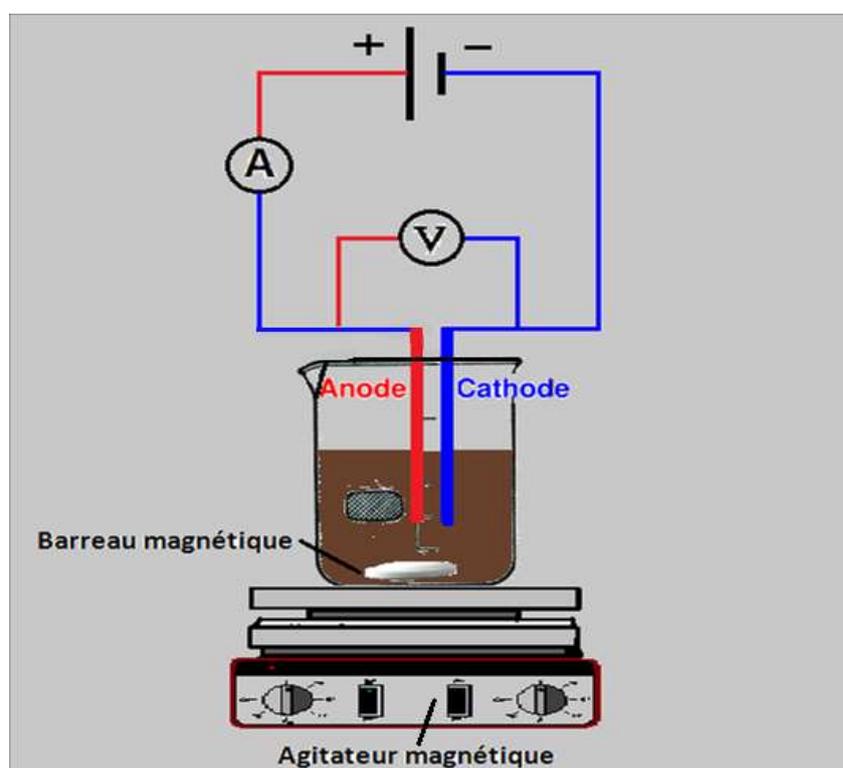


Figure V.4 : Schéma du montage expérimental d'électrocoagulation.

Remarque

Après chaque manipulation d'électrocoagulation, les électrodes sont nettoyées pour éliminer les impuretés et les couches de sédiments. Le nettoyage s'effectue selon les étapes suivantes :

- Polissage, se fait manuellement par papier abrasif.

- Rinçage à l'eau distillée.
- Décapage à l'acide chlorhydrique HCl (20 %) pendant 30 minutes.
- Rinçage à l'eau distillée.
- Dégraissage à l'aide de NaOH (0.5M) pendant 20 secondes.
- Rinçage à l'eau distillée.

V.4.2.2. Test de filtrabilité sous vide

Le dispositif de filtration comprend :

- Un Erlen Meyer de 2 litres.
- Un Buchner.
- Une Éprouvette graduée.
- Un Caoutchouc.
- Papier filtre normal de 90 mm.
- Une pompe à vide régulé, permettant d'établir un vide de 0.5 bar (figure V.5)

❖ Mode opératoire

Remplir le büchner de 100 mL boue à filtrer (conditionnée).

Etablir le vide et rechercher rapidement la dépression voulue soit 0.5 bar et veiller à ce qu'elle reste constante tout au long de l'essai.

Dès que le vide est atteint, mettre en route le chronomètre et noter le volume de filtrat déjà recueilli : volume V_0 correspondant au temps $t=0$ qui sera à soustraire des volumes repérés ultérieurement. Noter les volumes du filtrat recueilli au cours de l'essai pour différents temps de filtration : toutes les 10, 15, 20, 30 ou 60 secondes, selon la vitesse d'écoulement du filtrat. L'essai est conduit jusqu'à essorage du gâteau (perte de vide due au craquèlement du gâteau) (Degrémont, 2005).

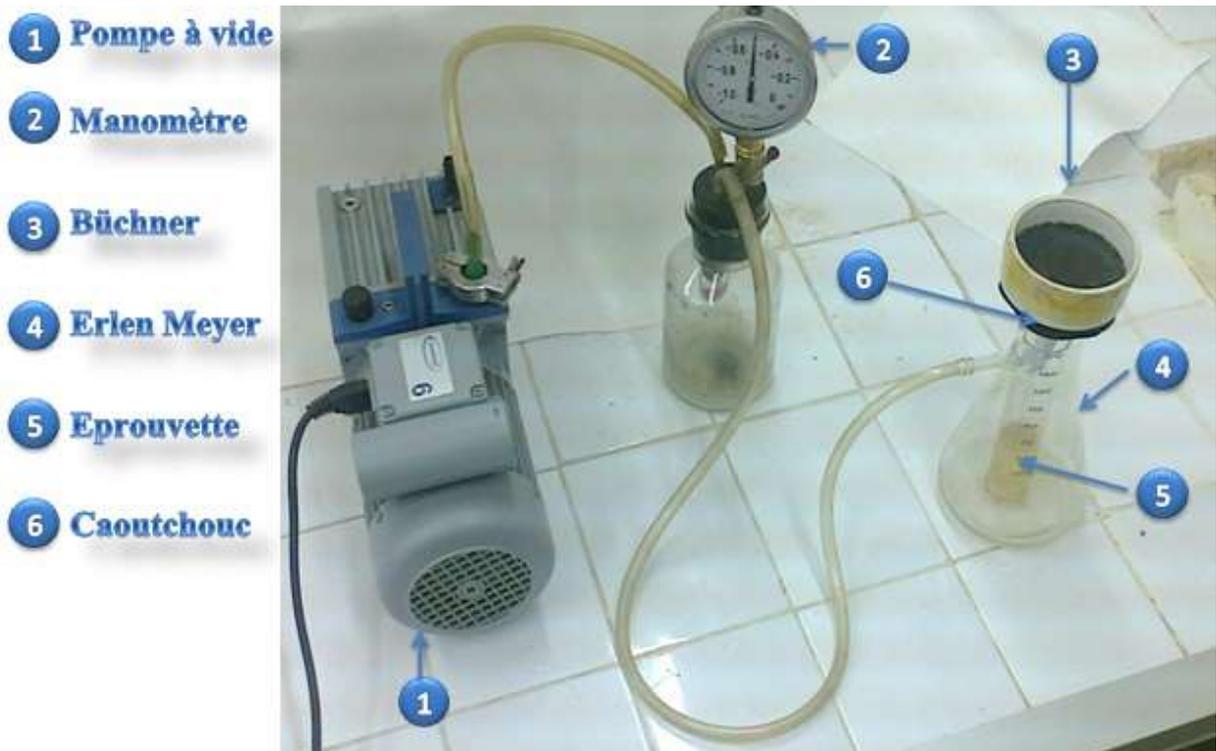


Figure V.5 : Montage du test de filtrabilité sous vide.

V.4.3. Méthodes

V.4.3.1. Les paramètres liés au courant électrique

a) La concentration en fer dissous expérimentale C_{Fe}

C'est la quantité résiduelle de fer en solution, elle est calculée par la relation suivante :

$$C_{Fe} = m/V \quad (\text{g.L}^{-1})$$

Avec V est le volume de la solution sous électrocoagulation, et m est la différence entre la masse initiale (avant l'essai) et la masse finale après l'essai) de l'anode qui sont pesées.

b) L'énergie électrique consommée

L'énergie électrique consommée W s'exprime en fonction de la tension appliquée entre les deux électrodes U (V), l'intensité du courant I (A) et la période d'électrocoagulation T (h) par unité du volume de la boue conditionnée V (m^3). Elle exprime en kWh.m^{-3} :

$$W = U \cdot I \cdot T / V \cdot 1000 \quad \text{en } (\text{kWh.m}^{-3})$$

V.4.3.2. Caractérisation de la boue et du filtrat

a) **Echantillonnage de la boue**

Les échantillons de boue ont été prélevés au niveau du bassin de stabilisation de la station d'épuration des eaux usées de Béni-Messous (Figure V.6), avec un petit bidon métallique de 1L lié à un bras. Le transport des boues se fait dans un jerrican de 10 L. la boue a été conservée à une température voisine de 4°C.



Figure V.6 : Bassin de stabilisation de la STEP de Béni-Messous.

b) **Mesure de la température**

On plonge le thermomètre dans le bécquet qui contient l'échantillon de boue et on attend quelque second, le mercure devrait se stabiliser, puis on note la température.

c) **Mesure de pH**

La mesure du pH est déterminée par un pH mètre de marque HANA INSTRUMENTS, modèle pH209, on introduit directement l'électrode dans l'échantillon, et on agite.

On attend quelques instants afin que la valeur se stabilise.

d) **Mesure de la conductivité**

La conductivité électrique est mesurée par un conductimètre de marque TACUSSEL électronique, modèle CDRV 62, La lecture se fait lorsque la valeur reste constante en milli siemens par centimètre.

e) Mesure de la turbidité de l'eau filtrée (filtrat)

La turbidité est mesurée à l'aide d'un turbidimètre. Elle correspond à la réduction de la transparence d'un liquide due à la présence de particules en suspension ou des matières colloïdales. La gamme de mesure est comprise entre 0,1 et 2 000 NTU (Nephelometric Turbidity Unit).

f) Mesure de la matière sèche (MS) et de la siccité Sc

La teneur en matières sèches inclut à la fois les matières en suspension et les sels dissous. Le résidu sec est utilisé aussi pour déterminer la siccité de la boue (exprimée en %). La teneur en matières sèches est exprimée en pourcentage par rapport au poids de l'échantillon. La méthode de mesure consiste à mettre à l'étuve à 105 °C, jusqu'à obtention d'une masse constante (24 heures), un échantillon de boue (25 à 100 mL selon la concentration de la boue) (Degrémont, 2005).

Avec :

M0 : masse de la capsule vide.

M1 : masse de la capsule et (+) du gâteau humide.

M2 : masse de la capsule et (+) du gâteau sec (après séchage à 105 °C).

g) Mesure de la matière en suspension MES

Le même principe que MS :

en (g.L⁻¹) (Degrémont, 2005)

Avec

M0 : masse de la capsule vide.

M2 : masse de la capsule et (+) du gâteau sec (après séchage à 105 °C pendant 24 h).

V : volume de boue filtrée (100 mL).

h) Mesure de la Matière volatile MVS

Le résidu sec obtenu lors de la mesure de la matière sèche est broyé et porté pendant 2 heures dans un four à moufle à 550°C. Connaissant la masse initiale et la masse finale, la teneur en matières volatiles rapportées à la matière sèche est calculée.

Pour la majorité des boues, la détermination des matières volatiles est une évaluation approchée de la matière organique (Degremont, 1989).

Donc

Ou

Avec

V : volume de la boue filtrée (mL).

M0 : masse de la capsule vide.

M2 : masse de la capsule et (+) du gâteau sec (après séchage à 105 °C).

Mf : masse de la capsule et (+) du gâteau sec (après calcination à 550 °C).

i) Mesure de la Teneur en matière minérale MM

Le résultat de l'évaporation totale de l'eau représente les matières minérales, c'est-à dire son « extrait sec », constituées à la fois par les matières minérales en suspension et les matières solubles (nitrates, phosphates,.....etc.) (Guy Altan, 2003).

Donc, La teneur en matière minérale est la différence entre la matière sèche et la matière volatile (MO).

$$MM = MES - MVS \quad (\text{g.L}^{-1})$$

j) Mesure de la résistance spécifique à la filtration r

C'est la résistance qu'oppose à la filtration d'une quantité de gâteau 1 Kg de produit sec et déposée sur 1 m² de surface filtrante.

Il est d'usage d'établir les comparatifs entre différentes boues à partir de r_{0.5} (filtration sous une pression différentielle de 0.5 bar ou 49 KPa), et elle permet d'évaluer approximativement la capacité d'un filtre sous vide industriel et de fixer les dosages optimaux de réactifs sur filtre

presse. la valeur $r_{0.5}$ pour une boue mixte se situe aux environs de 10^{14} à 10^{15} m.Kg⁻¹ valeur incompatible avec un passage direct sur filtre presse. il faudra donc faire appel à un conditionnement, pour faire chuter $r_{0.5}$ à une valeur proche de 10^{12} m.Kg⁻¹, valeur permettant une filtration acceptable et donc l'obtention d'un gâteau de déshydratation (Degremont, 2005).

La résistance spécifique à la pression P ($r_{0.5}$) s'établit ainsi :

en m.kg⁻¹

P_r = pression de filtration en Pascal (soit 49×10^3 Pa).

S : surface filtrante (dans notre cas 63.58×10^{-4} m² (diamètre du Büchner est de '90 mm').

C : concentration des boues (MES) à l'entrée de l'appareil en Kg.m⁻³.

η : viscosité dynamique du filtrat en Pa.s (à 20 °C, voisin de 1.1×10^{-3} Pa.s).

a : pente de la droite obtenue lors de l'essai de filtrabilité en s.m⁻⁶.

k) Caractérisation de la boue stabilisée (non conditionnée)

C'est la boue stabilisée de la STEP de Béni-Messous qui a été utilisée dans cette étude, les caractéristiques moyennes de plusieurs échantillons, sont montrées au tableau V.1.

Tableau V.1 : Les caractéristiques de la boue brute (stabilisée) de la STEP de Béni-Messous

Paramètres	pH	Conductivité (ms/cm)	MES (g/L)	MVS (%)	MM (g/L)	S (%)	r (m.kg ⁻¹)
Valeurs	6.36	1.61	29.6	55.28	12.7	3.63	5.4×10^{13}

D'après les résultats, on peut observer que :

- Cette boue stabilisée, a un pH de 6.36.
- la mesure de la conductivité explique que la boue contient une faible quantité de sels minéraux.
- le taux de matière volatile est supérieur aux matières minérales, donc il existe une prédominance de la matière organique, cela est expliqué par le fait que la boue est d'une nature urbaine.
- La siccité de la boue est très basse, indiquant que cette boue a une nature liquide.

- La résistance spécifique à la filtration est élevée, parce que la boue est non conditionnée.

V.4.3.3. Préparation et caractérisation du bio-floculant (Le jus de cactus)

Les raquettes d'*Opuntia ficus-indica* (Cactus) ont été récoltées dans le Centre de Sidi Aissa, Commune de Guerrouaou, Daïra de Boufarik, Wilaya de Bida, durant le mois de Juin 2014 (figure V.7).



Figure V.7 : Cactus de Sidi Aissa.

Les raquettes sont nettoyées (1 et 2) et découpées (3), ensuite elles sont broyées à l'aide d'un mixeur électrique à lames pour obtenir une matière végétale verte et visqueuse (4 et 5), l'extraction du jus pur s'effectue par la cellule de filtration sous vide (6). Il a été dilué à 10 % dans de l'eau distillée (condition optimale obtenue par Abid et al, 2009), puis homogénéisé par une agitation pendant 20 minutes (Figure V.8).



Figure V.8 : Les étapes de préparation du jus de cactus.

La détermination des différentes propriétés et caractéristiques physico-chimiques du jus dilué est réalisée avant la conservation à 4 °C (tableau V.2).

Tableau V.2: Propriétés physico-chimiques du jus utilisé

Paramètres	pH	Conductivité (ms/cm)	Turbidité (NTU)	MS (g/L)	MO (g/L)	MM (g/L)
Valeurs	4.87	1.20	120	4	3.2	0.8

V.5 Conclusion

On a fait des essais et des tests spécifiques au laboratoire, avec tenir en compte des plusieurs paramètres et conditions du conditionnement et déshydratation des boues, afin d'obtenir des solutions importantes et des graphes significatifs et expressifs.

VI.1. Introduction

Dans ce chapitre nous avons discuté et interprété les résultats du procédé électrochimique 'L'électrocoagulation', et l'ajout d'un bio-floculant (jus de cactus) ainsi que la déshydratation.

Le but de la première partie des essais est de déterminer les conditions optimales de la densité de courant électrique.

La deuxième partie des essais a pour objectif d'évaluer la possibilité de diminuer l'énergie consommée en augmentant la durée de l'électrocoagulation.

Le but de la troisième partie est de diminuer l'énergie électrique en améliorant le conditionnement par l'utilisation d'un bio-floculant (jus de cactus).

En outre, on a fait les derniers essais afin d'étudier l'influence du pH sur le procédé combiné (L'électrocoagulation + l'ajout de biofloculant).

VI.2. L'influence de la densité de courant

Cette première étude porte sur l'évaluation de la densité de courant électrique dans l'électrocoagulation de six échantillons, en appliquant les différentes intensités de courant : 0.17 ; 0.34 ; 0.50 ; 0.67 ; 0.84 ; 1 A. Le temps d'électrolyse est constant : 15 min (pour plus de détail, voir annexe 1).

VI.2.1. L'influence de la densité de courant sur la concentration en fer dissous (C_{Fe})

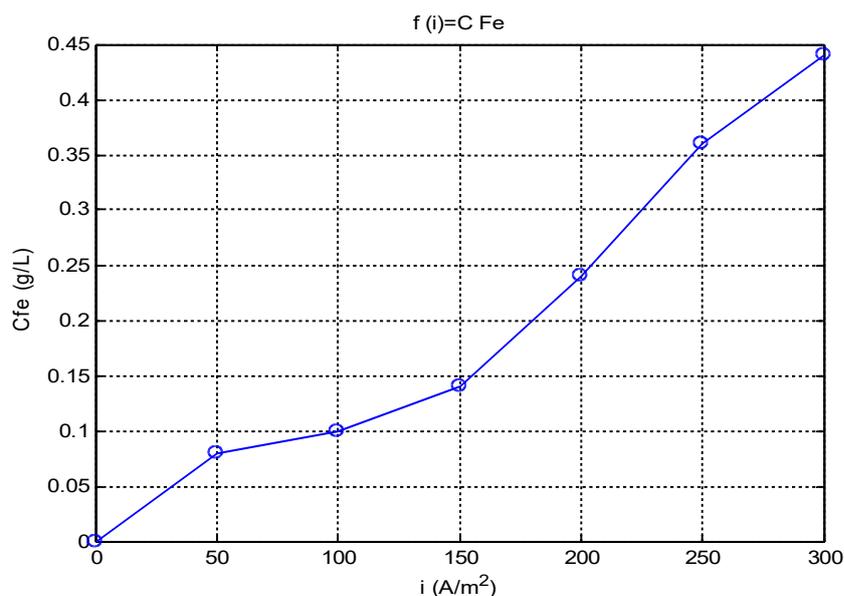


Figure VI.1 : L'influence de la densité de courant sur la concentration en fer dissous.

