



Développement d'un système passif de biostimulation anaérobie par injection d'hydrogène en nappe

Antoine Joubert, Stefan Colombano, David Cazaux, Alain Dumestre, Benoit Delobelle, Christophe Avril, Julien Maire, Nicolas Fatin-Rouge, Quentin Giraud, Benoit Paris



SERPOL
SERFIMGROUPE



INTERSOL – 17 Mars 2016





SERPOL
SERFIM GROUPE

1. Contexte site / SILPHES
2. Objectifs
3. Biostimulation par H_2
4. Stockage Hydrures
5. Optimisation rémanence H_2 (Mousses)
6. Essais pilote sur site

Contexte

Objectifs

Biostim H2

Hydrures

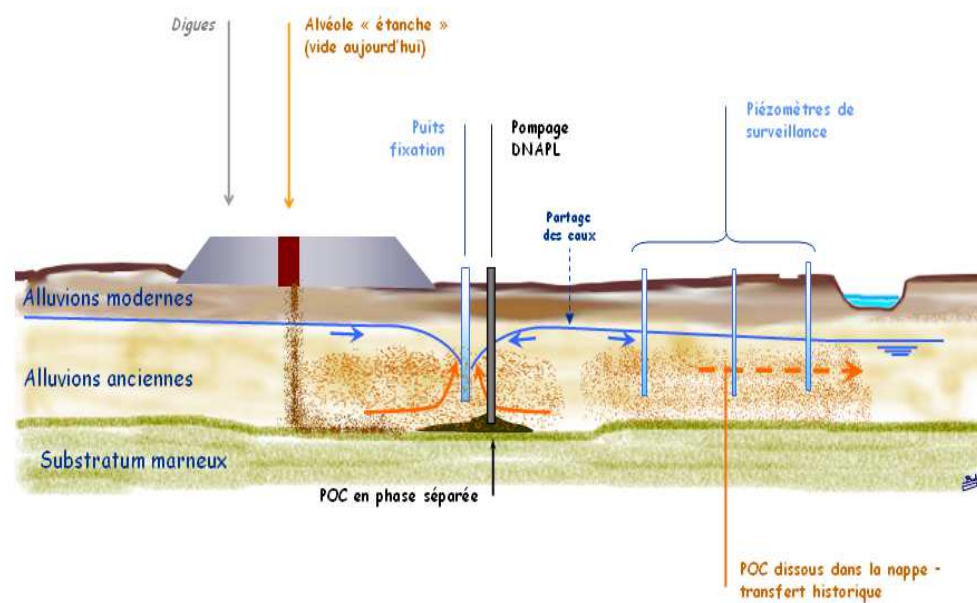
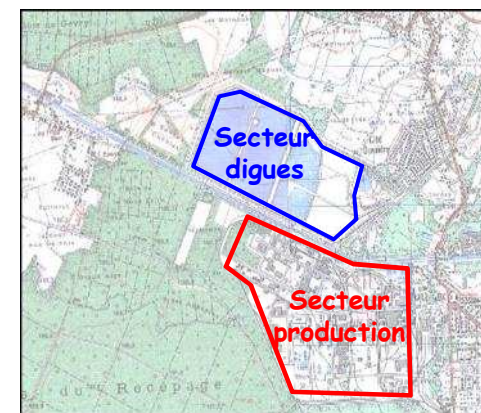
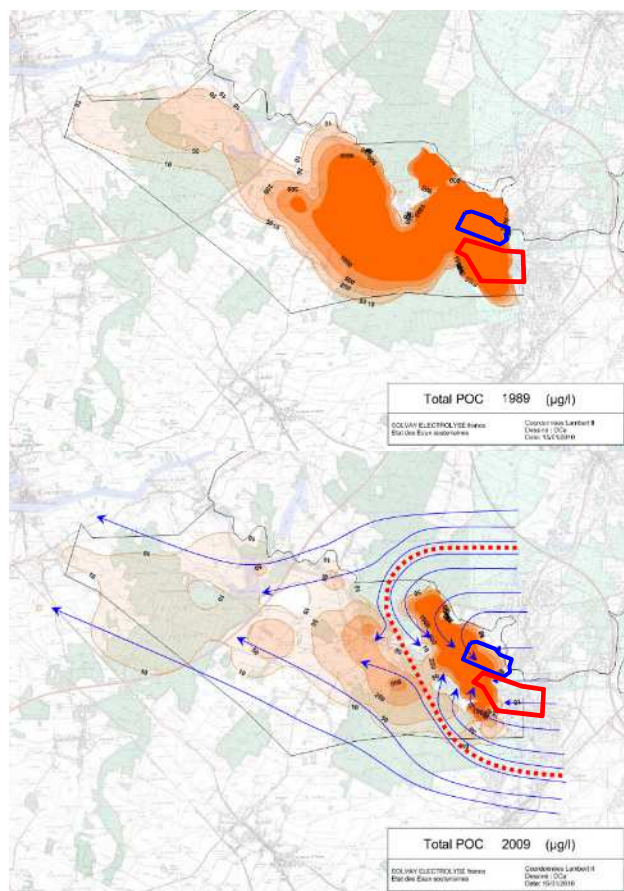
Mousses

Pilote terrain



SERPOL
SERFINGROUPE

Contexte Site



Contexte

Objectifs

Biostim H2

Hydrures

Mousses

Pilote terrain



SERPOL
SERFIM GROUPE

SILPHES



SERPOL

BRGM

BRGM

Lot 0:
Gestion et
Dissémination

Lot 1:
Traitement
SOURCE (DNAPL)

