

# Table des matières

<b>Chapitre 1. Perspectives historiques</b> . . . . .	1
Violaine LAMOUREUX-VAR, Nicolas BOUTON et François BAUDIN	
1.1. Histoire du Rock-Eval® . . . . .	1
1.2. Distribution géographique des Rock-Eval® dans le monde et domaines d'application de la méthode . . . . .	8
<b>Chapitre 2. Principes et méthodes</b> . . . . .	11
Violaine LAMOUREUX-VAR, Nicolas BOUTON, Jean ESPITALIÉ et Yves BENOIT	
2.1. Procédé d'analyse . . . . .	11
2.2. Schéma de principe de l'analyseur Rock-Eval® 6 . . . . .	12
2.3. Les détecteurs . . . . .	13
2.3.1. Le détecteur à ionisation de flamme (DIF) . . . . .	13
2.3.2. Les détecteurs de CO-CO <sub>2</sub> -SO <sub>2</sub> . . . . .	14
2.4. Thermogrammes . . . . .	15
2.4.1. Pyrolyse : pic S1 . . . . .	15
2.4.2. Pyrolyse : pic S2 . . . . .	15
2.4.3. Pyrolyse : Tpeak/Tmax . . . . .	16
2.4.4. Spécificités du pic S2 : une pyrolyse en milieu ouvert . . . . .	17
2.4.5. Pyrolyse : pics S3 et S3CO . . . . .	18
2.4.6. Oxydation : pics S4 . . . . .	19
2.4.7. Oxydation : pic S5 . . . . .	19
2.5. Méthodes et cycles . . . . .	20
2.6. Rock-Eval® 7 Soufre . . . . .	21
2.7. Pollut-Eval® . . . . .	23

2.7.1. Appareillages . . . . .	23
2.7.2. Méthode Pollut-Eval® ou <i>Multi Heating Rate</i> . . . . .	24
2.7.3. Calculs et paramètres utilisés par la méthode Pollut-Eval® . . . . .	25
2.7.4. Positionnement des curseurs d'intégration . . . . .	26

### **Chapitre 3. Paramètres et illustration des résultats . . . . . 29**

Lauric CÉCILLON, Pierre BARRÉ, Yves BENOIT, Yoann COPARD  
et Maria-Fernanda ROMERO-SARMIENTO

3.1. Introduction . . . . .	29
3.2. Signaux Rock-Eval® et paramètres de base . . . . .	30
3.2.1. Le découpage des thermogrammes en « signaux » Rock-Eval® . . . . .	30
3.2.2. Utilisation des signaux pour calculer les teneurs en carbone organique et inorganique d'un échantillon . . . . .	31
3.2.3. Cas de la contamination par des carbonates thermolabiles . . . . .	34
3.2.4. Les paramètres renseignant sur la composition élémentaire de l'échantillon : indices d'hydrogène et d'oxygène . . . . .	34
3.3. Les paramètres-clés pour l'exploration pétrolière . . . . .	36
3.3.1. Les paramètres Rock-Eval® <i>Bulk Rock cycle Basic</i> pour la caractérisation de roches mères pétrolières . . . . .	36
3.3.2. Les paramètres Rock-Eval® <i>Shale Play</i> <sup>TM</sup> pour la caractérisation de roches très riches en hydrocarbures liquides . . . . .	38
3.4. Les paramètres développés pour l'analyse des sols . . . . .	39
3.4.1. Les paramètres de stabilité thermique des HC . . . . .	39
3.4.2. Affinement et généralisation des paramètres de stabilité thermique . . . . .	42
3.5. Développements en cours sur l'investigation des sommes de thermogrammes . . . . .	44

### **Chapitre 4. Conseils d'échantillonnage, effets de matrice minérale et artefacts sur les thermogrammes . . . . . 45**

François BAUDIN, Yves BENOIT et Nicolas BOUTON

4.1. Prélèvement, préparation et conservation des échantillons . . . . .	45
4.1.1. Sédiments récents lacustres ou marins . . . . .	46
4.1.2. Roches sédimentaires . . . . .	46
4.1.3. Carottes et déblais de forage . . . . .	51
4.1.4. Cas particuliers des roches réservoirs et des huiles . . . . .	53
4.1.5. Sols et sols pollués . . . . .	53
4.1.6. Kérogènes . . . . .	54
4.2. Effets de matrice minérale . . . . .	54