La figure VI.1 montre l'augmentation de la concentration en fer dissous de 0.08 à 0.44 g.L⁻¹ cette dernière correspond à la plus grande densité de courant '300 A/m²', la courbe montre bien que la concentration en métal dissous est proportionnelle à la densité de courant appliqué, cette augmentation peut venir du fait que la production des ions Fe²⁺ au niveau de l'anode est efficace : $\text{Fe}_{(s)} \rightarrow \text{Fe}^{2+}_{(aq)} + 2e^-$ (Mollah et al , 2001).

VI.2.2. L'influence de la densité de courant sur l'énergie consommée (W)

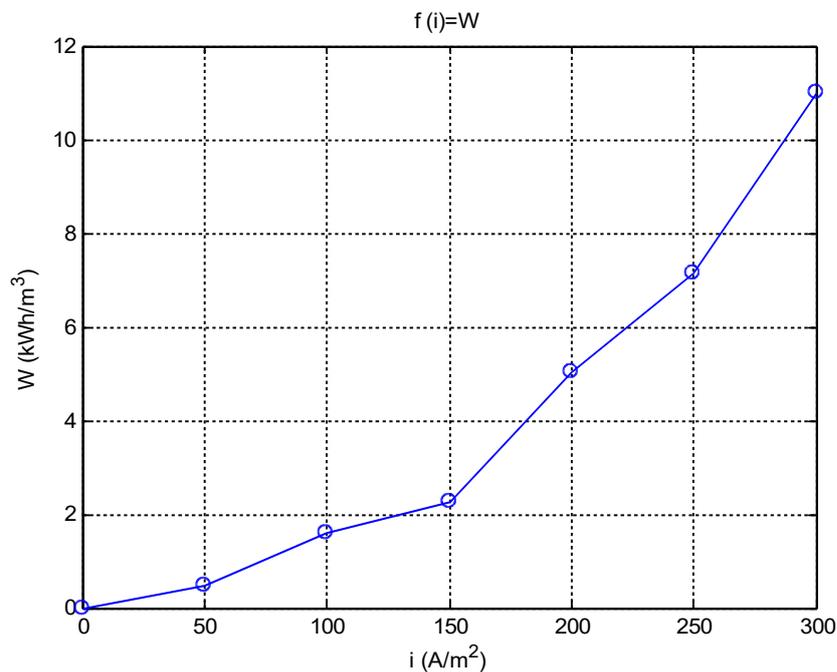


Figure VI.2 : L'influence de la densité de courant sur W.

Comme peut prévoir l'équation ' $W = U \cdot I \cdot t / V \cdot 1000$ '. La Figure VI.2 représente une remontée constante de l'énergie consommée, de 0 jusqu'à 11 kWh/m³, c'est-à-dire l'énergie consommée sera importante si l'intensité de courant appliquée est grande, avec :

Nous concluons que les courants élevés provoquent une augmentation de la vitesse de réaction dans ce cas les électrodes seront attaquées plus rapidement, entraînant une dépense énergétique plus importante et des grandes pertes d'énergie en chaleur dans le système (Chen, 2004).

VI.2.3. L'influence de la densité de courant sur le pH final de la solution

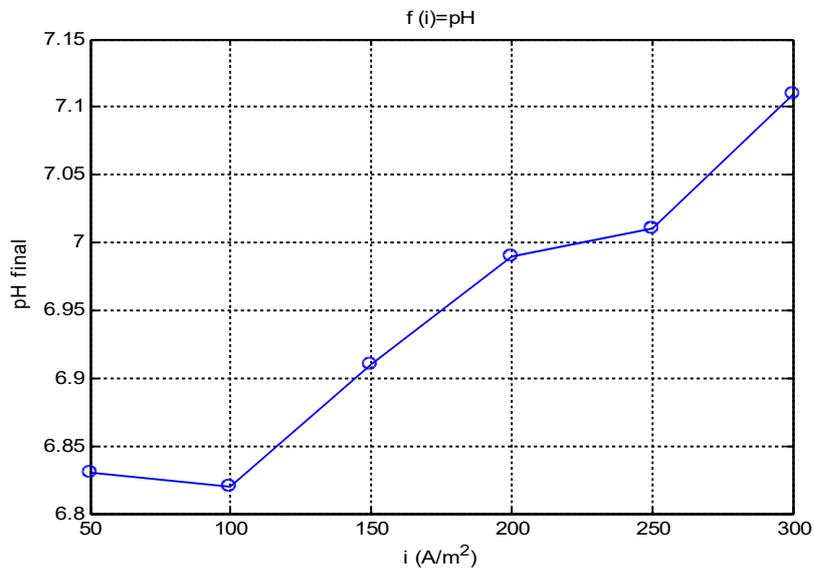


Figure VI.3 : L'influence de la densité de courant sur le pH final de la solution.

La figure VI.3 représente la variation du pH final du filtrat en fonction de la densité de courant appliquée. Nous constatons une évolution du pH continue avec l'amplification de la densité de courant, cette évolution du pH est due à la production d'ions OH^- par la cathode :

$$2\text{H}_2\text{O}_{(l)} + 2e^- \rightarrow \text{H}_{2(g)} + 2\text{OH}^-_{(s)} \quad (\text{Mollah et al, 2001}).$$

VI.2.4. l'influence de la densité de courant sur la siccité du gâteau (Sc)

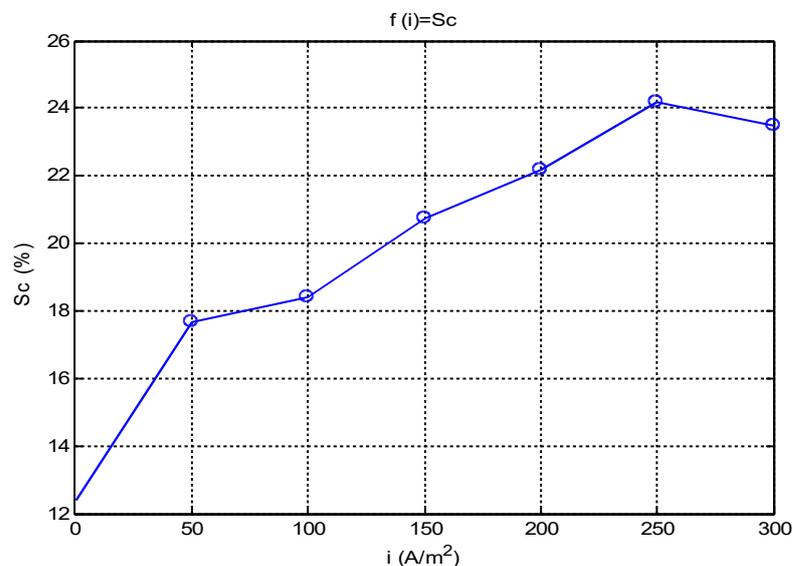


Figure VI.4 : L'influence de la densité de courant sur Sc.

Dans la gamme de la densité de courant appliqué, la courbe présente un optimum pour une densité de 250 A/m² (Figure IV.4). Ce maximum marqué est 24.19 %. Puis on peut remarquer une diminution de la siccité jusqu'à ce qu'elle atteigne 23.48 %.

L'augmentation s'explique par le fait que la quantité des ions Fe²⁺ et Fe³⁺ générée par la dissolution de l'anode est élevée ce qui entraîne une quantité élevée de précipités d'hydroxydes, ces derniers vont assurer l'adsorption des polluants et la floculation des particules, ce qui facilite la séparation solide-liquide. (Holt et al, 2002).

D'autre part la densité des bulles de gaz (O₂ et H₂) augmente avec l'augmentation de la densité de courant et leur taille diminue. La vitesse ascensionnelle des petites bulles est plus faible que celle des bulles plus grosses (Kobyta et al, 2010), Ainsi que les bulles de gaz de petits diamètres s'élèvent lentement (vitesses faibles) vers la surface, ce qui augmente leur probabilité de collision avec les polluants. En effet l'équation de STOKES stipule que la vitesse ascensionnelle d'une bulle de gaz dans l'eau en régime laminaire est proportionnelle au carré du diamètre de la bulle de gaz :

$$V_b = g (\zeta_L - \zeta_g) d_b^2 / 18 \eta \quad (\text{m.s}^{-1})$$

avec :

- d_b : représente le diamètre de la bulle de gaz (m).
- ζ_g : masse volumique du gaz (kg/m³).
- ζ_L : masse volumique du liquide (kg/m³).
- η : viscosité dynamique du liquide (kg/m.s).
- g : accélération de la pesanteur (m.s⁻²).

La diminution de la siccité correspond à une grande densité de courant 300 A/m². D'après Anon (1996) une trop grande densité de courant provoque habituellement la coalescence des bulles de gaz ce qui réduit l'efficacité de l'électrocoagulation.

VI.2.5. L'influence de la densité de courant sur la résistance spécifique à la filtration

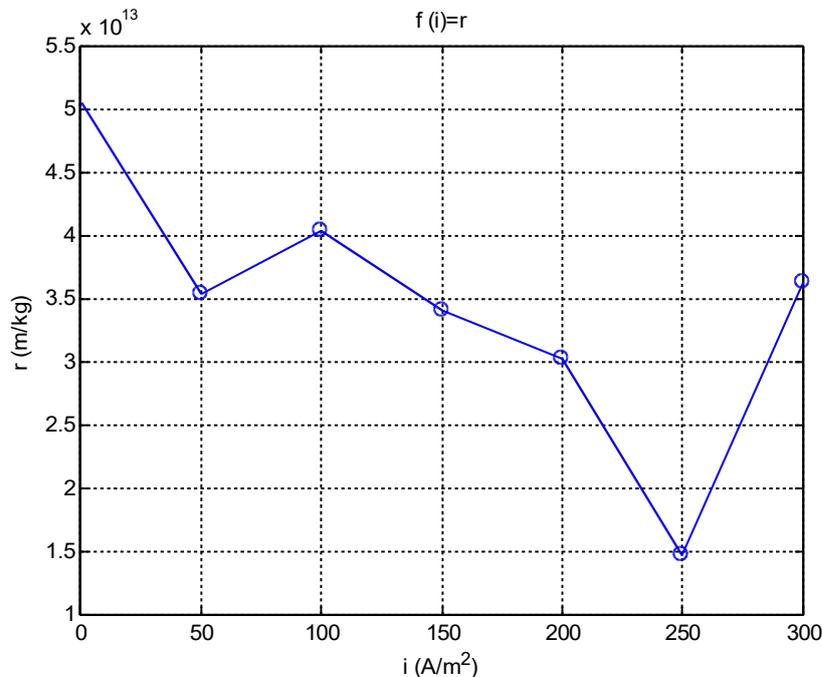


Figure VI.5 : L'influence de la densité de courant sur r .

Rappelons que la résistance spécifique à la filtration, permet de juger de la perméabilité et de la texture du gâteau et de leur évolution avec les conditions de déshydratation. La Figure VI.5 représente l'évolution de r ($m.kg^{-1}$) en fonction de la densité de courant.

La courbe peut être subdivisée en deux zones distinctes, la première zone montre une diminution de r_p de $5.04 \times 10^{13} m.kg^{-1}$ jusqu'à $1.47 \times 10^{13} m.kg^{-1}$, qui est la meilleure valeur et elle correspond à $250 A.m^{-2}$. Par contre pour la deuxième zone, nous remarquons que r_p augmente jusqu'à $3.63 \times 10^{13} m.kg^{-1}$.

La diminution de r entre les densités de courant de 0 à $250 A.m^{-2}$, elle peut être expliquée par la formation des floccs lors du conditionnement de la boue qui facilite la séparation solide/liquide (figure VI.6). La deuxième zone indique que la boue est mal conditionnée à cause de la production élevée de bulles de gaz qui induit une forte agitation dans le Becher, entraînant une perturbation de la floculation.



Figure VI.6 : Boue obtenue après électrocoagulation, pour $i=250\text{A.m}^{-2}$ et $T=15\text{min}$.

VI.2.6. L'influence de la densité de courant sur le volume de filtrat

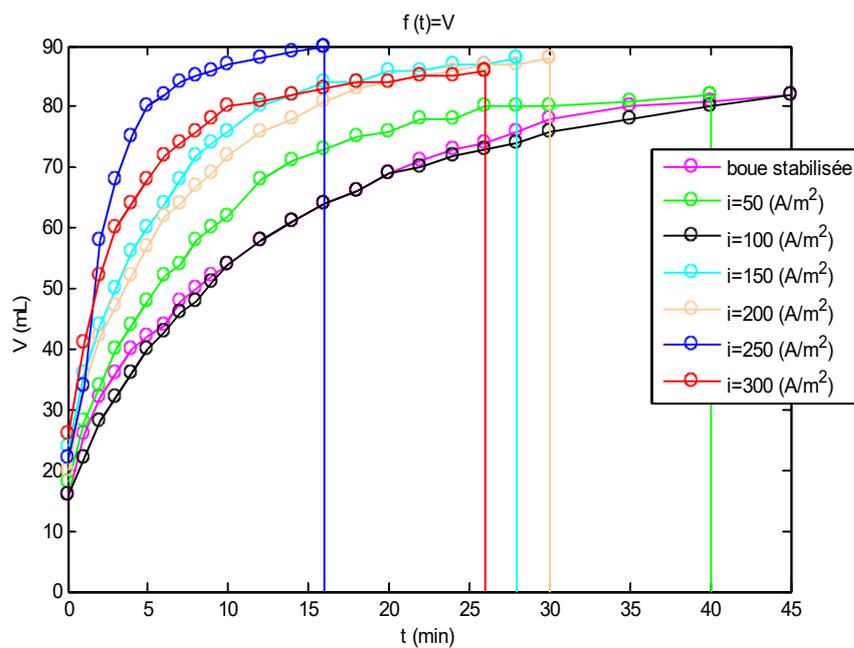


Figure VI.7 : L'influence de la densité de courant sur le volume de filtrat.

La Figure VI.7 représente les courbes de filtration obtenues en fonction du temps, Quel que soit la densité de courant, le volume d'égouttage augmente avec le temps.

On constate que cette augmentation est d'autant plus importante que la densité de courant est élevée ; excepté $i=300\text{ A.m}^{-2}$. Le volume maximal '90 mL' est obtenu avec une densité de courant de 250 A.m^{-2} . On peut remarquer que Les volumes de filtrat ont été récoltés après 3 différentes durées de filtration :

- 16 min pour $i = 250 \text{ A.m}^2$.
- Entre 25 et 30 min pour $i = 150, 200, 300 \text{ A.m}^2$.
- Entre 40 et 45 min pour la boue non conditionnée et les faibles densités (50 et 100 A.m^2).

Donc on peut estimer que l'augmentation des débits de filtration est liée par la perméabilité de la boue conditionnée, parce que la bonne floculation entraîne l'agrandissement et la dispersion des floes qui facilite la filtration et la récupération de l'eau.

VI.3 L'influence du temps d'électrolyse

Afin d'étudier l'influence du temps d'électrolyse sur les différents paramètres et de choisir le temps d'électrolyse optimale de conditionnement, un plan expérimental a été conçu. Il s'agit d'un plan à trois niveaux dont les trois densités de courant sont 100, 150 et 200 A.m^2 , pour chacune les valeurs des durée d'électrolyse sont variées avec un pas de 15 min, à partir d'une durée de 15 min jusqu'à 90 min. les paramètres initiaux et finaux sont représentés dans les tableaux de l'annexe II.

VI.3.1. L'influence du temps d'électrolyse sur la concentration en fer dissous (CFe)

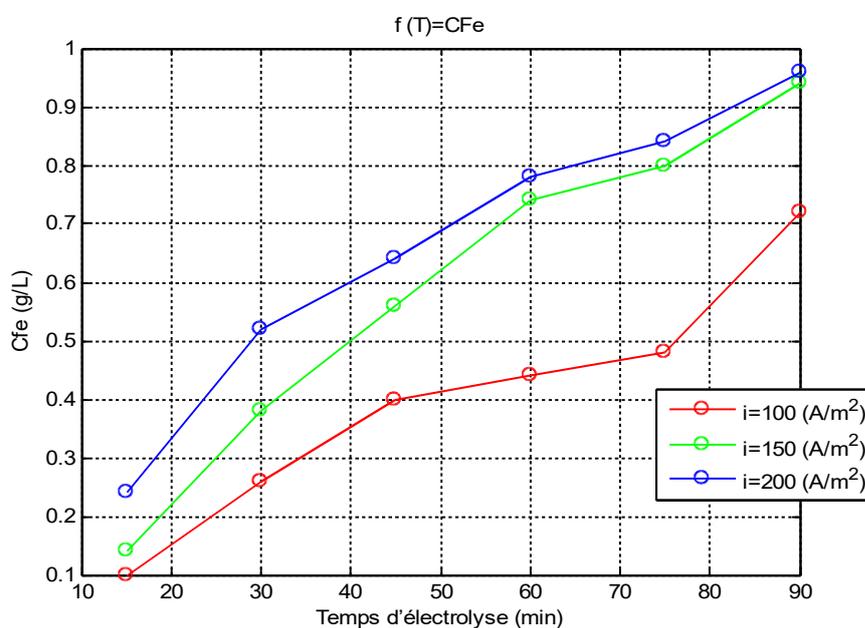


Figure VI.8 : L'influence du temps d'électrolyse sur la concentration en fer dissous.