Lot 2:
Traitement
PANACHE

Lot 3:
Gestion des enjeux

Caractérisation
des sources
(géophysique,
PITT)

Pompage DNAPL
optimisé

Essais labo sur
résiduel

Traitement in situ
résiduel

Phytoscreening /
Dendrochimie

Atténuation
Naturelle (AN)

Atténuation
Naturelle
Dynamisée

Essais faisabilité
BPR



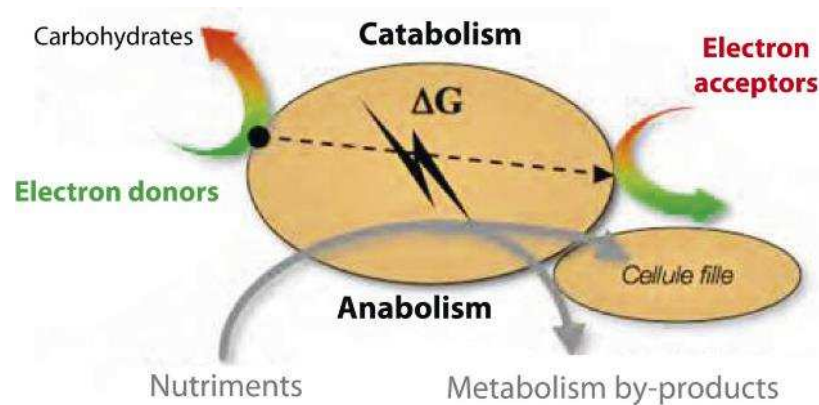
SERPOL
SERFINGROUPE

Objectifs

- Développer un traitement « passif » de biorémédiation anaérobie
- Valider la pertinence de l'hydrogène comme donneur d'électron directement disponible
- Valoriser l'hydrogène à des fins de solutions de dépollution
- Créer un système de stockage innovant
- Optimiser la diffusion et la rémanence de l'hydrogène en nappe (mousses)



SERPOL
SERFINGROUPE

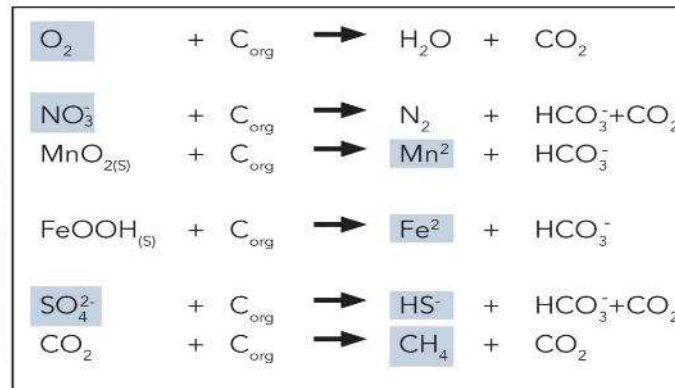


Catabolisme

Electron
acceptors

Electron
donors

Eh = + 300 mV



Dechlorination

Eh = - 250 mV

Acide lactique
 $\Rightarrow H_2$

- Faible concentration (1 mg/l d' H_2) nécessaire pour dégrader théoriquement un panache de 2 mg/l en PCE (Newell et al., 1997)
- Quid de l'anabolisme ? \Rightarrow Labo



SERPOL
SERFINGROUPE



- **Avantages:**
 - Moins encombrant
 - Basse pression (stockage solide)
 - Recharge facile et rapide (2 heures)



SERPOL
SERPINGROUPE

MAHYTEC
Innovative Energy Solutions

- 45 kg d'hydrures
- 6 m³ d'H₂
- Diffusion continue régulée à 10 ml/min
- Surpression jusqu'à 3 bar (génération mousse)
- Autonomie estimée > à 3 mois