La figure VI.8 représente la variation de la concentration en fer dissous en fonction du temps d'électrolyse (min) à différentes densités de courant. Nous remarquons que pour toutes

les densités de courant, les courbes de concentration ont une forme croissante en fonction de durée d'électrolyse. C'est logique de parvenir à ce résultat en raison des quantités des ions Fe^{2+} générées par la dissolution de l'anode ($\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2 e^-$) d'une façon continue à long terme.

VI.3.2. L'influence du temps d'électrolyse sur l'énergie consommée (W)

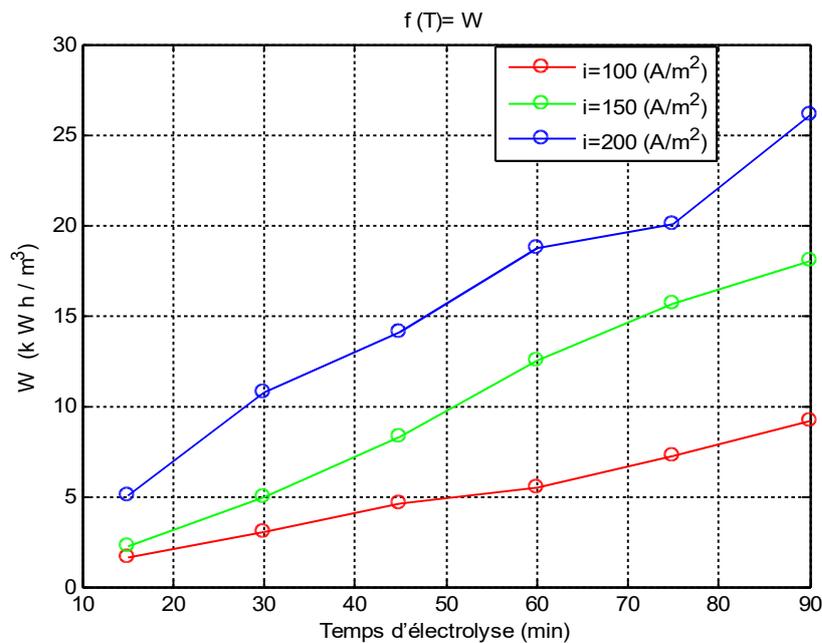


Figure VI.9 : L'influence du temps d'électrolyse sur W .

La figure VI.9 représente, pour différents temps d'imposition du courant électrique l'évolution de l'énergie consommée au regard des trois densités choisies. L'énergie consommée augmente avec le temps de rétention, quel que soit la densité appliquée, les maximums de W en ordre croissant de la densité sont : 9.18, 18, 26.13 (kWh.m^{-3}). Donc il est important d'imposer le courant électrique le moins longtemps possible, afin de limiter les pertes inutiles en chaleur et la production exagérées de boues métalliques (Asselin, 2007).

VI.3.3. L'influence du temps d'électrolyse sur la siccité du gâteau (Sc)

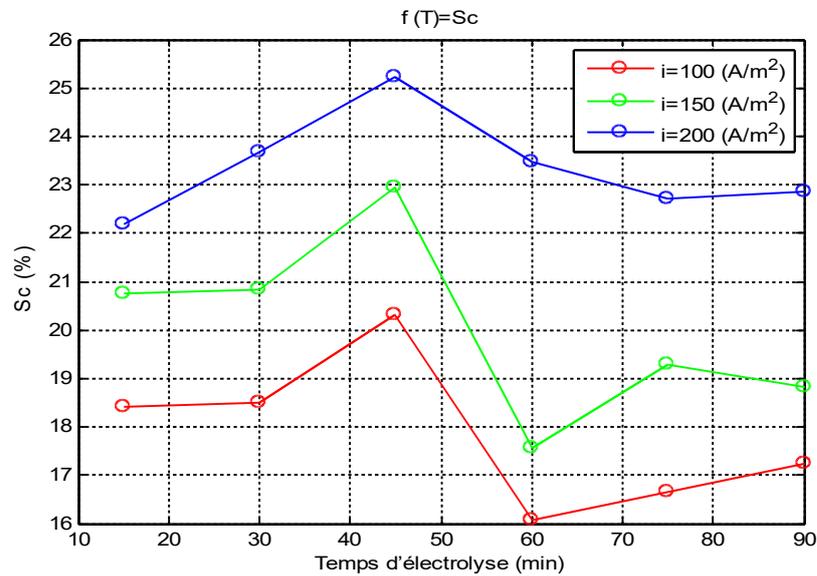


Figure VI.10 : L'influence du temps d'électrolyse sur Sc .

La Figure VI.10 illustre l'effet du temps d'électrolyse sur la siccité du gâteau (Sc) pour différentes densités de courant. Dans les trois cas, on distingue clairement deux phases, la première phase est entre 15 et 45 min où les siccités augmentent avec le temps pour atteindre des valeurs maximales, ceci peut s'expliquer par le fait que l'adsorption des polluants et la floculation des particules améliorent la déshydratation (figure V1.11), ces siccités optimums sont 20.32, 22.94, 25.23 % respectivement, pour des densités de 100, 150 et 200 A.m^{-2} . Au-delà de 45 min, l'augmentation de temps d'électrolyse provoque la formation exagérée des ions Fe^{2+} ou OH^- (Hydroxyde) qui pourrait gêner la floculation, puis la séparation solide-liquide.



Figure VI.11 : Boue obtenue après électrocoagulation, pour $i=200\text{A.m}^{-2}$ et $T=45\text{min}$.

VI.3.4. L'influence du temps d'électrolyse sur la résistance spécifique à la filtration

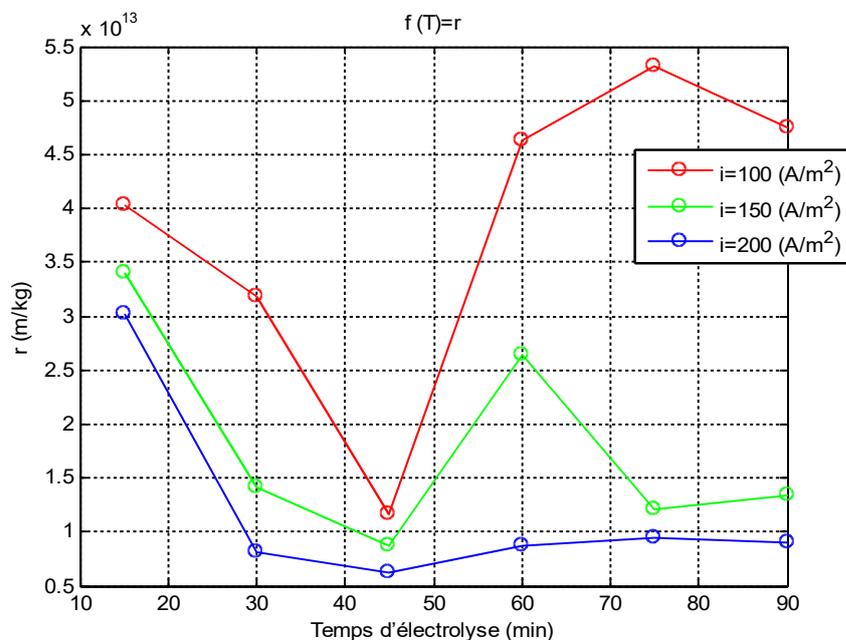


Figure VI.12 : L'influence du temps d'électrolyse sur r .

La Figure VI.12 met en évidence l'influence du temps d'électrolyse sur la résistance spécifique à la filtration. De 15 à 45 min, la résistance spécifique diminue rapidement pour les différentes densités de courant. La phase d'optimisation a tiré la résistance vers 1.17×10^{13} , 8.74×10^{12} , $6.29 \times 10^{12} \text{ m.kg}^{-1}$ respectivement pour des densités de courant 100, 150 et 200 A.m^{-2} . La majorité des valeurs optimales de (r) s'inscrivent dans la courbe correspondant à $i=200 \text{ A.m}^{-2}$. Au bout de 45 minutes, l'augmentation du temps d'électrolyse avaient un effet inverse sur la résistance spécifique à la filtration, elle entraîne une mauvaise déshydratation,

pour cela nous avons obtenue un gâteau qui a la forme d'une pâte visqueuse, ce qui a diminué la perméabilité de la boue.

VI.3.5. L'influence du temps d'électrolyse sur le volume de filtrat

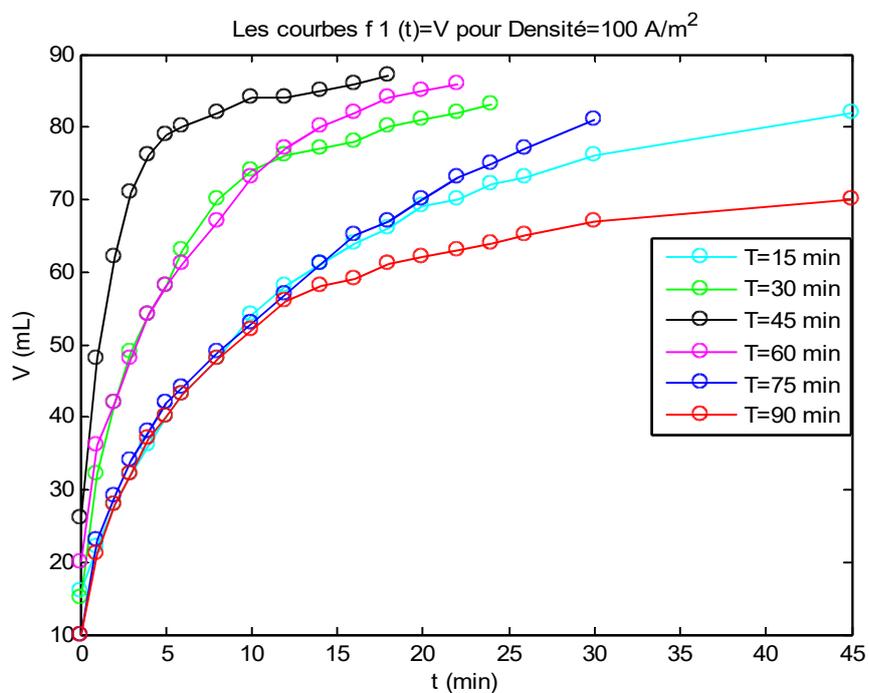


Figure VI.13 : L'influence du temps d'électrolyse sur V de filtrat pour ($i=100 \text{ A.m}^{-2}$).

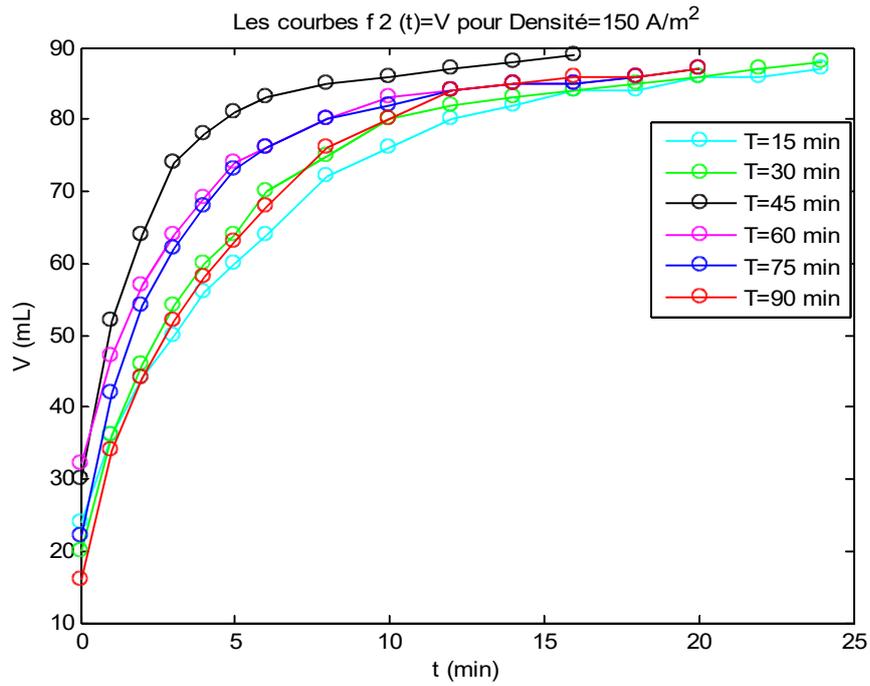


Figure VI.14 : L'influence du temps d'électrolyse sur V de filtrat pour (i=150 A.m⁻²).

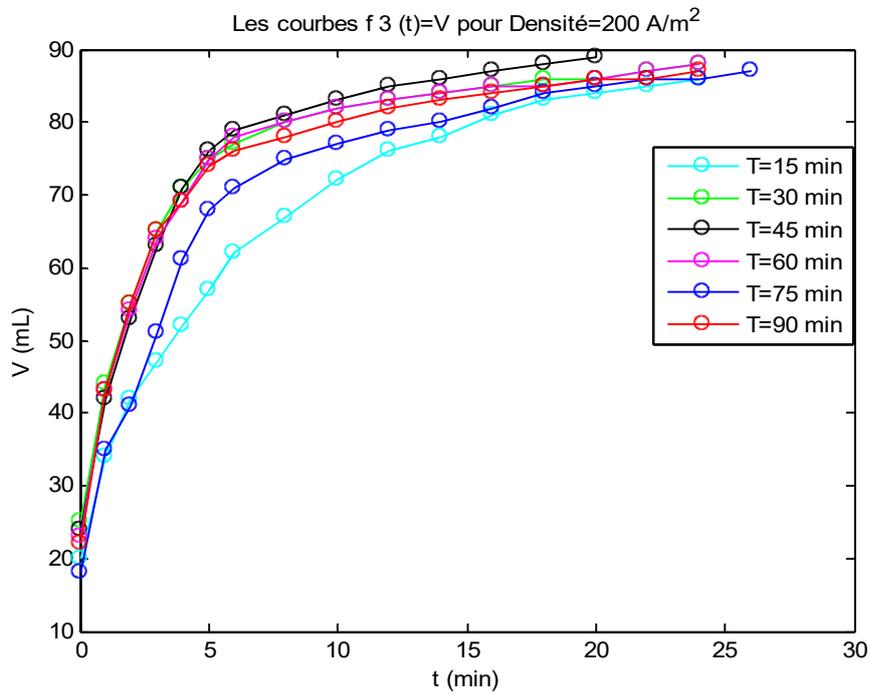


Figure VI.15 : L'influence du temps d'électrolyse sur V de filtrat pour (i=200 A.m⁻²).

Les figures VI.13, VI.14, VI.15 montrent l'évolution du volume de filtrat des boues conditionnées au cours du temps pour différentes durées d'électrolyse en appliquant les densités de courant de 100, 150 et 200 A.m⁻².

Une première observation préliminaire concerne la première figure (électrocoagulation en appliquant une densité de 100 A.m⁻²). Elle indique que le débit de filtration est caractérisé par trois vitesses où :

- il est important pour un temps d'électrolyse de 45 min.
- il est moyen pour un temps d'électrolyse de 30, 60 min.
- il est faible pour un temps d'électrolyse de 15, 75, 90 min.

Par contre, lorsqu'on observe les deux autres cas (électrocoagulation en appliquant une densité de courant 150 et 200 A.m⁻²) on constate que les vitesses de filtration sont très convergentes avec un léger rebondissement qui correspond à un temps d'électrolyse de 45 min où le volume obtenu est de 89 ml.

Ces courbes expliquent bien que le temps de 45 min est la durée optimale d'électrolyse quelque soit la densité de courant appliquée afin de récupérer le plus grand volume possible, ce qui est confirmé par l'obtention de gâteaux plus secs. De même, parce que ce temps d'électrolyse entraîne la formation de gros floccs et augmente la perméabilité de la boue qui facilite la séparation solide-liquide.

VI.4. L'influence de la dose de bioflocculant

Le but de cette série d'essais est de déterminer la combinaison favorable (électrocoagulation / jus de cactus) en diminuant l'intensité de courant afin d'économiser l'énergie électrique consommée et amoindrir la consommation exagérée d'élément métallique.

Les essais ont été conduits pour deux densités de courant ' 100 et 150 A.m⁻² ', en fixant le temps d'électrolyse à 45 min (durée optimale), les volumes ajoutés aux échantillons de bioflocculant varient de 5 à 30 ml avec un pas de 5 ml.

Nous avons tout d'abord déterminé la matière sèche du jus de cactus, on mettait 50 ml de jus de cactus (dilué à 10 %) (Abid et al, 2009) dans l'étuve à 105 °C pendant 24 heures. Toutes les doses D sont exprimées en g par 1 kg de MS de la boue, et leur calcul est basé sur la formule suivante :

Avec :

- MS : Matière sèche de la boue brute (MS= 0.0296 kg.L⁻¹).
- C' : La concentration en jus de cactus de l'échantillon

$$C' = (MS' \times V_1) / V_2 \quad (\text{g.L}^{-1})$$

- MS' : Matière sèche du jus dilué à 10 % (constante, MS'= 4 g.L⁻¹).
- V₁: le volume de jus ajouté (5, 10, 15, 20, 25, 30 ml).
- V₂: le volume de l'échantillon (500 mL).

Les doses de biofloculant calculées par rapport à la matière sèche de la boue utilisée sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau VI.1 : Les doses de biofloculant calculées par rapport à la matière sèche

Volumes ajoutés (mL)	5	10	15	20	25	30
Doses calculées (g.kg ⁻¹)	1.33	2.67	4	5.33	6.67	8

Les caractéristiques initiales et finales des solutions électrocoagulées pour les différentes doses sont portées dans le tableau 3.1 Annexe 3.