Contexte

Objectifs

Biostim H2

Hydrures

Mousses

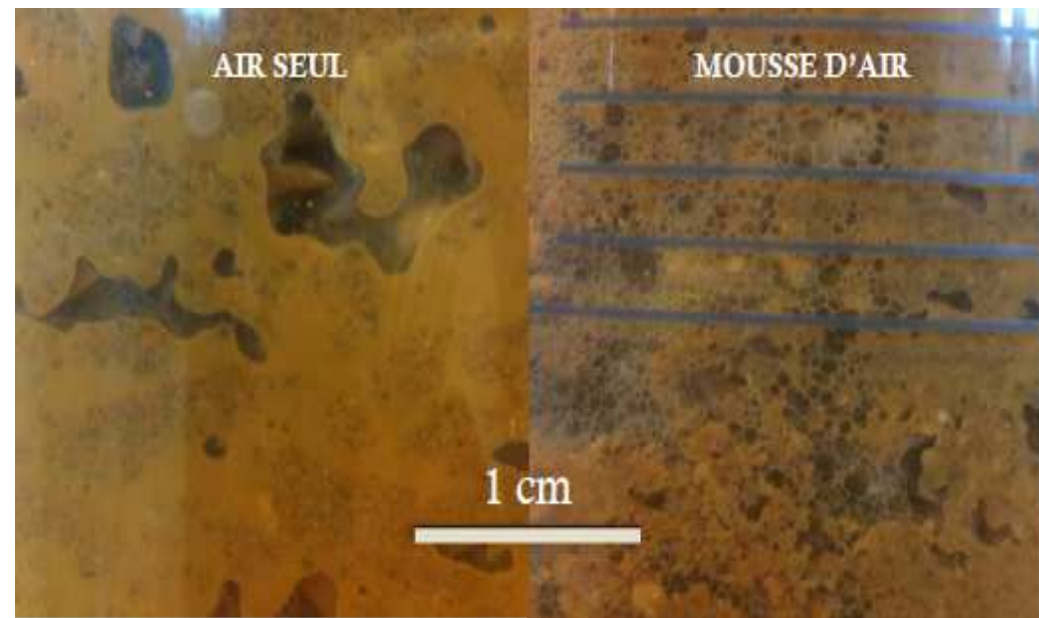
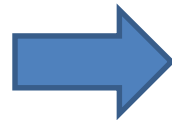
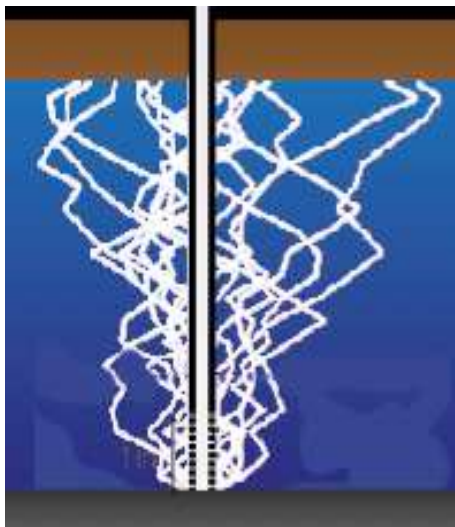
Pilote terrain



SERPOL
SERFINGROUPE

Faible solubilité de l' H_2 (1,6 mg/l)

Optimisation rémanence/stockage par la création de mousse





SERPOL
SERFINGROUPE

Les mousses augmentent la quantité séquestrable

- Viscosité du gaz augmentée
- Stockage plus important
- Meilleure propagation latérale



Propagation du gaz stabilisé ou non en cellule 2D

Billes de verre, $k \sim 35$ Da

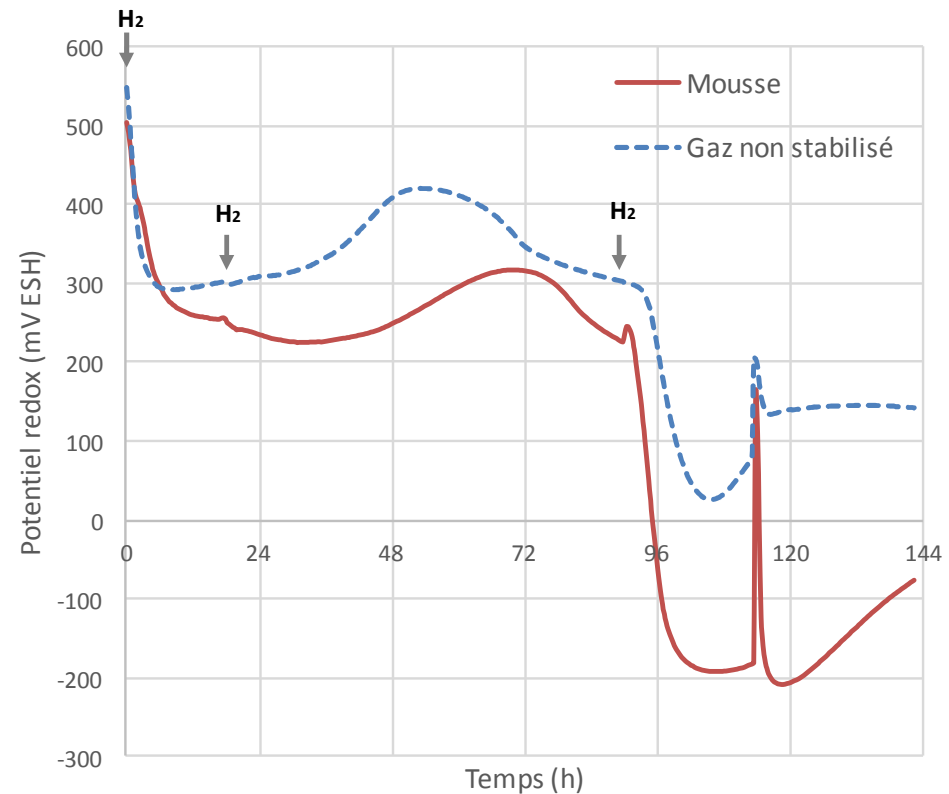
Importance de la formulation dans le gain de viscosité souhaité



SERPOL
SERFINGROUPE

Les mousses augmentent la rémanence

- L'hydrogène séquestré a davantage le temps de se dissoudre
- Il constitue donc une source d'H₂ solubilisé plus importante