VI.4.1. L'influence de la dose de biofloculants sur la siccité du gâteau (Sc)

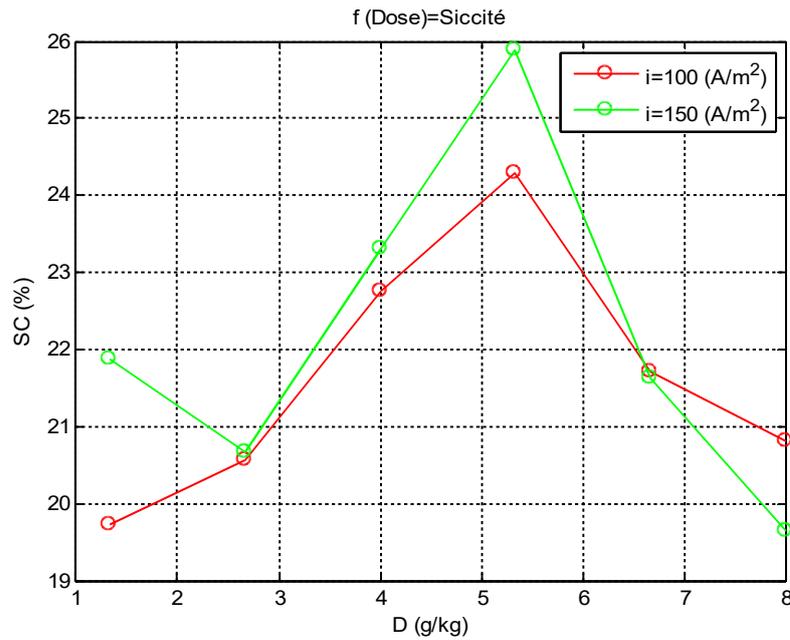


Figure VI.16: L'influence de la dose de bioflocculant sur Sc.

La figure VI.16 représente la siccité du gâteau en fonction de la dose de bioflocculant. On constate que les siccités des deux courbes correspondant aux deux densités de courant 100 et 150 A.m^{-2} augmentent continuellement jusqu'à 24.30 et 25.88 % respectivement. Les gâteaux obtenus à ces densités de courant sont très secs (figure VI.17). Ces valeurs optimales sont atteintes du fait de la grande efficacité du bioflocculant avec un ajout de 5.33 g seulement par kg de matières sèches. Selon Miller et al (2008), l'efficacité de la floculation est liée à l'acide polygalacturonique qui est présent en grand pourcentage dans le mucilage de la plante (voir le tableau IV.2), car il est responsable de la formation des ponts chimiques par l'intermédiaire des liaisons hydrogène ou l'interaction dipôle-dipôle.

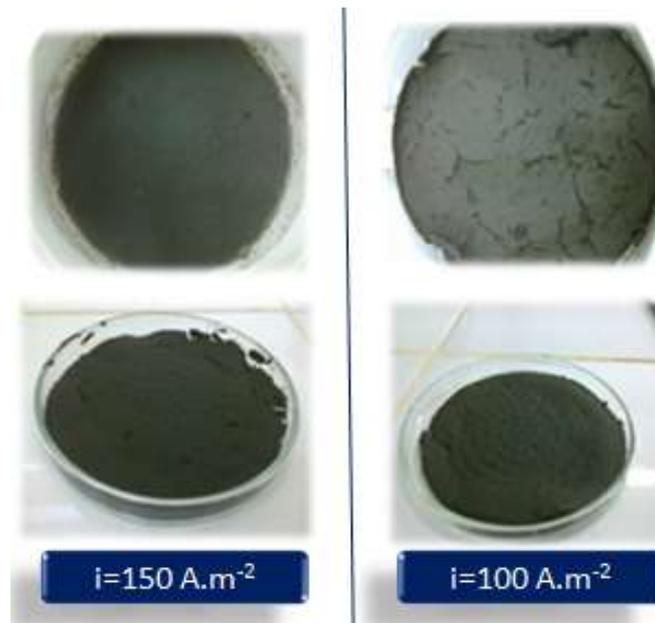


Figure VI.17 : Gâteaux récupérés après déshydratation pour la dose optimale de biofloculant de 5.33g/kgMS.

La structure de l'acide polygalacturonique, représentée sur la Figure VI.18. Indique une chaîne anionique due à une déprotonation partielle du groupe hydroxyle et du groupe carboxyle en solution aqueuse, impliquant une chimisorption entre les particules chargées et ces groupes (Yin, 2010).

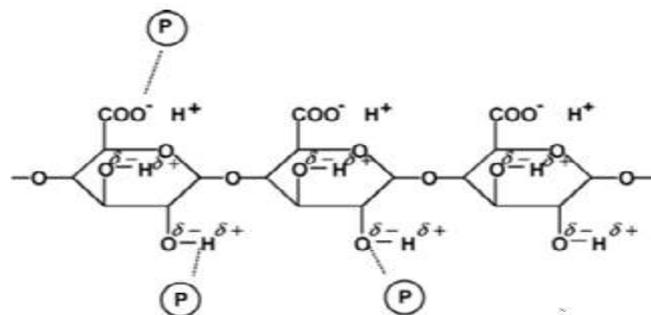


Figure VI.18 : Structure de l'acide polygalacturonique (les sites de neutralisation des colloïdes polluants P) (Yin, 2010).

On a aussi une deuxième phase où la Sc diminue avec l'ajout de jus de cactus, on pense que cette diminution est causée par la présence des polyphénols (acide ascorbique, caroténoïdes, glutathion réduit,), dans la composition du jus de cactus (Nazareno et González, 2008).

qui interviennent comme antioxydants, donc une quantité importante de ces composés peut abattre la dissolution de l'anode et défavoriser l'électrocoagulation.

VI.4.2. L'influence de la dose de biofloculants sur la résistance spécifique à la filtration

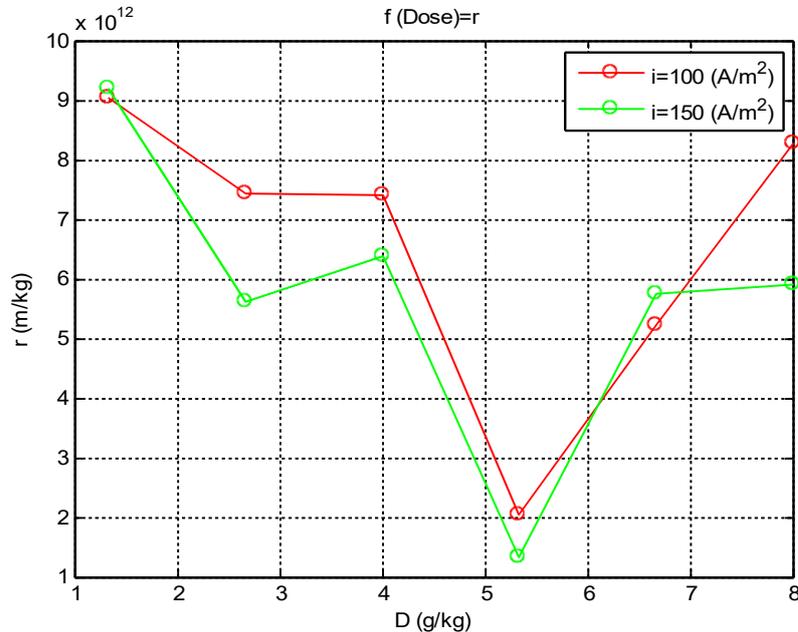


Figure VI.19 : L'influence de la dose de biofloculants sur r.

La figure VI.19 présente les résultats obtenus de la résistance spécifique à la filtration en fonction des différentes doses de biofloculant.

Tout d'abord la résistance spécifique diminue rapidement pour les deux densités de courant, elle atteint l'optimum à une dose de 5.33 g.kg⁻¹, elle est de 2.04×10¹² m.kg⁻¹ (pour i=100 A.m²) et 1.32×10¹² m.kg⁻¹ (pour i=150 A.m²). Au delà de 5.33 g.kg⁻¹, la résistance spécifique augmente rapidement pour atteindre des valeurs défavorables.

La présence de l'acide polygalacturonique à une dose optimale diminue de manière très significative la résistance spécifique à la filtration car celle-ci intervient comme flocculant à forte liaison unissant les particules polluantes et forme des flocs non déformables (figure VI.20) qui entraîne une perméabilité importante et facilite la filtration.

On constate qu'un surdosage du biofloculant influence négativement sur les performances de la déshydratation avec une résistance spécifique beaucoup plus élevée.



Figure VI.20: Photos des boues obtenues après conditionnement pour la dose optimale de biofloculant $D=5.33\text{g/kg}$, avec les deux densités de courant.

VI.4.3. L'influence de la dose de biofloculants sur la turbidité du filtrat

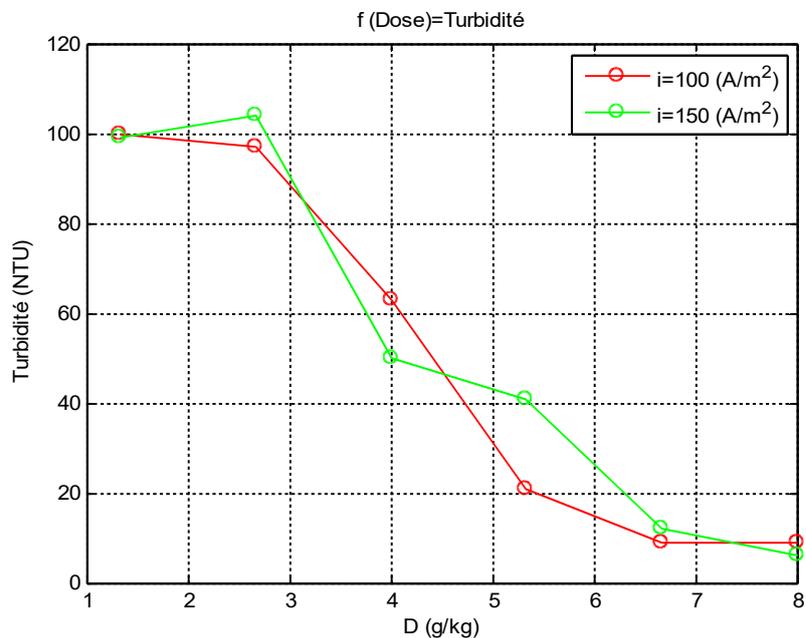


Figure VI.21 : L'influence de la dose de biofloculants sur la turbidité du filtrat.

La figure VI.21 reprend toutes les turbidités obtenues en fonction des doses ajoutées aux deux densités de courant.

On a presque le même comportement de la turbidité, on remarque que les courbes suivent la même variation indépendamment de la densité de courant, l'abattement de la turbidité est quasi-total (9 NTU à $i=100 \text{ A.m}^{-2}$ et 6 NTU à $i=150 \text{ A.m}^{-2}$), il est obtenu pour la dose maximale du cactus " 8 g/kg ", cela veut dire que les particules en suspension ont été bien éliminées sans pour autant former une boue de grande siccité, plusieurs études soulignent que l'acide galacturonique est probablement la substance active pour l'élimination des particules colloïdales stables. Ce biofloculant peut agir en tant que l'un des principaux agents de coagulation chez les plantes (Yin, 2010).

VI.4.4. L'influence de la dose de biofloculants sur la conductivité du filtrat

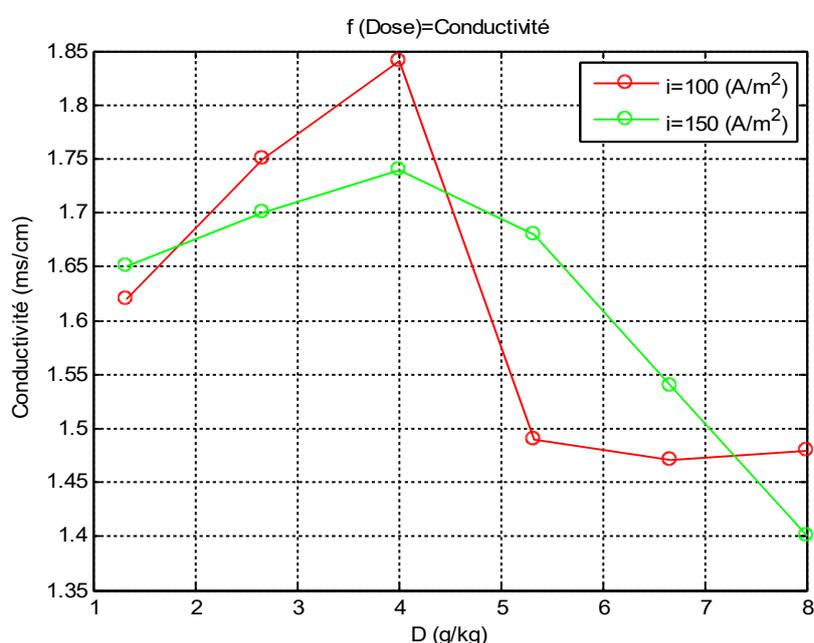


Figure VI.22 : L'influence de la dose de biofloculants sur la conductivité du filtrat.

La variation de la conductivité du filtrat en fonction de la dose de biofloculant est représentée sur la figure VI.22. Pour les deux courbes (densité de courant de 100 et 150 A.m^{-2}), deux parties peuvent être distinguées. Une partie ascendante observée dans l'intervalle de 1.33 à 4 g/kg, cette augmentation peut être expliquée par les éléments minéraux qui se trouvent dissous dans les cellules des tissus végétaux à l'état de sels d'acides minéraux tel que le fer, le sodium, le zinc, le magnésium.....etc (Smirnov et al, 1981), sans oublier la dissolution anodique suivie de la formation des boues métallique. La deuxième partie est décroissante, observée entre 4 et 8 g/kg. Le meilleur résultat pour les essais correspondant au densité de 150 A.m^{-2} égale 1.40 ms.cm^{-1} , il est obtenu avec l'ajout d'une dose de 8 g/kg, pour

les essais correspondant au densité de 100 A.m^{-2} trois meilleurs résultats sont obtenus sous forme d'une étape quasi-stationnaire ''1.49, 1.47, 1.48 $\mu\text{s.cm}^{-1}$ '' pour des dose de biofloculant de 5.33 à 8 g/kg. Ces résultats montrent une bonne efficacité de ce jus pour l'élimination des substances métalliques.

VI.4.5. L'influence de la dose de biofloculants sur le volume de filtrat

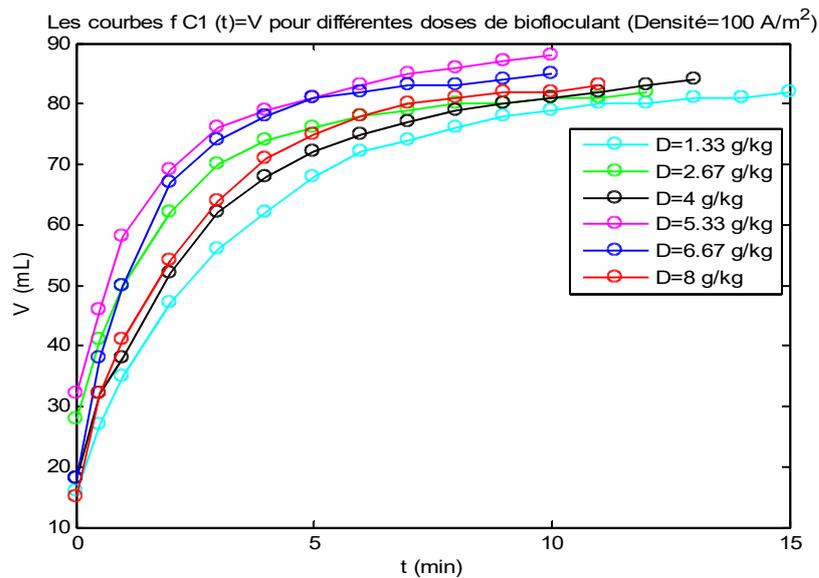


Figure VI.23 : L'influence de la dose de biofloculants sur V de filtrat ($i=100 \text{ A.m}^{-2}$).

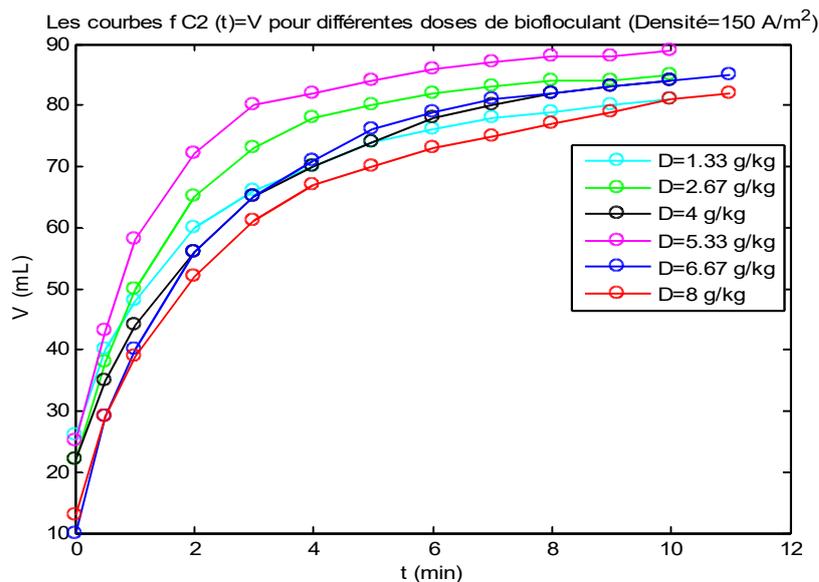


Figure VI.24 : L'influence de la dose de biofloculants sur V de filtrat ($i=150 \text{ A.m}^{-2}$).

Les figures VI.23, VI.24 représentent la variation du volume filtré (ml) au cours du temps (min) à différentes doses de biofloculant, où les échantillons sont conditionnés en appliquant des densités de 100 et 150 A.m⁻².

Pour le premier cas (les courbes obtenues par déshydratation des boues qui sont conditionnées en appliquant une densité de 100 A.m⁻²). le volume filtré maximal est de 88 ml après environ 10 min avec une dose de 5.33 g/kg.

Pour le deuxième cas (les courbes obtenues par déshydratation des boues qui sont conditionnées en appliquant une densité de 150 A.m⁻²). On remarque que le volume filtré atteint une valeur maximale de 88 ml après environ 10 min avec une dose de 5.33 g/kg MS en biofloculant, Nous remarquons aussi que pour les autres doses les volumes finaux et les débits de filtration convergent sur la même tendance dans l'intervalle de 0 à 11 min.

On constate que le conditionnement en utilisant le jus de cactus a permis de libérer le maximum d'eau liée aux particules en suspension dans un temps de filtration très réduit, car l'acide polygalacturonique qui provoque la neutralisation des particules colloïdales : il forme des ponts chimiques par l'intermédiaire des liaisons hydrogène ou l'interaction dipôle-dipôle entre les particules chargées et les groupes hydroxyles et carboxyles.

VI.5. L'influence du pH

Selon la littérature, le pH de la solution à traiter peut avoir une influence sur la qualité du traitement puisque celui-ci influence la stabilité des différentes espèces d'hydroxydes formées (Asselin, 2007). Ainsi il est important de savoir s'il est possible d'augmenter la siccité du gâteau. Dans le cas présent, on a fixé toutes les conditions initiales optimales, le temps d'électrolyse à 45 min, la dose de biofloculant à 5.33 g/kg. Mais en appliquant une faible densité de courant à 100 A.m⁻². Le pH est ajusté de 2 à 12 avec un pas de 2 afin de bien voir l'impact de nombreuses valeurs de pH. Cet ajustement est fait à partir d'une solution d'acide chlorhydrique (5N) ou d'hydroxyde de sodium (5N).

Les détails concernant les conditions opératoires et les résultats finaux sont donnés dans les Tableaux de l'annexe 4.

VI.5.1. L'influence du pH sur l'énergie consommée(W)

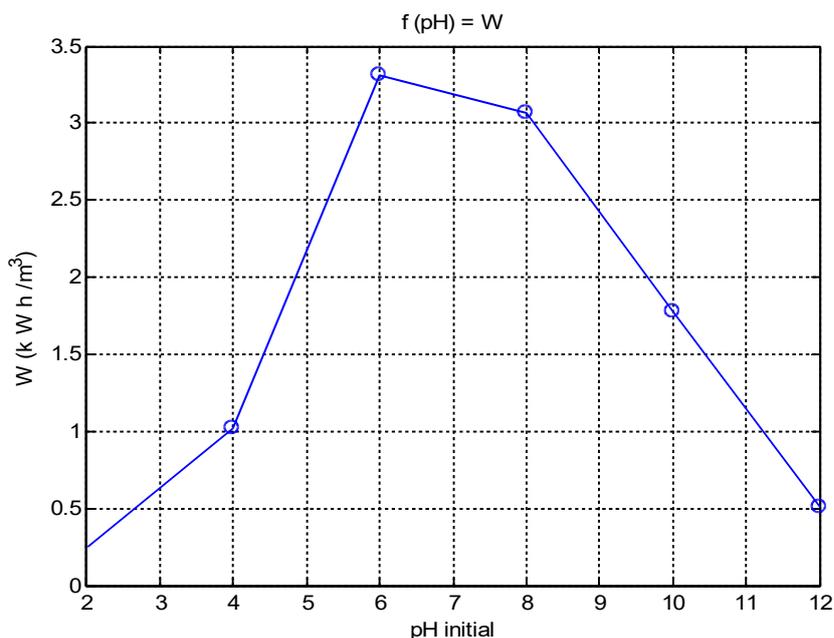


Figure VI.25 : L'influence du pH sur W.

La courbe présentée sur la Figure VI.25 rassemble les valeurs de l'énergie consommée en fonction du pH de traitement. Elle montre clairement deux zones distinctes :

La courbe est croissante pour un pH de 2 à 6 où elle atteint le maximum de 3.31 kWh.m⁻³, au delà de pH=6 une inflexion ou un changement de pente est observé, la courbe diminue avec l'augmentation du pH.

On peut justifier la faiblesse de la demande énergétique dans les échantillons acides par la dissolution anodique accélérée qui produit une quantité importante d'ions Fe²⁺, sans oublier les ions Cl⁻ de l'acide ajouté, ces deux ions sont responsables de l'augmentation de la conductivité (voir figure VI.26), ce qui entraîne une résistance de l'eau au passage du courant et une tension entre les électrodes faibles.

L'énergie consommée est aussi faible dans les cas où on a ajouté l'hydroxyde de sodium NaOH (milieu basique) en raison des ions Na⁺ qui ont augmenté la capacité de la boue à permettre le passage d'un courant électrique.

Par contre, à des pH neutres la conductivité est souvent plus faible, ce qui entraîne une augmentation de la demande énergétique.

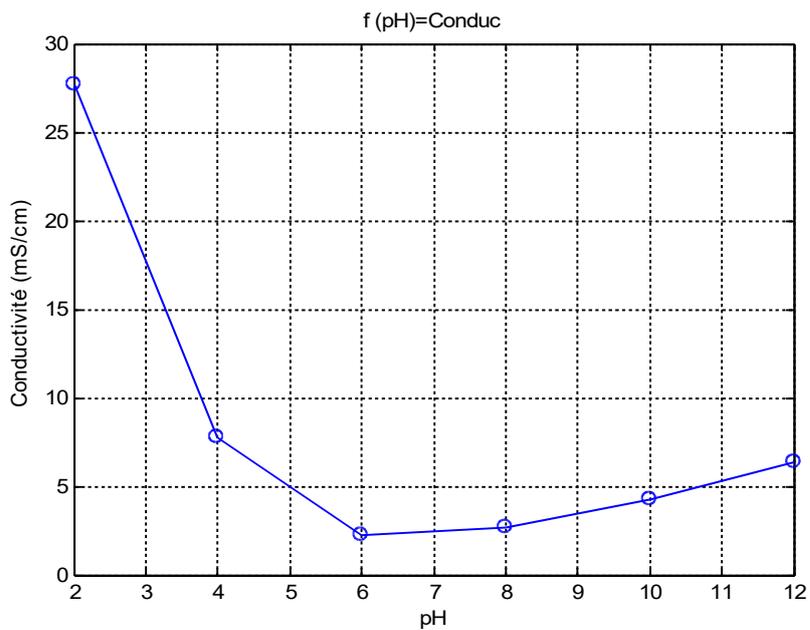


Figure VI.26 : Courbe de la conductivité en fonction du pH.

VI.5.2. L'influence du pH sur la siccité du gâteau (Sc)

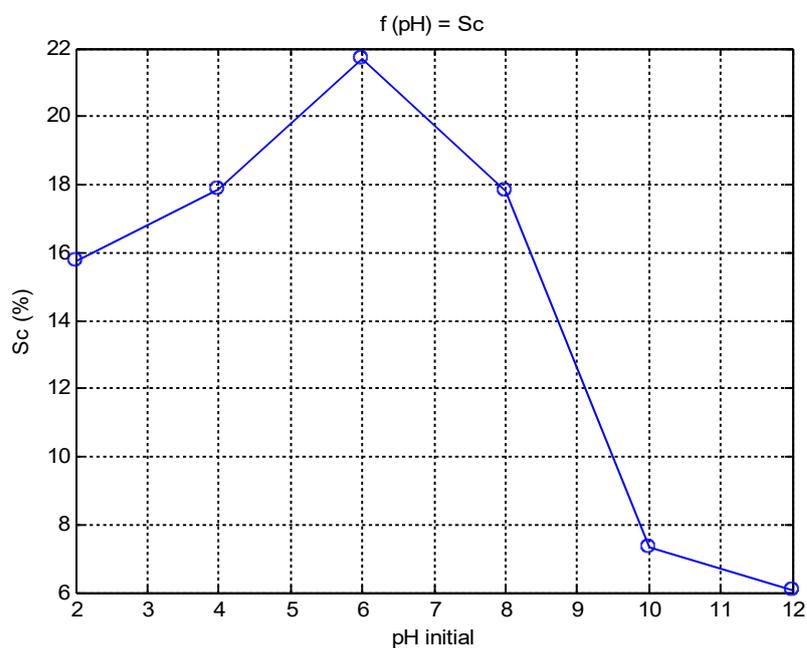


Figure VI.27 : L'influence du pH sur Sc .

La figure VI.27 présente la siccité de la boue en fonction du pH. La siccité du gâteau est maximale lorsque le pH est de '6', elle égale à 21.66 %, tandis que l'inverse est observé

lorsque la boue est acide ou basique. Dans le cas des échantillons basique les mauvaises siccités peuvent être liée au faite que la dissolution anodique est limitée. Mais dans l'autre cas malgré la dissolution accélérée de fer dans les milieux acides (voir figure VI.28) (Moreno-Cassilas et al, 2007). On a remarqué aussi une mauvaise siccité, les boues obtenues après électrocoagulation sont devenue comme une pâte visqueuse imperméable. Nous pensons que cette forme est liée à la présence des particules d'argile dans notre boue, qui est floclée et liées entre elles à cause des quantités importantes des ions métalliques Fe^{2+} et Fe^{3+} et d'autres ions métalliques Ca, Mg, K, Na, NH_4 , Mn, Cr, Ti, Al, Ba, Sr, ... (provoquent la liaison des micelles entre elles) (Folk, 1954), Ces cations métalliques assurent aussi les liaisons argiles-matière organique. Toute ces particules fixent l'eau par adsorption à leur surface, l'ensemble eau-argile devient plastique, puis visqueux, ils augmentent l'imperméabilité de la boue.

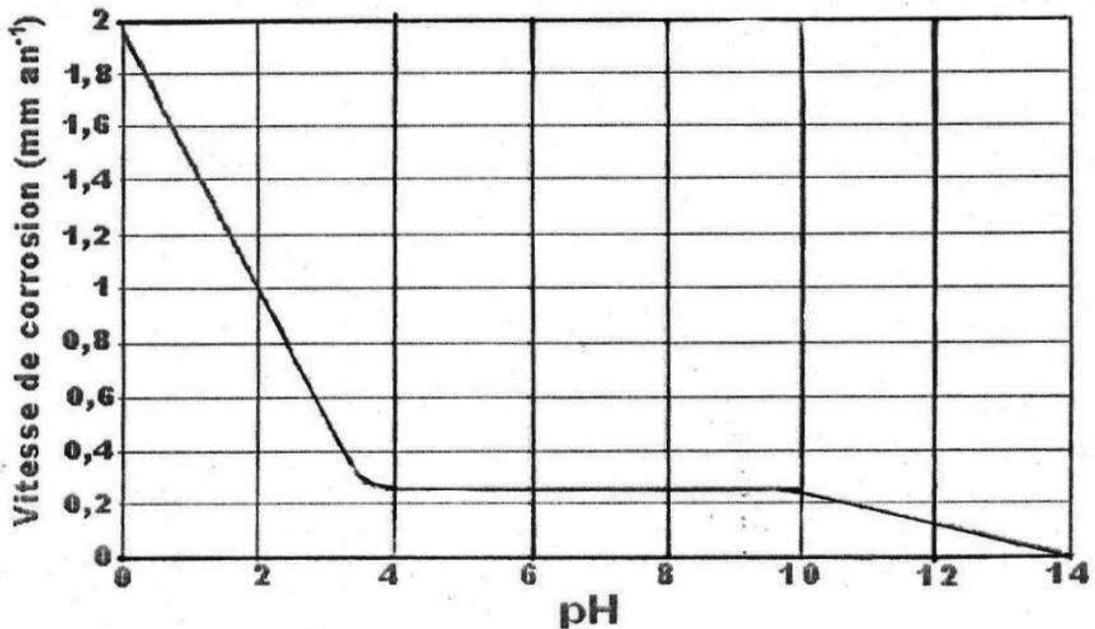


Figure VI.28 : Vitesse de corrosion du fer en fonction du pH
(Moreno-casillas et al, 2007).

VI.5.3. L'influence du pH sur la résistance spécifique à la filtration

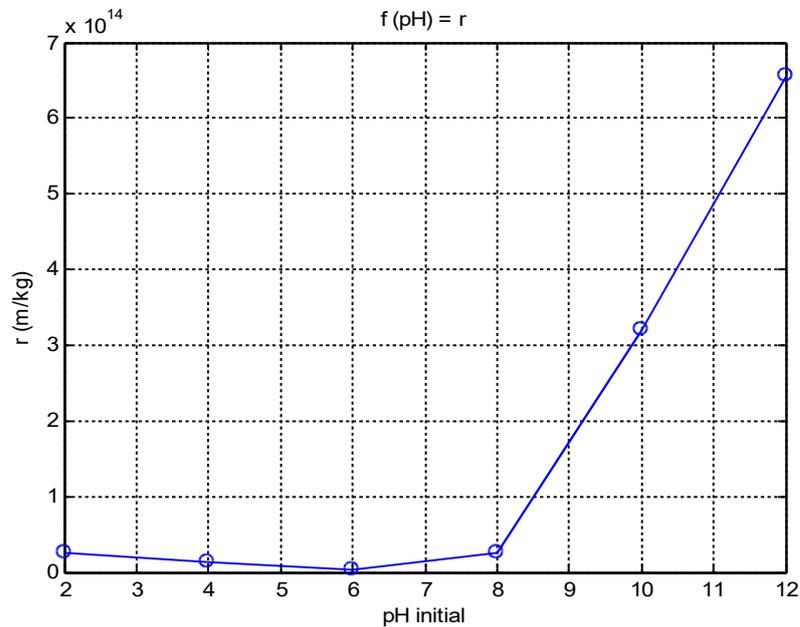


Figure VI.29 : L'influence du pH sur r.

La Figure VI.29 met en évidence l'influence du pH sur la résistance spécifique à la filtration r_p .

la courbe indique que r diminue tout d'abord jusqu'à un pH de 6 (près de la faible acidité de la boue brute) où elle semble minimale $r = 3,89 \times 10^{12}$, puis elle augmente rapidement avec les pH basiques, des résistances supérieures à 10^{14} sont enregistrées.

dans le cas de l'ajout de HCl, les gâteaux obtenus sont très visqueux d'une grande plasticité, ce qui complique la récupération de l'eau. De même, la basicité de la boue peut avoir un impact sur la production des différents hydroxydes, donc elle influe sur la floculation et la séparation solide-liquide (figure VI.30).

En général, le gain de r n'est pas important. Quelle que soit la valeur imposée du pH, au contraire l'ajustement influe négativement sur la déshydratation.



Figure VI.30 : Photos des boues obtenues après conditionnement pour différentes valeurs de pH, avec $i=100\text{A.m}^2$ et $T=45\text{min}$.

VI.5.4. L'influence du pH sur le volume de filtrat

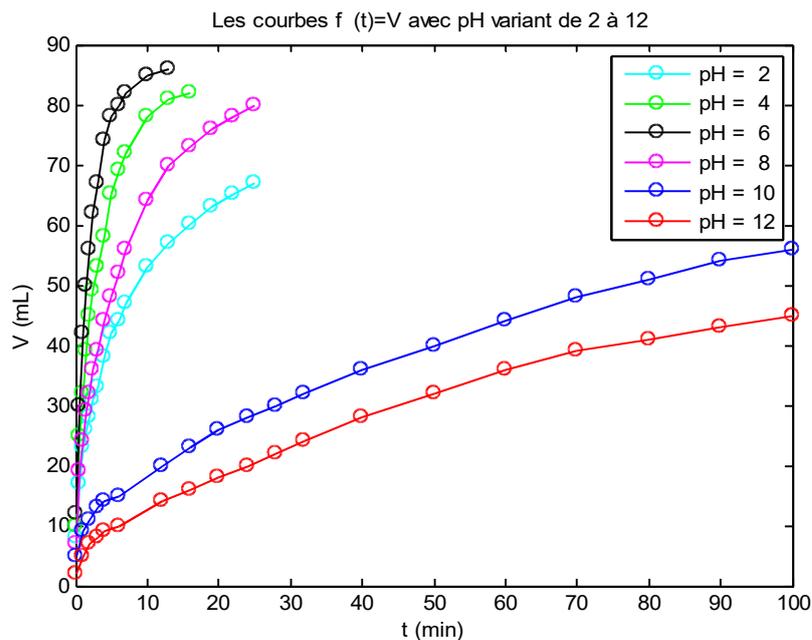


Figure VI.31 : L'influence du pH sur le volume de filtrat V.

La Figure VI.31 représente les courbes de filtration obtenues en fonction du temps pour des valeurs du pH imposées.

On peut remarquer que la reproductibilité de l'opération semble insatisfaisante que se soit le pH acide ou basique, Les volumes de filtrat pour un pH de 2 à 8 ont été récoltés après une

durée de 13 à 25 min, ils sont comparables : 67, 82, 86, 80 ml, le volume maximal correspond à un pH près de l'acidité initiale de la boue brute. Les volumes de filtrat pour un pH très basique '10 et 12' augmentent d'une manière équivalente avec une longue durée de filtration de 100 min.

Il est inutile d'ajouter du HCl ou du NaOH au mélange boue-cactus, car les performances de la déshydratation ne sont plus améliorées.

VI.6. Synthèse des résultats

Les expérimentations décrites dans ce chapitre nous ont permis d'étudier les conditions optimales et les paramètres influant le conditionnement et la déshydratation des boues résiduelles de la STEP de Béni-Messous. Les tests de conditionnement ont été faits par un procédé combiné, l'électrocoagulation avec l'ajout d'un biofloculant (jus de cactus).

La première partie des essais permet d'avoir une idée sur les performances de l'électrocoagulation à différentes densités de courant, les résultats présentent des valeurs optimales pour une densité de 250 A.m^{-2} , où on a obtenu une siccité de 24.19 %, et une résistance spécifique à la filtration de $1.47 \times 10^{13} \text{ m.kg}^{-1}$ pour un temps d'électrolyse de 15 min.