Suivi du potentiel redox dans deux cellules 3D

Sol provenant du site d'étude

Injection de H₂ sous forme stabilisée ou non

Contexte

Objectifs

Biostim H2

Hydrures

Mousses

Pilote
terrain



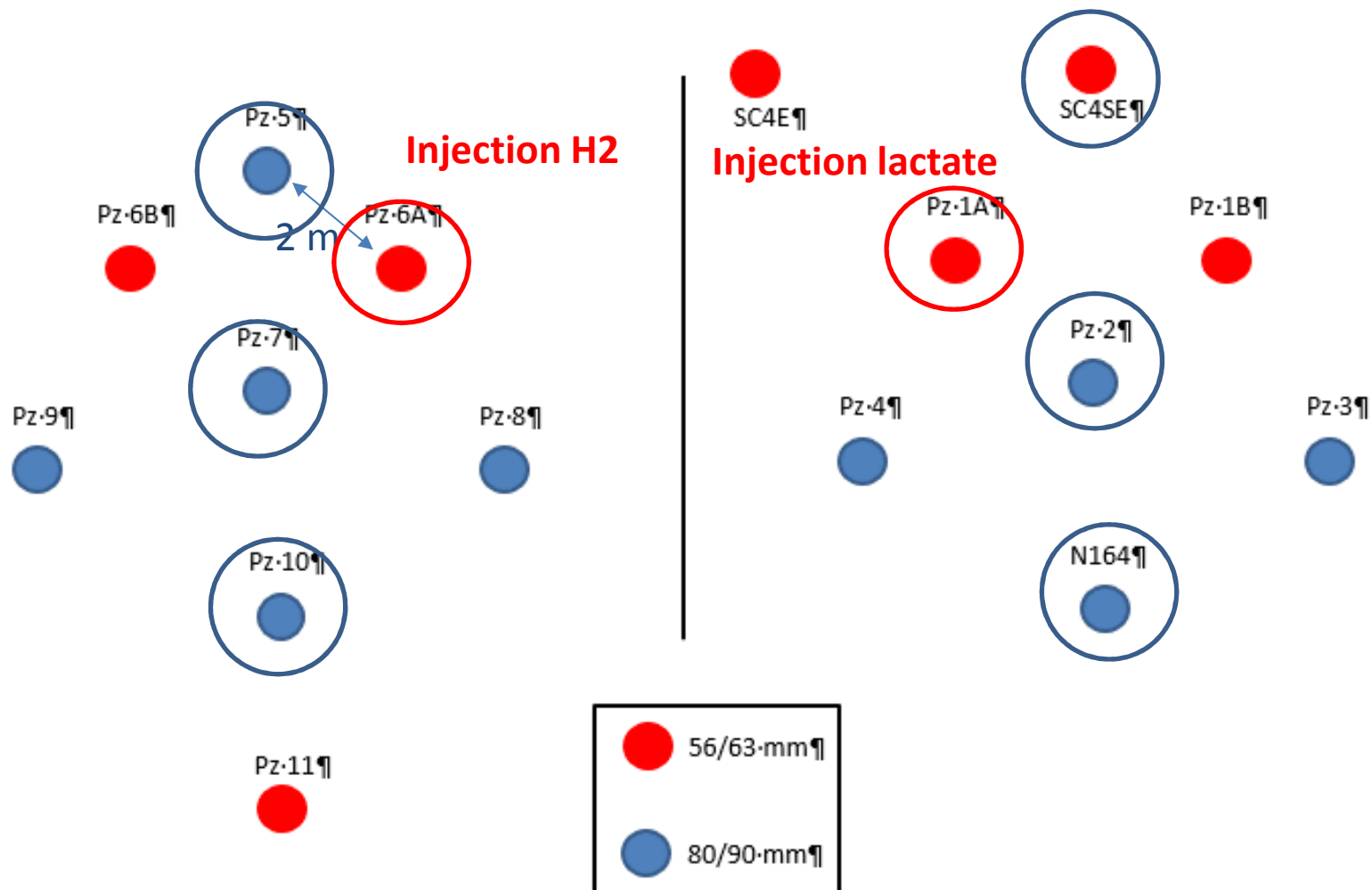
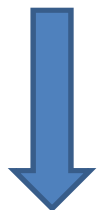
SERPOL
SERFINGROUPE

Localisation ouvrages pilote

Zone « H2 »

Zone « Carbone »