Dans la deuxième partie des essais, nous avons essayé d'améliorer les mauvais résultats correspondant aux faibles densités en augmentant le temps d'électrolyse, afin de limiter les pertes énergétique inutiles, la siccité et la résistance spécifique n'ont pas été améliorées, excepte pour $i = 200 \text{ A.m}^{-2}$. Nous avons pu conclure que 45 min est le temps d'électrolyse optimal. L'application d'une densité de courant de $i = 200 \text{ A.m}^{-2}$ pendant 45 min montre des résultats intéressants : une siccité de 25.23 %, une résistance spécifique de $6.29 \times 10^{12} \text{ m.kg}^{-1}$. Mais cette importante densité entraîne une consommation énergétique très élevées ' $W = 14.07 \text{ kWh.m}^{-3}$ ', ce qui compte un inconvénient du point de vue économique, même la production métallique est élevée ' $CFe = 0.64 \text{ g.l}^{-1}$ '.

Pour la troisième partie des expériences, on a utilisé le jus de cactus en combinaison avec l'électrocoagulation, l'objectif de cette partie est d'estimer la meilleure dose de biofloculant qui peut améliorer l'électrocoagulation (augmenter Sc et diminuer r) en appliquant des faibles densités de courant '100 et 150 A.m^{-2} ' afin d'éviter la consommation élevée de l'anode et diminuer la demande énergétique.

Nous avons opté pour une durée optimale de $t = 45 \text{ min}$ comme un paramètre constant, pour chaque densité et nous avons travaillé pour des doses de jus de cactus variant de 1.33 à 8 g/kg

MS.

Le biofloculant utilisé permet d'obtenir des résultats importants, une siccité de 24.30 % et une résistance spécifique de $2.04 \times 10^{12} \text{ m.kg}^{-1}$, un volume de filtrat de 88 ml durant 10 min, lors de l'ajout d'une dose de 5.33 g/kg MS et sous une densité de 100 A.m^{-2} .

Par l'ajout de la même dose '5.33 g/kg' dans le cas de $i=150 \text{ A.m}^{-2}$, on a obtenu des résultats intéressants qui sont les plus optimums pendant toute cette étude. La siccité est de 25.88 % et $r = 1.32 \times 10^{12} \text{ m.kg}^{-1}$, le volume de filtrat est de 89 ml durant 10 min.

Ces derniers résultats sont les plus favorable car l'énergie consommée est de 9 kWh.m^{-3} , la valeur de la résistance spécifique à la filtration permettent d'obtenir une boue solide.

Ce biofloculant a montré aussi un effet très significatif sur l'abattement de la turbidité.

Quelque soit la densité de courant appliquée, ce biofloculant permis de réduire la turbidité du filtrat, en passant de 60 NTU (turbidité du filtrat sans conditionnement) à des valeurs au dessous de 10 NTU.

La dernière série des expériences traite de l'impact du pH en essayant de favoriser le procédé combiné avec une faible densité de courant de 100 A.m^{-2} , où nous avons fixé toutes les conditions initiales optimales : le temps d'électrolyse à 45 min, la dose de biofloculant à 5.33 g/kg, le pH est ajusté de 2 à 12 avec un pas de 2. Nous avons remarqué que le meilleur résultat est enregistré à un pH de 6 (qui est près de la faible acidité de la boue brute '6.36'), donc il est inutile d'ajuster le pH de la boue avant le traitement.

Conclusion générale

Le développement des activités humaines s'accompagne inévitablement d'une production croissante de rejets polluants, Le traitement des eaux usées est un processus très important pour la vie quotidienne des habitants des villes et du monde rural. On effectue l'épuration des eaux usées non seulement pour protéger la santé de la population et éviter les maladies contagieuses, mais aussi pour protéger l'environnement. Les boues d'épuration représentent la part principale des résidus issus des opérations de traitement des eaux usées. Leur devenir constitue un enjeu fondamental de la politique d'assainissement et de protection de l'environnement.

Devant la quantité croissante des boues produites, et face à la difficulté que rencontrent les stations d'épuration pour évacuer ces boues vers les décharges, il devient nécessaire d'améliorer le conditionnement et la déshydratation pour diminuer le volume total des boues afin de réduire leur coût d'évacuation et rendre leur transfert fiable et sans risque environnemental.

Cette étude contribue à améliorer les connaissances dans le domaine du conditionnement des boues résiduaires d'épuration dont l'étude a été faite sur les boues de la station d'épuration des eaux usées urbaines de Béni-Messous. Un acquit important de ce travail est la mise au point d'un procédé combiné, l'électrocoagulation avec l'ajout d'un nouveau biofloculant extrait du cactus algérien L'aptitude de la déshydratation a été examinée par une filtration sous vide. Par ailleurs, ce présent travail propose aussi deux possibilités, la première est la réduction de l'énergie consommée par l'électrocoagulation et la deuxième est la valorisation d'un produit algérien qui est une plante naturelle.

Afin de répondre à ces objectifs, un plan expérimental a été conçu. Il s'agit d'un plan à quatre niveaux dont les quatre variables sont la densité de courant, le temps d'électrolyse, la dose de biofloculant et le pH. L'interprétation des résultats se base sur le traitement de deux plans différents. D'une part, la caractérisation du gâteau qui fournit des informations sur la performance du conditionnement et de la déshydratation (la siccité 'Sc' et la résistance spécifique à la filtration 'r'). D'autre part, l'analyse du filtrat permet de déterminer la qualité de l'eau récupérée (le pH, la conductivité, la turbidité et le volume du filtrat).

D'après les résultats de la première partie des essais, nous constatons qu'une application d'une densité de 250 A.m⁻² suivie d'une filtration d'un quart d'heure sous une pression de 0.5

bar, aboutit à la formation d'un gâteau dont la siccité est de 24.19%, les tests de filtration montre que la meilleur RSF ' $r=1.47 \times 10^{13} \text{ m.kg}^{-1}$ ' est liées à la même densité avec un filtrat de 90 ml. En revanche, il faut noter que l'application de cette densité engendre une énergie consommée défavorable de 7.14 kWh.m^{-3} .

Les essais du deuxième plan, sont effectués en imposant de densités inférieures à 250 A.m^{-2} pendant des périodes de 15 à 90 min avec un pas de 15 min. Il a été observé que 45 min est toujours la meilleur durée, en ce qui concerne le résultat optimal ($Sc = 25.23\%$ et $r = 6.29 \times 10^{12} \text{ m.kg}^{-1}$) ont été obtenu à une densité de courant de 200 A.m^{-2} , mais l'énergie consommée n'a pas été limitée ' $P=14.07 \text{ kWh.m}^{-3}$ ', elle est très importante en raison de l'imposition de courant pendant une longue durée.

La troisième partie concerne l'introduction du biofloculant (le jus de cactus) en combinaison avec l'électrocoagulation, Ce procédé combiné permet d'obtenir des résultats intéressants et satisfaisants lors de l'ajout d'une dose de jus de cactus à raison de 5.33 g/kg MS et sous une densité de courant de 150 A.m^{-2} pendant 45 min, la siccité du gâteau est de $Sc=25.88 \%$, le calcul de la RSF, montre que ces conditions opératoires entraînent une résistance très faible à la filtration (optimale) ' $r = 1.32 \times 10^{12} \text{ m.kg}^{-1}$ ', signifiant que la perméabilité du gâteau est plus grande. De même pour les analyses du filtrat où on a obtenu un volume important de 89 ml durant 10 min, mais la valeur optimale de la turbidité de 6 NTU est due à une dose plus importante, soit 8 g/kg MS , c'est pour cela qu'on a conclu que ce jus de cactus est plus efficaces pour la floculation des particules très fines. Il semble donc qu'une dose de 5.33 g/kg MS de biofloculant utilisé peut être efficace en combinaison avec l'électrocoagulation pendant 45 min malgré l'application de faibles densités. Ces résultats sont les plus favorables car l'énergie consommée est relativement faible ' $W = 9 \text{ kWh.m}^{-3}$ ' par rapport à celle obtenue sans ajout de biofloculant avec le couple de conditions opératoires ' $i = 200 \text{ A.m}^{-2}$, $T = 45 \text{ min}$ ' qui égale de 14.07 kWh.m^{-3} . Donc grâce à l'intervention du biofloculant une énergie de 5.07 kWh.m^{-3} a été économisée et la résistance spécifique à la filtration est passée de $6.29 \times 10^{12} \text{ m.kg}^{-1}$ à $1.32 \times 10^{12} \text{ m.kg}^{-1}$.

Ainsi les boues conditionnées par ce procédé combiné : électrocoagulation/ ajout de biofloculant donne une bonne déshydratation et permet d'obtenir des boues solides : siccité > 25% et $r \approx 10^{12} \text{ m.kg}^{-1}$ (degrémont, 2005).

générale

Enfin, il est important de noter que la dernière partie des essais montrent qu'il est inutile d'ajuster le pH initial de la boue parce qu'on a remarqué que le meilleur résultat est enregistré à un pH près de la faible acidité de la boue brute (pH initial).

Introduction générale

L'assainissement des eaux usées est devenu au cours de ces dernières années un enjeu considérable pour les sociétés actuelles ; d'une part pour assurer un service de l'eau visant la collecte et l'épuration des eaux usées et d'autre part, pour protéger notre environnement.

Quelque soit le système d'épuration adopté, le traitement des eaux usées s'accompagne d'une production de quantités de boues résiduelles non négligeables dont il faut se débarrasser.

Diverses possibilités permettent de se débarrasser de ces boues telles que l'incinération la mise en décharge et la valorisation agricole, mais avant l'évacuation de ces boues vers la destination finales, il faut réduire leur volume par déshydratation afin de faciliter leur manipulation, minimiser les opérations de manutention et diminuer le coût de transport.

Les procédés de déshydratation ont pour objectif de faire passer la boue de l'état liquide à une consistance plus solide, la boue peut être difficilement déshydratée et doit être conditionnée pour améliorer la récupération de l'eau. On regroupe sous le terme de conditionnement, les différentes opérations permettant la floculation et la rupture de la dispersion colloïdale.

La présente recherche vise à améliorer le conditionnement des boues résiduelles d'une station d'épuration par un procédé électrochimique 'électrocoagulation' en combinaison avec un nouveau biofloculant extrait du cactus algérien. Nos objectifs scientifiques sont d'économiser l'énergie électrique et d'étudier l'effet de : " la densité de courant, le temps d'électrolyse, l'ajout de différentes dose de jus de cactus, l'ajustement du pH" lors de l'application du procédé combiné afin d'augmenter la siccité du gâteau 'Sc' (la boue obtenu après déshydratation), et diminuer la résistance spécifique à la filtration 'r'. Ce présent travail rentre aussi dans le développement durable des ressources naturelles de notre pays car il étudie la possibilité d'utiliser le jus de cactus algérien comme un biofloculant.

Le mémoire comporte six chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la description des divers procédés d'épuration des eaux usées pour les deux filières eaux /boues, et la présentation des origines de ces boues, ainsi que leur caractéristiques physico-chimiques.

Les processus de conditionnement et de déshydratation des boues sont évoqués dans le deuxième chapitre. Il s'agit d'une énumération des différentes techniques les plus utilisées de

ces processus, tout en soulignant les avantages et les inconvénients de chaque mode de déshydratation mécanique.

Le troisième chapitre porte sur l'électrocoagulation et ces avantages et inconvénients ainsi que les réactions impliquées dans cette technologie, et il est consacré à la présentation des principaux paramètres influençant ce procédé.

Le chapitre quatre est consacré à une revue bibliographique portant sur le cactus *Opuntia*, *ficus-indica*. Nous exposons l'origine, la diffusion et la composition chimique de cette plante, la suite du chapitre se concentre sur leur importance économique et écologique et nous nous sommes focalisés plus particulièrement à présenter l'utilisation du cactus dans le domaine de l'épuration des eaux.

La station d'épuration des eaux usées de Béni-Messous d'où les échantillons de la boue étudiée ont été prélevés et présentés dans le cinquième chapitre, où on a présenté aussi l'ensemble des dispositifs expérimentaux et des méthodes utilisés tout au long de ce travail. Les deux dispositifs expérimentaux sont le montage d'électrocoagulation et la cellule de filtration sous pression.

Le cinquième et dernier chapitre englobe les résultats obtenus ainsi que les interprétations et les discussions relatives à ceux-ci.

Le travail se termine par une conclusion générale rassemblant l'ensemble des résultats ouvrant la discussion sur les perspectives de cet axe de recherche.

Références bibliographiques

Abid A, Zouhri A, Ider A et Kholtei S (2009), Valorisation d'un nouveau bio floculant (extrait de cactus) dans le traitement physico-chimique des rejets liquides chargés en cuivre, en zinc et en matière en suspension, *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 12 N°2 (2009), p 321 – 330.

Abid A, Zouhria et Ider A (2008), Utilisation d'un nouveau bio-floculant extrait du cactus marocain dans le traitement des rejets chargés de chrome (VI) par le procédé de coagulation floculation, *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 11 N°2 (2008), p 251 - 257.

Anon F (1996), Electroflocculation : removal of oil, heavy metals and organic compounds from oil-in-water emulsions. *Filtr .Sep*, 33(4), p 295-303.

Aoudjehane M, Rezzouk M, Kellil A, Aurelle Y, Guigui C (2010), Étude comparative de l'électrocoagulation et de la coagulation floculation vis-à-vis de la déstabilisation d'une émulsion d'huile de coupe, *Revue des Sciences de l'Eau* Vol. 23 N°1(2010), p 17-30.

Asselin M (2007), Utilisation de l'électrocoagulation le traitement des eaux usées industrielles chargées en matière organique, Mémoire pour l'obtention du grade de maitre ès Sciences (M.Sc), Université du Québec, p 35, 41,82, 92.

Baes C F, Mesmer, R E (1976). *The hydrolysis of cations*. Wiley, New York, p 496.

Ben-Aïm, R (2000), "Qu'est-ce qu'une boue ? D'où viennent les boues ?," Actes Du Colloque Les Boues. Quels Enjeux? Quelles Solutions ?, Pau, France, p 23-24.

Benkaddouri A (2011), Etude des huiles essentielles de l'Opuntia ficus-indica, Région de Mascara, Mémoire pour l'obtention du diplôme de Magister en Chimie, Université d'Oran, Faculté des Sciences, Département de Chimie, p 11, 14.

Bureau M A (2004), Stabilisation et traitement électrochimique des boues d'épuration municipales et industrielles, docteur a l'université du Québec ; eau terre et environnement, p 10, 15, 22.

Chen G (2004), Electrocoagulation technologie wasterwater treatment. *Sep. Purif. Technol*, p38-41.

Degrémont (2005), *Mémento Technique de L'eau ; Deuxième édition ; (Tome 1 et Tome2)*, Ed : Lavoisier technique et documentation, Paris, France, p 534, 537, 1255.

-
- Degrémont** (1989), Mémento technique de l'eau , Ed : Lavoisier – Technique et Documentation ,Paris , France
- DemimS** (2007), Traitement de l'ultrafiltrat de margine par combinaison de l'électrocoagulation et de la boue activée », Mémoire de Magister, école nationale polytechnique d'Alger, p 32.
- Dey P M et Brinson K** (1984). Plant cell walls. *Advances in Carbohydrate Chemistry and Biochemistry*, p 265, 382.
- Diaz A** (1999) "A preliminary evaluation of turbidity removal by natural coagulants indigenous to Venezuela", Birmingham University.
- Dihang M D**, (2007), Mécanismes de coagulation et de floculation de Suspensions d'argiles diluées rencontrées En traitement des eaux. *Genie des Procédés et de l'Environnement*, Université Paul Sabatier, Toulouse III, France.
- Eckenfelder** (1982), Traduit de l'américain par Vandevenne.L , *Gestion des eaux usées urbaines et industrielles, Caractérisation-Techniques d'épuration-Aspects économiques*, Edi : Lavoisier technique et documentation, France, p 24-199.
- Edelin F** (1985), L'épuration physico-chimique des eaux, théorie et technologie, Ed : cebedoc s.p.r.l, Liège, Belgique, p 93.
- Emilian K** (2004), *Traitement des Pollutions Industrielles: Eau. Air. Dechets. Sols. Boues* Ed: Dunod, P 116.
- Felker B** (1995), Résultat d'un essai sur l'alimentation du mouton en période de disette fourragère au centre d'Oussetta, Tunis, FAO, Projet TUN, p 176.
- Feugang J M, Konarski P, Zou D, Stintzing F C et Zou C** (2006). Nutritional and medicinal use of Cactus pear (*Opuntia* spp.) cladodes and fruits. *Frontiers in Bioscience* 11, p 2574-2589.
- Florian C S et Reinhold C** (2005), Cactus stems (*Opuntia* spp.): A review on their chemistry, technology, and uses. *Mol. Nutr. Food Res*, p 49.
- Folk R L** (1954). The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary-rock nomenclature. *Journal of Geology*, Vol 62, p 344-359.
- Gaid A** (1985), *Epuration biologique des eaux usées urbaines* Edition Office des publications universitaires (Alger).