Sens
écoulement



Contexte

Objectifs

Biostim H2

Hydrures

Mousses

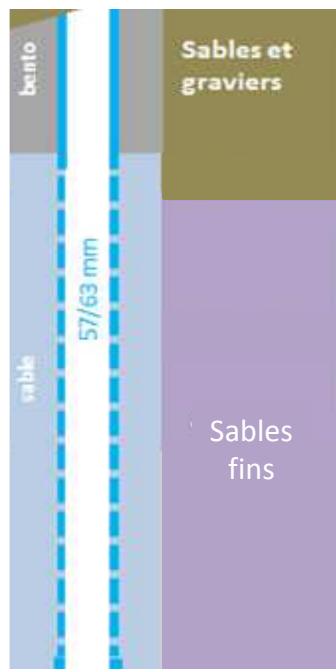
Pilote
terrain



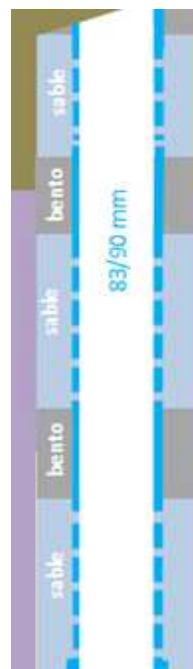
Diagraphies et équipements ouvrages

SERPOL
SERFINGROUPE

Ouvrage d'injection



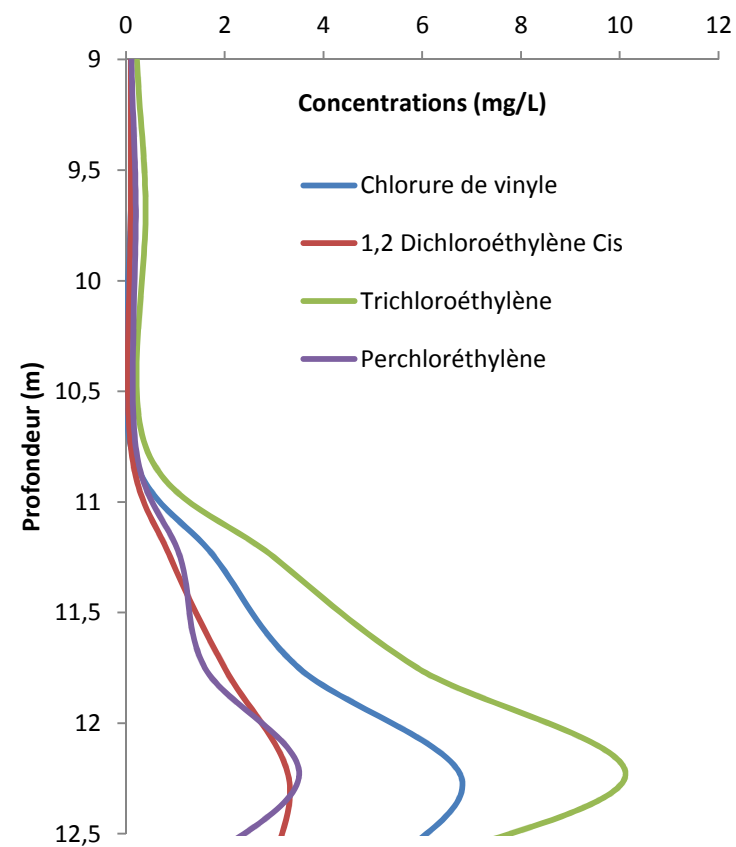
Piezo



Graviers
sableux

Sables

Argiles



Contexte

Objectifs

Biostim H2

Hydrures

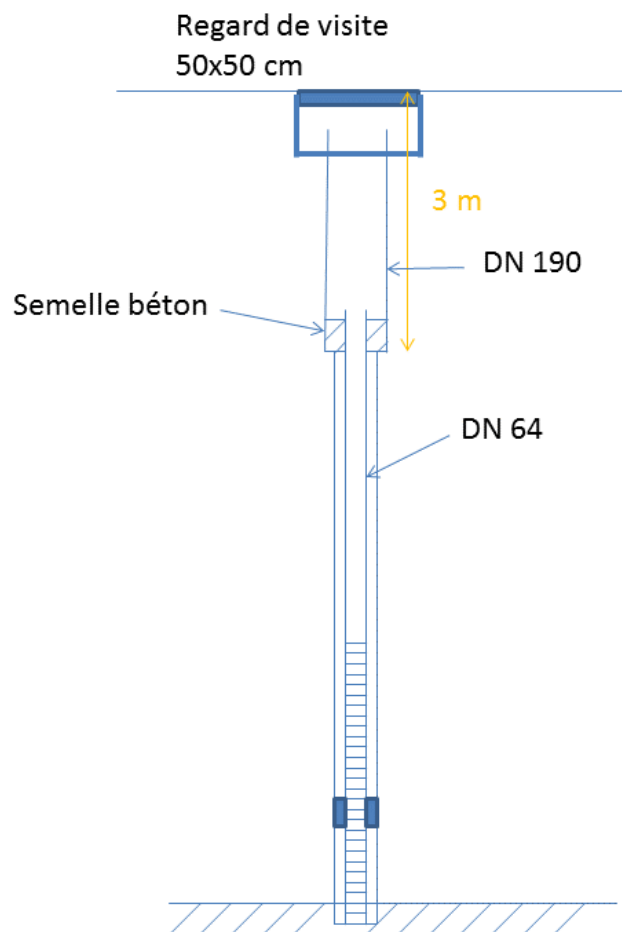
Mousses

Pilote
terrain



SERPOL
SERFINGROUPE

Equipements ouvrage d'injection H2



Contexte

Objectifs

Biostim H2

Hydrures

Mousses

Pilote
terrain



SERPOL
SERPENGROUPE

Mise en place système d'injection H2



Contexte

Objectifs

Biostim H2

Hydrures

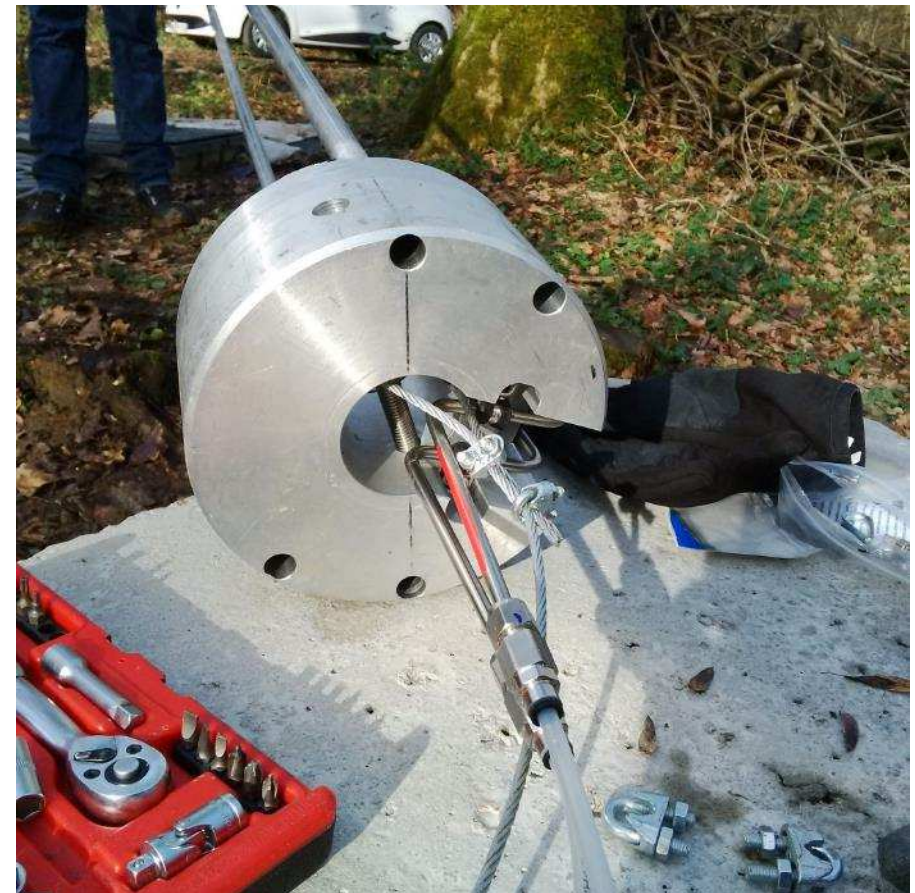
Mousses

Pilote
terrain



SERPOL
SERPINGROUPE

Mise en place système d'injection H2



Contexte

Objectifs

Biostim H2

Hydrures

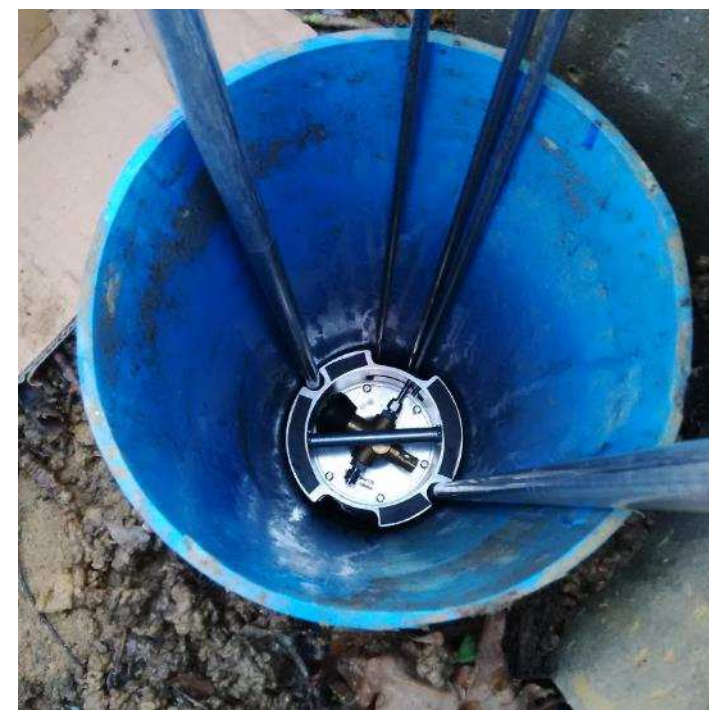
Mousses

Pilote
terrain



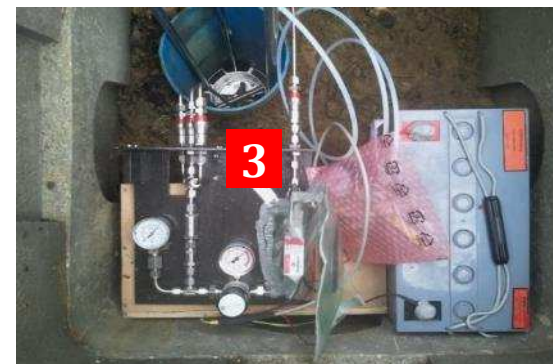
SERPOL
SERFINGROUPE

Mise en place système d'injection H2





SERPOL
SERFINGROUPE



1. Collecte du dihydrogène depuis les réservoirs
2. Contrôle de la pression des réservoirs et régulation de la pression à 3 bars
3. Injection du dihydrogène dans la nappe à pression contrôlée avec lecture du débit



- Enregistreur USB sur batterie
- Autonomie des réservoirs très supérieure à celle de la batterie (15% de l'H² consommée en 1 mois)
- Débit d'injection stable à 10mL/min

Contexte

Objectifs

Biostim H2

Hydrures

Mousses

Pilote
terrain



SERPOL
SERFINGROUPE

Protocole pilote

Zone H2

Hydrure : diffusion à 13 mL/min d'hydrogène en continu soit **50 g d'H₂ par mois**

Zone Carbone

Equivalence 50 g H₂ = **500 g de lactate de sodium 100 %** =>
injection mensuelle en fond d'aquifère

Monitoring:

- Sondes multiparamètres physico-chimiques (O₂, Eh, pH, conductivité, température)
- Analyses chimiques headspace eau/ciel gazeux : COD, COHV, accepteurs d'électrons: nitrates, sulfates,...

Contexte

Objectifs

Biostim H2

Hydrures

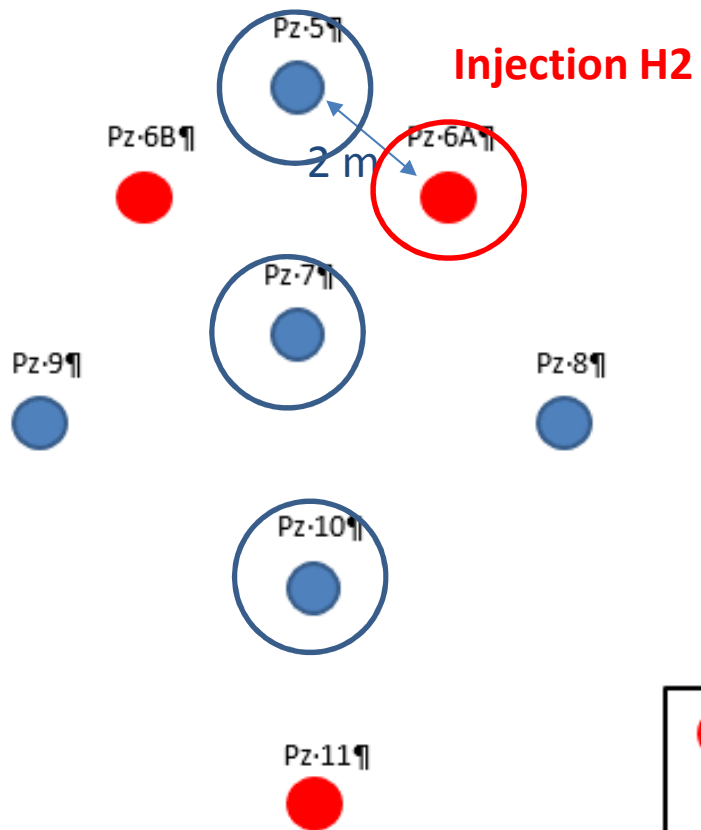
Mousses

Pilote
terrain

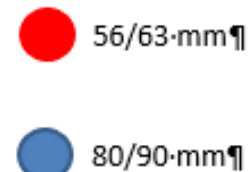
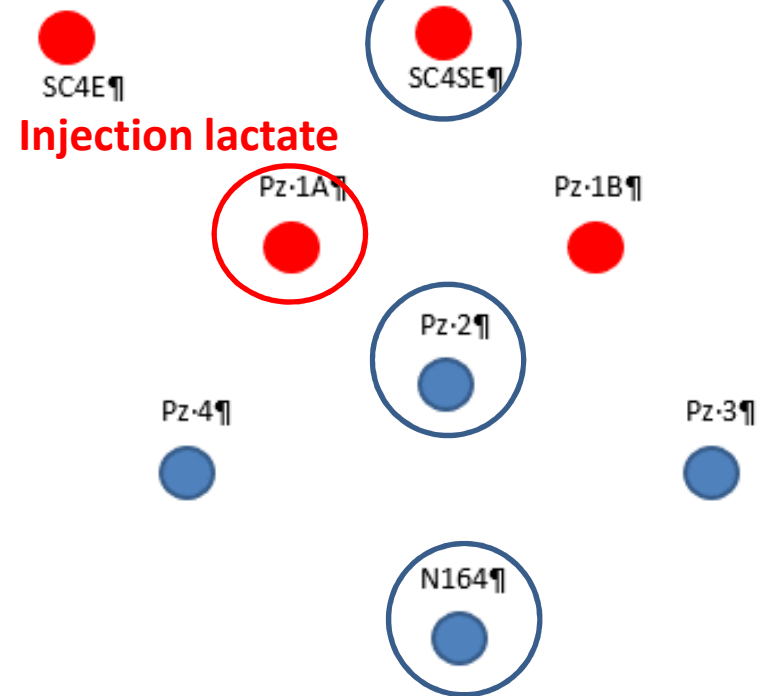


SERPOL
SERFINGROUPE

Zone « H2 »



Zone « Carbone »



Contexte

Objectifs

Biostim H2

Hydrures

Mousses

Pilote
terrain
SERPOL
SERFINGROUPE

Etat 0: Décembre 2015

Lancement pilotes: 13 Janvier 2016

T+1: Février 2016

T+2: Mars 2016

Premiers résultats

Zone
« Carbone »

SC4SE	Milieu
	Bas
Pz2	Haut
	Milieu
	Bas
N164	

Variation pH		
	F/M	D/M
	7,09	0,3
	6,95	0,06
	6,97	0,26
	6,9	0,18
	6,91	0,25
	6,89	0,19

Variation redox		
	F/M	D/M
	61	17
	89	-85
	-174	213
	-135	182
	-177	208
	-111	-89

Zone « H2 »

Pz5	Haut
	Milieu
	Bas
Pz7	Milieu
	Bas
Pz10	Haut
	Milieu
	Bas

	7,05	-0,2	-0,16
	7,1	-0,19	-0,17
	7,01	-0,12	-0,1
	7	-1,55	-1,43
	6,91	-0,22	-0,04
	7,03	0,04	-0,11
	6,68	0,16	0,05
	6,73	0,14	-0,02