- Ghernaout D** (2008), Elimination des substances humiques et des germes indicateurs de contamination bactériologique par électrocoagulation assistée d'un traitement magnétique de l'eau». Thèse de doctorat, université Saâd Dahlab de Blida, Algerie.
- Grandjean B** (2010), Cours Assainissement industriel ,Département de génie chimique Université Laval, Canada.
- Guibelin Eric**(1999), Lutte contre la pollution des eaux, traitement des boues d'épuration, Revue Technique de l'ingénieur. Environnement, Vol G1 N°G1450, Paris, France.
- Guy Altan M** (2003), les boues d'épuration et leurs perspectives de gestion en Ile-de-France , au nom de la commission agriculture, environnement, Ruralité adopté par le CESR, p10, 136.
- Habibi Y** (2004), Contribution à l'étude morphologique, ultra-structurale et chimique de la figue de Barbarie, les polysaccharides pariétaux : caractérisation et modifications chimiques. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Faculté Sciences et Géographie (Grenoble I) France et Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences (Semlalia, Marrakech) Maroc.
- Hadj-Kouider Saida** (2011), Caractérisation et traitement des boues d'épuration de la région d'Alger, thèse de magistère, université Saad Dahlab de Blida, Département de chimie industrielle, Algerie.
- Holt PK, Barton G W, Wark M, Mitchell C A** (1999), Electrocoagulation as a wastewater treatment», The Third Annual Australian Environmental Engineering Research Event, p 23-26.
- Holt PK, Barton G W, Wark M, Mitchell C A** (2002), A quantitative comparaison between chemical dosing and electrocoagulation, Colloids and Surfaces A : physicochemical Engineering Aspects 211, p 233, 248.
- Ibanez J G, Singh M H et Szafrá Z** (1998), Laboratory experiments on electrochemical remediation of the environment, Part 4: color removal of simulated wastewater by électrocoagulation- électrolocation. J. Chem. Educ, p 75, 1040, 1041.
- Jarde E** (2002), composition organique de boues résiduaires de station d'épuration lorraines : caractérisation moléculaire et effets de la biodégradation. Thèse de doctorat Université Henri Poincaré Nancy, p 286.
- Jingdong Zhang, Fang Zhang, Youhong Luo, Hong Yang** (2006), "A preliminary study on cactus as coagulant in water treatment", vol 41.

- Ju-Zhen Y, Li-Ming Z** (2008), Removal of methylene blue dye from aqueous solution by adsorption onto sodium humate/polyacrylamide/clay hybrid hydrogels, *Bioresource Technology*, p 99.
- Kobya M, Dermirbas E, Dedili A, Sensoy M T** (2010), treatment of rinse water from zinc phosphate coating by batch and continuous electrocoagulation process .*Journal of Hazardous Materials*, p 173.
- Léonard A** (2002), Convectif de boues de station d'épuration, Thèse pour l'obtention du grade de docteur en sciences appliquées, Université de Liège, p2, 4, 5, 6, 12, 14.
- Lotito, V, Mininni, G et Spinoso L** (1990), "Models of sewage sludge conditioning," *Wat. Sc. Tech*, p 22.
- Miller SM, Fugate E J, Craver VO, Smith J A, Zimmerman J B** (2008), Toward understanding the efficacy and mechanism of *Opuntia* spp. as a natural coagulant for potential application in water treatment. *Environmental Science Technology*, vol. 42, p 4274-4279.
- Moatamri N** (2003), De l'analyse du pilotage d'un décanteur centrifuge à son instrumentation, thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Industries Agricoles et Alimentaires, p 14.
- Mollah M Y A, Schennach R, Parga J R et Cocke D L** (2001) Electrocoagulation (EC).Science and application.*Journal of HaZardous Materials B84* , p 29-41.
- Monjauze A et Le Houerou H.N** (1965) Le role des *Opuntia* dans l'économie agricole nord africaine, *Bultin de l'Ecole Nationale Superieur d'Agriculture de Tunis* 8-9, p 85-164.
- Moreno-Cassilas HA, Cocke DL, Gomes JAG, Morkovsky P, Parga JR, Peterson E** (2007), Electrocoagulation mechanism for COD removal. *Sep. Purif. Technol.* 56, p 204-211.
- Moulin S, Rozen-Rechels D, Stankovic M** (2013), Traitement des eaux usées, 'Cours Atelier L'eau Qualit vs Quantit, Ecole Normale. p 3.
- Navas A, Bermudez A et Machin J** (1992), influence of sewage sludge application on physical and chemical properties of gypsisols, p 87-135.
- Nazareno M A. et González E** (2008), Antioxidant Properties of Cactus products, *Cactusnet*, Issue 11, p 18-28.
- Nefzawi A et Chermitti A** (1991), Place et rôle des arbustes fourragères dans les parcours des zone semi-arides de la Tunisie, Ed le CIHEAM, p 119,125.

-
- Perez F S** (2009). Etude de la biodégradabilité de boues secondaires soumises à un traitement thermique à 65°C et du couplage digestion anaérobie et digestion aérobie pour la réduction de boues. Thèse doctorat en Génie des Procédés de l'environnement, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.
- Persin F, Rumeau M** (1989), Le traitement électrochimique des eaux et des effluents, tribune de l'eau, p 45,56.
- Picard T** (2000), Contribution à l'étude des réactions aux électrodes en vue de l'application à l'électrocoagulation, thèse de doctorat, universités de Limoges.
- Saenz C** (2000). Processing technologies: an alternative for cactus pear (*Opuntia spp.*) fruits and cladodes. *Journal of Arid Environments*, p 46, 209, 225.
- Saenz C. (2002)**. Cactus pear fruit and cladodes: a source of functional components for foods. *Acta Hort* 581, p 253, 263.
- Satin M et Selmi B** (1999), Guide technique de l'assainissement, Ed : Le moniteur, p 490, 477.
- Schweizer M** (1997), Docteur Nopal, Le médecin du bon dieu. Edition APB (Aloe Plantes et Beauté). Paris (France), p 5-10.
- Selhani Soumia** (2009), Etude des possibilités d'utilisation des eaux et boues d'épuration, mémoire de fin d'étude d'ingénieure en hydraulique (ENSP).
- Smirnov P, Mouravin E, Storojentao, Rdipov N** (1981), *Agrochimie*, Ed MIR, Moscou, p 15-33.
- Treybal, R E** (1981), *Mass Transfer-Operations*, 3rd Ed, MC Graw-Hill, New York.
- Trong M D** (1999), Mise au point du fonctionnement d'un réacteur pilote à anode en lit fluidisé pour les traitements des effluents industriels par oxydation électrochimique, Thèse de maîtrise, Université de Moncton, Canada.
- Valentin N** (2000), Construction d'un capteur logiciel pour le contrôle automatique du procédé de coagulation en traitement d'eau potable. Thèse de Doctorat à l'Université de Technologie de Compiègne, France.
- Xinhua X** (2004) treatment of refractory oily wastewater by electrocoagulation process, *Chemospher*.

Yin, CY (2010), Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. *Process Biochemistry*, vol. 45, p de1437, 1444.

Zongo I (2009), Etude expérimentale et théorique du procédé d'électrocoagulation : Application au traitement de deux effluents textiles et d'un effluent simulé de tannerie, Thèse de Doctorat l'institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement d'Ouagadougou, Burkina Faso, p19, 32.

Sites Web

(a) : Atlas Infrastructure & Resources (2013), Water Treatment – Electrocoagulation (EC), <http://www.airglobalenergy.com/water-treatment-electrocoagulation>.

(b) : Communauté de Communes Val Vert du Clain (2007), Fonctionnement de la décanteuse centrifugeuse, <http://www.deshydratation-boues.com/processus.phtml>.

(c) : FLS midth Dorr-Oliver Eimco GmbH (2014),_filtres à tambour sous vide, <http://www.directindustry.fr/prod/flsmidth-dorr-oliver-eimco-gmbh/filtres-tambour-sous-vide-62016-1488901.html>.

(d) : Google Maps (2014), <https://www.google.dz/maps/@36.7869181,2.9052676,15z>.

(e) : Hellopro (2014), Filtre-presse a boues, <http://www.hellopro.fr/filtre-presse-a-boues-2006965-957517-produit.html>.

(f) : Huber Technology (2014), Filtre à bande / pour traitement de boue, <http://www.directindustry.fr/prod/huber-technology/filtres-presses-bandes-traitement-boue-69228-546638.html>.

(g) : Josef .PM (2011), Station d'épuration, Version francophone du schéma d'une STEP. <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:HSAA.jpg>.

(h) : Josef .PM (2012), fonctionnement d'une usine de dépollution, schéma de principe, Version francophone du schéma. <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:ESQUEMPEQUE.jpg>.

(i) : Orwa C, Mutua A, Kindt R ,Jamnadass R, & Simons A (2009), Agroforestry Database: a tree reference and selection guide version 4.0, <http://www.worldagroforestry.org/af/treedb/>.

(j) : Western Oregon University (2014), Pourbaix Diagram, <http://www.wou.edu/las/physci/ch412/pourbaix.htm>.

(k) : Wikipedia (2014), Diagramme de Pourbaix,
http://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_de_Pourbaix.

Je dédie ce travail à

Ma famille

Surtout

À mes parents, merci beaucoup, cette thèse est la vôtre

*Merci pour votre soutien, votre aide, votre patience et surtout
votre amour*

À Mes frères

À Mes sœurs

À mes amis et mes collègues de la promo

Remerciement

Je remercie avant tout Allah tout puissant, de m'avoir guidé toutes ces années d'études et de m'avoir donné la volonté, la patience, la santé, le courage pour terminer ce travail.

Mes vifs remerciements et mes sincères reconnaissances à ma promotrice Mme Anser M pour avoir accepté de diriger ce travail, pour la confiance, ses précieux conseils et sa disponibilité tout au long de la réalisation de ce mémoire.

J'exprime mes profonds remerciements et ma reconnaissance à monsieur Bensafia D, le chef de département de science de l'eau et de l'environnement, et Mme Bensafia de m'avoir accueilli et procuré tous les moyens nécessaires au bon déroulement de mes travaux expérimentaux au sein de laboratoire du traitement des eaux.

Ainsi je tiens à exprimer mes vifs remerciements à monsieur Aouabed A, Professeur au département de chimie industrielle, pour son aide, et de nous fournir le matériel de la filtration sous vide.

J'adresse mes remerciements aux personnels et à toute l'équipe de la Station d'Épuration des eaux usées de Béni-Messous pour leur aide précieuse.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance sincère à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation, et aux membres du jury, qui ont accepté d'évaluer ce travail.

A toutes les personnes, qui ont contribué de loin ou de près à la progression de mon travail.

ملخص

هذا العمل يتعلق بدراسة تكييف حمأة المجاري الناتجة من محطة معالجة مياه الصرف الصحي لبني مسوس، عصير صبار جزائري من نوع اوبنتيا فيكيس أنديكا قد استعمل كمُكَبِّل حيوي بالإدماج مع طريقة كهروكيميائية (التخثير الكهربائي)، القدرة على ترشيح الماء فحصدت بطريقة التصفية "تحت فراغ". الهدف من هذا العمل هو تحسين التكييف بالتخثير الكهربائي، بتخفيض الطاقة الكهربائية المستهلكة، والحد من استهلاك الأقطاب الحديدية، بإضافة جرعة مثلى للمُكَبِّل الحيوي. تم تقييم أداء العملية بقياس جفاف الكعكة "Sc" والمقاومة المحددة للترشيح "r"، تركيز دراستنا على: تأثير كثافة التيار، مدة التكهرب، إضافة جرعات مختلفة من المُكَبِّل الحيوي وكذلك تعديل الـ **pH**.

تغيرات المعايير العملية خلال التخثير الكهربائي تبين أن المردود الأمثل يتم التحصل عليه من أجل كثافة تيار 150 أمبير.م² ومدة تكهرب 45 دقيقة، جرعة 5.33 غ/كغ من المُكَبِّل الحيوي، مع **pH** الحماية الخامة) الـ **pH** الابتدائي (بهذه الشروط جفاف الكعكة يتغير من 12.38% إلى 25.88%، والمقاومة المحددة للترشيح من 5.4×10^{13} م.كغ⁻¹ إلى 1.32×10^{12} م.كغ⁻¹. كما أن حجم الماء الراشح قدرب 89 مل خلال 10 دقائق من الترشيح. الطاقة المستهلكة منخفضة نسبياً **W=9** كيلووات ساعي.م³، إضافة المُكَبِّل الحيوي سمحت باقتصاد طاقة قدرت بـ 5.07 كيلووات ساعي.م³ مقارنة مع التخثير الكهربائي بكثافة تيار 200 أمبير.م² دون إضافة المُكَبِّل الحيوي. شروط التكييف الجيدة تسمح بتحصيل حمأة صلبة.

الكلمات المفتاحية: حمأة المجاري، التخثير الكهربائي، تكييف، ترشيح، المقاومة المحددة للترشيح، جفاف، اوبنتيا فيكيس أنديكا، مُكَبِّل حيوي.

Résumé

Ce travail concerne l'étude du conditionnement des boues résiduaires de la station d'épuration de Béni-Messous, Le jus de cactus algérien *Opuntia ficus-indica* a été utilisé comme un biofloculant en combinaison avec une méthode électrochimique (l'électrocoagulation), l'aptitude de la déshydratation a été examinée par une filtration sous vide. Le but de ce travail est d'améliorer le conditionnement par électrocoagulation, par une réduction de l'énergie électrique consommée, et une diminution de la consommation des électrodes de fer, en ajoutant une dose optimale de biofloculant. Le rendement du procédé est évalué par la mesure de la siccité du gâteau 'Sc' et la résistance spécifique à la filtration 'r'. Notre étude a porté sur l'effet de : la densité de courant, le temps d'électrolyse, l'ajout des différentes doses de biofloculant, ainsi que l'ajustement du pH.

L'évolution des paramètres opératoires au cours de l'EC montre que le rendement optimal est obtenu pour une densité de courant de 150 A.m⁻², un temps d'électrolyse de 45 min, une dose de biofloculant de 5.33 g/kg MS, avec un pH de la boue brute (pH initial), Dans ces conditions la siccité du gâteau passe de 12.38% à 25.88 % et la résistance spécifique à la filtration de 5.4×10^{13} m.kg⁻¹ à 1.32×10^{12} m.kg⁻¹. De même, le volume de filtrat est de 89 ml pour un temps de filtration de 10 min. L'énergie consommée est relativement faible 'W= 9 kWh.m⁻³', l'ajout de biofloculant a permis une économie de 5.07 kWh.m⁻³ par rapport à une électrocoagulation de densité de courant de 200 A.m⁻², sans ajout de biofloculant. Les bonnes conditions de conditionnement permettent d'obtenir une boue solide.

Mots-clés : boue résiduaires, électrocoagulation (EC), conditionnement, déshydratation, résistance spécifique à la filtration, siccité, *Opuntia ficus-indica*, biofloculant.

Summary

This work relates to the study of the conditioning of waste sludge of the sewage treatment station of Beni-Messous, the juice of Algerian cactus *Opuntia ficus-indica* was used like one biofloculant in combination with an electrochemical method (electrocoagulation), the aptitude of dehydration was examined by a vacuum filtration. The aim of this work is to improve conditioning by electrocoagulation, unéréduction of consumed electrical energy, and a reduction in the consumption of the iron electrodes, by adding an optimal amount of biofloculant. The output of the process is evaluated by the measurement of the dryness of the cake 'Sc' and resistance specific to filtration 'r'. Our study related to the effect of: density of current, the time of electrolysis, the addition of the various amounts of biofloculant, as well as the adjustment of the pH.

The evolution of the operational parameters during EC shows that the optimal output is obtained for a density of current of 150 A.m⁻², a time of electrolysis of 45 min, an amount of biofloculant of 5.33 g/kg, with a pH of rough sludge (initial pH), Under these conditions the dryness of the cake passes from 12.38% to 25.88% and resistance specific to the filtration of 5.4×10¹³ m.kg⁻¹ to 1.32×10¹² m.kg⁻¹. In the same way, the volume of filtrate is of 89 ml for a time of filtration of 10 min. the power consumption is relatively low 'W= 9 kWh.m⁻³', the addition of biofloculant allowed a saving in 5.07 kWh.m⁻³ compared to an electrocoagulation of density of current of 200 A.m⁻², without addition of biofloculant. The good conditions of conditioning make it possible to obtain a solid sludge.