	-2,4	14	124
	78	-74	-114
	49	3	13
	-72	3	125
	-58	-17	77
	-215	53	299
	-67	-43	93
	-138	-63	95

Contexte

Objectifs

Biostim H2

Hydrures

Mousses

Pilote
terrain
SERPOL
SERFINGROUPE

Etat 0: Décembre 2015

Lancement pilotes: 13 Janvier 2016

T+1: Février 2016

T+2: Mars 2016

Premiers résultats

Zone
« Carbone »

SC4SE	Milieu
	Bas
Pz2	Haut
	Milieu
	Bas
N164	

% Nitrates		
	F/M	D/M
6,6	126	133
5,1	98	94
3,9	91	154
5,8	147	145
5,4	105	107
6,3	91	78

% Sulfates		
	F/M	D/M
73,5	89	63
79	279	261
74	99	64
78	53	141
79	198	178
80	198	105

Zone « H2 »

Pz5	Haut
	Milieu
	Bas
Pz7	Milieu
	Bas
Pz10	Haut
	Milieu
	Bas

7,4	107	107
4,2	110	181
6,7	97	88
5,2	98	119
6	97	105
5,2	92	106
1	73	220
1,4	91	214

78	93	65
82	79	74
82,1	35	29
77,6	86	78
84	102	160
79,8	65	87
97	113	129
100	100	117

Contexte

Objectifs

Biostim H2

Hydrures

Mousses

Pilote
terrain
SERPOL
SERFINGROUPE

Etat 0: Décembre 2015

Lancement pilotes: 13 Janvier 2016

T+1: Février 2016

T+2: Mars 2016

Premiers résultats

		% PCE			% TCE			% Cis-DCE			% CV		
		F/M	D/M		F/M	D/M		F/M	D/M		F/M	D/M	
SC4SE	Milieu	10	118	166	22	137	355	13	126	211	0,5	114	1774
	Bas	338	205	298	1210	68	107	521	205	194	830	123	182
Pz2	Haut	29	105	144	82	106	274	46	114	179	3,8	97	1887
	Milieu	81	60	185	318	106	117	171	59	175	260	97	148
	Bas	161	144	220	637	42	78	318	87	112	450	39	79
N164		167	146	160	646	85	157	396	298	172	500	113	113
Pz5	Haut	22	106	138	64	110	233	42	103	132	0,5	166	3272
	Milieu	39	94	122	116	122	178	81	101	121	44	157	146
	Bas	110	35	71	335	89	239	186	26	42	480	15	16
Pz7	Milieu	41	101	102	117			71	98	105	2,2	142	933
	Bas	117	0	0	366	108	117	260	155	191	239,6	141	187
Pz10	Haut	53	100	147	156	152	187	109	100	153	69,3	137	190
	Milieu	389	116	172	1440	76	98	1024	115	159	1310	51	89
	Bas	436	67	163	1470	74	121	981	121	175	1230	47	108

Contexte

Objectifs

Biostim H2

Hydrures

Mousses

Pilote
terrain
SERPOL
SERFINGROUPE

Etat 0: Décembre 2015

Lancement pilotes: 13 Janvier 2016

T+1: Février 2016

T+2: Mars 2016

Premiers résultats

		% 1,2 dichloropropane			% Chloroforme			% 1,2 dichloroéthane			% Chlorures de vinyliden			% 2 chloropropene 1		
		F/M	D/M		F/M	D/M		F/M	D/M		F/M	D/M		F/M	D/M	
SC4SE	Milieu	24	130	255	5	145	102	2	211	223	10	119	242	2	127	223
	Bas	990	375	280	161	307	313	1300	249	252	554	132	137	93	307	271
Pz2	Haut	106	114	176	5	115	324	5	120	336	41	105	187	8	107	171
	Milieu	467	59	161	38	63	189	574	54	88	183	54	162	34	51	152
	Bas	570	124	125	71	217	250	1141	72	62	352	43	50	63	217	282
N164																
		931	295	87	82	328	183	1242	397	146	362	286	180	59	246	190
Pz5	Haut	86	106	142	5	142	77	2	190	322	29	99	171	5	88	167
	Milieu	167	102	127	8	168	158	10	343	290	67	96	131	12	92	130
	Bas	650	52	24	39	35	67	372	40	49	175	17	30	31	35	84
Pz7	Milieu	155	100	106	5	154	106	3	193	278	61	97	108	11	88	103
	Bas	541	332	196	43	51072	189	176	232	211	216	129	191	39	46	188
Pz10	Haut	225	98	149	13	146	176	5	206	323	90	98	157	16	94	154
	Milieu	1410	134	120	214	112	144	108	148	434	800	113	167	141	114	170
	Bas	1380	132	135	225	99	155	619	102	136	789	117	174	141	103	172



SERPOL
SERFINGROUPE

Conclusions

- Mise au point d'un dispositif innovant de stockage/injection d'hydrogène en nappe pour tester un traitement passif de biorémédiation anaérobie
- Mise en place du pilote de terrain pour comparer efficacité vs ajout d'une source de carbone
- Premiers résultats encourageants...à suivre
- Laboratoire:
 - Pertinence mousse pour augmenter la rémanence de l'hydrogène => essais terrain en perspective
 - Etude à venir sur la microbiologie impliqués dans les processus de dégradation

MERCI DE VOTRE ATTENTION!!

INTERSOL – 17 Mars 2016