Key words : sludge waste, electrocoagulation (EC), conditioning, dehydration, resistance specific to filtration, dryness, *Opuntia ficus-indica*, biofloculant.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction générale.....	2
Chapitre I : l'épuration des eaux usées	5
I.1. Introduction	6
I.2. Les eaux usées.....	6
I.2.1. Définition d'une eau usée.....	6
I.2.2. Description d'une station d'épuration classique.....	6
I.2.2.1. Les prétraitements.....	7
I.2.2.2. Le traitement primaire.....	7
I.2.2.3. Le traitement secondaire.....	8
I.2.2.3. Traitement tertiaire.....	8
I.3. La filière boue.....	9
I.3.1. Définition de la boue.....	9
I.3.2. Origine et composition des boues d'épuration.....	9
I.3.3. caractéristiques physicochimique des boues.....	11
I.3.3.1. Matière sèche MS et siccité S.....	11
I.3.3.2. Matières en suspension (MES).....	11
I.3.3.3. Matières volatiles en suspension.....	11
I.3.3.4. Consistance des boues.....	11
I.3.3.5. Paramètres d'appréciation de la pollution organique.....	12
I.3.3.6. Resistance spécifique à la filtration r.....	12

I.3.4. traitement des boues.....	12
I.3.4.1. L'épaississement.....	13
I.3.4.2. La Stabilisation.....	13
I.3.4.3. Conditionnement et déshydratation des boues.....	14
I.3.4.4. Séchage.....	15
I.3.5. Élimination finale des boues.....	15
I.3.5.1. Valorisation agricole.....	15
I.3.5.2. Incinération.....	15
I.3.5.3. Mise en décharge.....	16
I.3. Conclusion.....	16

Chapitre II : Conditionnement et déshydratation des boues

II.1. Introduction.....	18
II.2. Conditionnement des boues.....	18
II.2.1. Conditionnement chimique.....	18
II.2.1.1. Réactifs minéraux.....	18
II.2.1.2. Polyélectrolytes.....	19
II.2.2. Conditionnement thermique.....	19
II.2.3. Conditionnement électrochimique.....	20
II.3. Déshydratation des boues.....	21
II.3.1. déshydratation naturelle.....	21
II.3.2. déshydratation mécanique.....	21

II.3.2.1. La centrifugation.....	21
II.3.2.2. La filtration.....	22
II.4. Conclusion.....	25
Chapitre III : Électrocoagulation	
III.1. Introduction.....	27
III.2. Historique du procédé d'électrocoagulation.....	27
III.3. Définition de l'électrocoagulation.....	28
III.4. Types d'électrodes.....	29
III.5. Mécanisme du procédé	29
III.6. Paramètres influençant l'électrocoagulation.....	31
III.6.1. Densité de courant.....	31
III.6.2. Temps d'électrolyse.....	32
III.6.3. pH.....	32
III.6.4. Conductivité.....	33
III.6.5. Nature des électrodes.....	33
III.6.6. Température.....	33
III.6.7. Autres facteurs influençant l'électrocoagulation.....	33
III.7. Avantages et inconvénients de l'électrocoagulation.....	34
III.7.1 Avantages de l'électrocoagulation.....	34
III.7.2. Inconvénients de l'électrocoagulation.....	34
III.8. Conclusion.....	35

Chapitre IV : Généralités sur l'Opuntia ficus-indica	36
IV.1. Introduction.....	37
IV.2. Origine et diffusion.....	37
IV.3. position systématique3.....	38
IV.4. Description de la plante.....	38
IV.5. Compositions chimiques des raquettes.....	39
IV.6. Importance économique et écologique.....	41
IV.6.1. Importance écologique.....	41
IV.6.2. Importance économique.....	41
IV.6.2.1. Consommation des fruits et des raquettes.....	41
IV.6.2.2. Production fourragère.....	41
IV.6.2.3. Production maraîchère.....	42
IV.6.2.4. Utilisations médicinales.....	42
IV.6.2.5. Utilisations dans le domaine d'épuration et de traitement des eaux	42
IV.7. Conclusion.....	43
Chapitre V : Matériel et Méthodes	45
V.1. Introduction.....	46
V.2. Objectifs de l'étude expérimentale.....	46
V.3. Présentation de la station d'épuration.....	46
V.3.1. Situation géographique.....	46
V.3.2. Réalisation de la STEP.....	47
V.3.3. Le Principe du traitement et les ouvrages.....	47

V.4. Matériels et Méthodes	49
V.4.1. Matériels.....	49
V.4.2. Description des montages	50
V.4.2.1. L'électrocoagulation	50
V.4.2.2. Test de filtrabilité sous vide.....	51
V.4.3. Méthodes.....	53
V.4.3.1. Les paramètres liés au courant électrique.....	53
V.4.3.2. Caractérisation de la boue et de filtrat.....	53
V.4.3.3. Préparation et caractérisation du bio-floculant (Le jus de cactus).....	58
V.5 Conclusion.....	59

Chapitre VI : Résultats et discussions

VI.1. Introduction.....	61
VI.2. L'influence de la densité de courant.....	61
VI.2.1. L'influence de la densité de courant sur la concentration en fer dissous (CFe).....	61
VI.2.2. L'influence de la densité de courant sur l'énergie consommée (P).....	62
VI.2.3. L'influence de la densité de courant sur le pH final de la solution.....	63
VI.2.4. l'Influence de la la densité de courant sur la siccité du gâteau (Sc).....	63
VI.2.5. L'influence de la densité de courant sur la résistance spécifique à la filtration	65
VI.2.6. L'influence de la densité de courant sur le volume de filtrat.....	66
VI.3 L'influence du temps d'électrolyse.....	67
VI.3.1. L'influence du temps d'électrolyse sur la concentration en fer dissous (CFe).	

VI.3.2. L'influence du temps d'électrolyse sur l'énergie consommée (P).....	67
VI.3.3. L'influence du temps d'électrolyse sur la siccité du gâteau (Sc).....	68
VI.3.4. L'influence du temps d'électrolyse sur la résistance spécifique à la filtration	69
VI.3.5. L'influence du sur le volume de filtrat.....	70
VI.4. L'Influence de la dose de biofloculant.....	71
VI.4.1. L'Influence de la dose de biofloculant sur la siccité du gâteau (Sc).....	73
VI.4.2. L'Influence de la dose de biofloculant sur la résistance spécifique à la filtration.....	74
VI.4.3. L'Influence de la dose de biofloculant sur la turbidité du filtrat.....	76
VI.4.4. L'Influence de la dose de biofloculant sur la conductivité du filtrat.....	77
VI.4.5. L'Influence de la dose de biofloculant sur le volume de filtrat.....	78
VI.5. L'Influence du pH	79
VI.5.1. L'Influence du pH sur l'énergie consommée (P).....	80
VI.5.2. L'Influence du pH sur la siccité du gâteau (Sc).....	81
VI.5.3. L'Influence du pH sur la résistance spécifique à la filtration.....	82
VI.5.4. L'Influence du pH sur le volume de filtrat.....	84
VI.6. Synthèse des résultats.....	85
Conclusion générale	86

. Références bibliographiques

89

92

Annexes

100

Annexe 1	L'influence de la densité de courant i	101
Annexe 2	L'influence du temps d'électrolyse T	104
Annexe 3	L'Influence de la dose de biofloculant D	113
Annexe 4	L'Influence du pH.....	119
Annexe 5	Calcul de la résistance spécifique à la filtration (exemple).....	122
Annexe 6	Les principaux dispositifs et ouvrages de la STEP de Béni-Messous.....	123
Annexe 7	Matériel utilisé.....	124

Liste des tableaux

Tableau I.1	Classement des MES selon la taille.....	11
Tableau II.1	Avantages et inconvénients de la centrifugation.....	22
Tableau II.2	Avantages et inconvénients de la filtration sous vide.....	23
Tableau II.3	Avantages et inconvénients des filtres-presses.....	24
Tableau II.4	Avantages et inconvénients des filtres à bandes presseuses.....	25
Tableau III.1	Historique des applications du procédé d'électrocoagulation.....	27
Tableau IV.1	La composition chimique des raquettes d'Opuntia ficus-indica.....	40
Tableau IV.2	Composition de mucilage des raquettes d'Opuntia.....	40
Tableau V.1	Les caractéristiques de la boue stabilisée de la STEP de Béni-Messous	57
Tableau V.2	Propriétés physico-chimiques du jus utilisé.....	59
Tableau VI.1	Les doses de biofloculant calculées par rapport à la matière sèche.....	74
Tableau 1.1	Conditions opératoires avant conditionnement et après déshydratation pour différentes densités de courant (T=15 min, pH de la boue brute)...	101
Tableau 1.2	L'influence de la densité de courant sur Siccité Sc, matières en suspension MES, matières volatiles MVS (T=15 min, pH de la boue brute).....	102
Tableau 1.3	L'influence de la densité de courant sur la résistance spécifique à la filtration r et le volume de filtrat (T=15 min, pH de la boue brute).....	104
Tableau 2.1	Conditions opératoires avant conditionnement et après déshydratation pour différents temps d'électrolyse (i= 100 A.m-2, pH de la boue brute).....	105
Tableau 2.2	L'influence du temps d'électrolyse sur Siccité Sc, matières en suspension MES, matières volatiles MVS (i= 100 A.m-2, pH de la boue brute).....	106

Tableau 2.3	L'influence du temps d'électrolyse s sur la résistance spécifique à la filtration r et le volume de filtrat ($i= 100 \text{ A.m-2}$, pH de la boue brute)...	107
Tableau 2.4	Conditions opératoires avant conditionnement et après déshydratation pour différents temps d'électrolyse ($i= 150 \text{ A.m-2}$, pH de la boue brute).....	108
Tableau 2.5	L'influence du temps d'électrolyse sur Siccité Sc , matières en suspension MES, matières volatiles MVS ($i= 150 \text{ A.m}^{-2}$, pH de la boue brute).....	109
Tableau 2.6	L'influence du temps d'électrolyse s sur la résistance spécifique à la filtration r et le volume de filtrat ($i= 150 \text{ A.m-2}$, pH de la boue brute)...	110
Tableau 2.7	L'influence du temps d'électrolyse s sur la résistance spécifique à la filtration r et le volume de filtrat ($i= 150 \text{ A.m-2}$, pH de la boue brute)...	111
Tableau 2.8	Conditions opératoires avant conditionnement et après déshydratation pour différents temps d'électrolyse ($i= 200 \text{ A.m-2}$, pH de la boue brute).....	112
Tableau 2.9	Conditions opératoires avant conditionnement et après déshydratation pour différents temps d'électrolyse ($i= 200 \text{ A.m-2}$, pH de la boue brute).....	113
Tableau 2.8	L'influence du temps d'électrolyse sur Siccité Sc , matières en suspension MES, matières volatiles MVS ($i= 200 \text{ A.m-2}$, pH de la boue brute).....	114
Tableau 2.9	L'influence du temps d'électrolyse s sur la résistance spécifique à la filtration r et le volume de filtrat ($i= 200 \text{ A.m-2}$, pH de la boue brute)...	115
Tableau 2.9	L'influence du temps d'électrolyse s sur la résistance spécifique à la filtration r et le volume de filtrat ($i= 200 \text{ A.m-2}$, pH de la boue brute)...	116
Tableau 3.1	Conditions opératoires avant conditionnement et après déshydratation pour différents dose de biofloculant ($i= 100 \text{ A.m-2}$, $T=45\text{min}$, pH de mélange boue brute/jus de cactus).....	117
Tableau 3.2	Conditions opératoires avant conditionnement et après déshydratation pour différents dose de biofloculant ($i= 100 \text{ A.m-2}$, $T=45\text{min}$, pH de mélange boue brute/jus de cactus).....	118
Tableau 3.2	L'Influence de la dose de biofloculant D sur Siccité Sc , matières en suspension MES, matières volatiles MVS ($i= 100 \text{ A.m-2}$, $T=45\text{min}$, pH de mélange boue brute/jus de cactus).....	119
Tableau 3.3	L'Influence de la dose de biofloculant D sur la résistance spécifique à la filtration r et le volume de filtrat ($i= 100 \text{ A.m-2}$, $T=45\text{min}$, pH de mélange boue brute/jus de cactus).....	120
Tableau 3.4	L'Influence de la dose de biofloculant D sur la résistance spécifique à la filtration r et le volume de filtrat ($i= 100 \text{ A.m-2}$, $T=45\text{min}$, pH de mélange boue brute/jus de cactus).....	121
Tableau 3.4	Conditions opératoires avant conditionnement et après déshydratation pour différents dose de biofloculant ($i= 150 \text{ A.m-2}$, $T=45\text{min}$, pH de mélange boue brute/jus de cactus).....	121
Tableau 3.5	Conditions opératoires avant conditionnement et après déshydratation pour différents dose de biofloculant ($i= 150 \text{ A.m-2}$, $T=45\text{min}$, pH de mélange boue brute/jus de cactus).....	121
Tableau 3.5	L'Influence de la dose de biofloculant D sur Siccité Sc , matières en suspension MES, matières volatiles MVS ($i= 150 \text{ A.m-2}$, $T=45\text{min}$, pH de mélange boue brute/jus de cactus).....	121

- Tableau 3.6** L’Influence de la dose de biofloculant D sur la résistance spécifique à la filtration r et le volume de filtrat ($i= 150 \text{ A.m-2}$, $T=45\text{min}$, pH de mélange boue brute/jus de cactus).....
- Tableau 4.1** Conditions opératoires avant conditionnement et après déshydratation pour différents valeur de pH ($i= 100 \text{ A.m-2}$, $T=45\text{min}$, $D =5.33 \text{ g/kg MS}$).....
- Tableau 4.2** L’Influence du pH sur Siccité Sc, matières en suspension MES, matières volatiles MVS ($i= 100 \text{ A.m-2}$, $T=45\text{min}$, $D =5.33 \text{ g/kg MS}$)...
- Tableau 4.3** L’Influence du pH sur la résistance spécifique à la filtration r et le volume de filtrat ($i= 100 \text{ A.m-2}$, $T=45\text{min}$, $D =5.33 \text{ g/kg MS}$).....

Liste des figures

Figure I.1	Schéma d'une station d'épuration.....	7
Figure I.2	Le principe général de traitement d'une filière boue.....	12
Figure II.1	Floculateur à plaques ondulées (électrocoagulation).....	20
Figure II.2	Centrifugeuse.....	22
Figure II.3	Filtres à tambour sous vide	23
Figure II.4	Filtres-presses.....	24
Figure II.5	Filtres à bandes.....	24
Figure III.1	Schéma du principe de l'électrocoagulation.....	28
Figure III.2	Diagramme de Pourbaix du fer.....	32
Figure IV.1	Distribution géographique du figuier de Barbarie.....	37
Figure IV.2	Opuntia ficus indica du Centre de Sidi Aissa (Blida).....	39
Figure V.1	Situation géographique de la STEP de Béni-Messous.....	47
Figure V.2	Shéma synoptique de la STEP de Béni-Messous.....	48
Figure V.3	Photo du montage expérimentale d'électrocoagulation.....	50
Figure V.4	Schéma du montage expérimental d'électrocoagulation.....	51
Figure V.5	Montage du test de filtrabilité sous vide.....	52
Figure V.6	Bassin de stabilisation de la STEP de Béni-Messous.....	53
Figure V.7	Cactus de Sidi Aissa.....	57
Figure V.8	Les étapes de préparation du cactus.....	58
Figure VI.1	L'influence de la densité de courant sur la concentration en fer dissous.	61
Figure VI.2	L'influence de la densité de courant sur P.....	62
Figure VI.3	L'influence de la densité de courant sur le pH final de la solution.....	63
Figure VI.4	L'Influence de la densité de courant sur Sc.....	63
Figure VI.5	L'influence de la densité de courant sur r.....	65
Figure VI.6	Boue obtenue après électrocoagulation, pour $i=250\text{A.m}^{-2}$ et $T=15\text{min}$...	66
Figure VI.7	L'influence de la densité de courant sur le volume de filtrat.....	66
Figure VI.8	L'influence du temps d'électrolyse sur la concentration en fer dissous...	67
Figure VI.9	L'influence du temps d'électrolyse sur P.....	68
Figure VI.10	L'influence du temps d'électrolyse sur Sc.....	69
Figure VI.11	boue obtenue après électrocoagulation, pour $i=200\text{A.m}^{-2}$ et $T=45\text{min}$	69
Figure VI.12	L'influence du temps d'électrolyse sur r.....	70
Figure VI.13	L'influence du temps d'électrolyse sur V de filtrat pour ($i=100\text{ A.m}^{-2}$)...	71
Figure VI.14	L'influence du temps d'électrolyse sur V de filtrat pour ($i=150\text{ A.m}^{-2}$)...	71
Figure VI.15	L'influence du temps d'électrolyse sur V de filtrat pour ($i=200\text{ A.m}^{-2}$)..	72
Figure VI.16	L'influence de la dose de biofloculant sur Sc.....	74
Figure VI.17	Gâteaux récupérés après déshydratation pour la dose optimale de biofloculant 5.33 g/kg MS	75
Figure VI.18	Structure de l'acide polygalacturonique (les sites de neutralisation des	

	colloïdes polluants P).....	75
Figure VI.19	L'influence de la dose de biofloculant sur r.....	76
Figure VI.20	Photos des boues obtenues après conditionnement pour la dose optimale de biofloculant $D=5.33$ g/kg, avec les deux densités de courant.....	77
Figure VI.21	L'influence de la dose de biofloculant sur la turbidité du filtrat.....	78
Figure VI.22	L'influence de la dose de biofloculant sur la conductivité du filtrat.....	79
Figure VI.23	L'influence de la dose de biofloculant sur V de filtrat ($i=100$ A.m ⁻²)....	79
Figure VI.24	L'influence de la dose de biofloculant sur V de filtrat ($i=150$ A.m ⁻²)....	81
Figure VI.25	L'influence du pH sur P.....	82
Figure VI.26	Courbe de la conductivité en fonction du pH.....	82
Figure VI.27	L'influence du pH sur Sc.....	83
Figure VI.28	Vitesse de corrosion du fer en fonction du pH.....	84
Figure VI.29	L'influence du pH sur r.....	85
Figure VI.30	Photos des boues obtenues après conditionnement pour différentes valeurs de pH, avec $i=100$ A.m ⁻² et $T=45$ min.....	85
Figure VI.31	L'influence du pH sur le volume de filtrat V.....	85

LISTE DES SYMBOLES ET ACRONYMES

a	pente de la droite obtenue lors de l'essai de filtrabilité	s.m ⁻⁶
C	concentration des boues à 'entrée de l'appareil	Kg.m ⁻³
C'	concentration en jus de cactus de l'échantillon	
CFe	concentration en fer dissous expérimentale	g.L ⁻¹
D	dose de biofloculant	g.L ⁻¹
d _b	diamètre de la bulle de gaz	g.L ⁻¹
DBO ₅	demande biologique en oxygène à 5 jours	g.kg ⁻¹
DCO	demande chimique en oxygène	m
EC	électrocoagulation	
g	accélération de la pesanteur	mg.L ⁻¹
i	Densité de courant électrique	mg.L ⁻¹
I	Intensité de courant électrique	
m	Masse de l'anode	
M0	masse du capsule vide	
M1	masse du capsule et (+) du gâteau humide	m.s ⁻²

M2	masse du capsule et (+) du gâteau sèche après séchage à 105 °C	A.m ⁻²
Mf	masse du capsule et (+) du gâteau sèche après séchage à 550 °C	A
MES	matière en suspension	
MM	Teneur en matière minérale	g
MO	Matière organique	g
MS	Matière sèche	g
MVS	Matière volatile	g
W	énergie électrique consommée	g
pH	Potentiel d'Hydrogène	g
P	pression	g
r	résistance spécifique à la filtration	g.L ⁻¹
S	surface filtrante	g.L ⁻¹
Sc	siccité de la boue	g.L ⁻¹
STEP	Station d'épuration	g.L ⁻¹
T	Temps d'électrolyse	g.L ⁻¹
t	Temps de filtration	g.L ⁻¹
U	la tension appliquée entre les deux électrodes	g.L ⁻¹
V	Volume	
V _b	vitesse ascensionnelle d'une bulle de gaz dans l'eau	kWh.m ⁻³
ζ _g	masse volumique du gaz	
ζ _L	masse volumique du liquide	
η	viscosité dynamique du filtrat	Pa
		m.kg ⁻¹
		m ²
		%
		min
		min
		V
		mL
		m.s ⁻¹
		kg.m ⁻³
		kg.m ⁻³
		Pa.s