4.2.1. Mise en évidence des effets de matrice minérale sur les composés hydrocarbonés . . . . .	55
4.2.2. Incidence des effets de matrice sur les paramètres Rock-Eval® . . . . .	57
4.2.3. Mesure de l'activité d'une matrice minérale et moyens de correction de son effet . . . . .	61
4.2.4. Conclusions sur les effets de matrices minérales . . . . .	62
4.3. Autres artéfacts sur les thermogrammes liés à la présence de minéraux . . . . .	63
4.4. Autres artéfacts et signaux anormaux d'origine instrumentale . . . . .	68
<b>Chapitre 5. Comparaison avec d'autres méthodes . . . . .</b>	<b>73</b>
Nicolas BOUTON et Jérémie AMMOUAL	
5.1. La méthode Rock-Eval® aux confins des méthodes analytiques classiques . . . . .	73
5.2. Analyse élémentaire . . . . .	74
5.3. Chromatographie . . . . .	76
5.4. Analyse thermique . . . . .	76
5.5. Comparaison avec d'autres analyseurs du même type . . . . .	77
5.6. Comparaison avec d'autres types d'échantillons . . . . .	82
<b>Chapitre 6. Caractérisation des roches mères pétrolières . . . . .</b>	<b>85</b>
Maria-Fernanda ROMERO-SARMIENTO	
6.1. Introduction . . . . .	85
6.2. Caractérisation de roches mères pétrolières conventionnelles et matières organiques isolées (kérogènes) . . . . .	87
6.3. Caractérisation d'échantillons d'huiles . . . . .	90
6.4. Caractérisation d'hydrocarbures de roches mères . . . . .	91
6.5. Composition d'hydrocarbures détectés par la pyrolyse Rock-Eval® . . . . .	92
6.6. Estimation des réserves d'hydrocarbures en place . . . . .	96
6.7. Estimation d'hydrocarbures libres dans les milieux poreux . . . . .	99
<b>Chapitre 7. Détermination des paramètres de craquage thermique de la matière organique fossile . . . . .</b>	<b>101</b>
Françoise BEHAR	
7.1. Introduction . . . . .	101
7.2. Équations de base pour le craquage thermique . . . . .	102
7.3. Détermination expérimentale des paramètres cinétiques des kérogènes . . . . .	107

7.4. Calcul des paramètres cinétiques globaux du kérogène en milieu ouvert . . . . .	111
7.5. Acquisition et optimisation des paramètres cinétiques E et A . . . . .	112
7.6. Utilisation des valeurs absolues de E et A obtenues au laboratoire pour calculer les valeurs de TR dans les conditions géologiques . . . . .	114
7.6.1. Effet de compensation entre E et A dans les conditions de laboratoire . . . . .	114
7.6.2. Forme de la courbe de la fonction d'erreur optimisée pour calculer la valeur de A. . . . .	117
7.7. Résumé . . . . .	121
<b>Chapitre 8. Caractérisation des composés soufrés.</b> . . . . .	<b>123</b>
Jean ESPITALIÉ, Violaine LAMOUREUX-VAR et Nicolas BOUTON	
8.1. Introduction . . . . .	123
8.2. Dispositif expérimental . . . . .	124
8.3. Caractérisation du soufre dans les kérogènes . . . . .	126
8.3.1. Thermogrammes . . . . .	126
8.3.2. Origine des composés soufrés analysés . . . . .	127
8.3.3. Calcul des paramètres « soufre » . . . . .	128
8.4. Caractérisation du soufre dans les roches mères pétrolières . . . . .	133
8.5. Cinétique de craquage des composés organo-soufrés de la matière organique . . . . .	139
8.6. Caractérisation du soufre dans les pétroles . . . . .	142
8.7. Caractérisation du soufre dans les roches réservoirs. . . . .	145
8.8. Perspectives d'application du Rock-Eval® 7 Soufre à la compréhension du cycle sédimentaire du soufre . . . . .	147
8.9. Perspectives d'application du Rock-Eval® 7S pour l'industrie. . . . .	148
<b>Chapitre 9. Étude des matières organiques des sédiments récents.</b> . . . . .	<b>151</b>
Yoann COPARD et François BAUDIN	
9.1. Introduction . . . . .	151
9.2. Rappels des principes de l'analyse des sédiments récents par la méthode Rock-Eval® . . . . .	152
9.3. Analyse de matières organiques fraîches et de composés purs. . . . .	154
9.4. Les archives continentales comme témoins des changements environnementaux. . . . .	156
9.4.1. Matière en suspension et archives fluviales. . . . .	157
9.4.2. Archives lacustres, réservoirs. . . . .	159
9.4.3. Tourbières . . . . .	162

9.5. Environnements côtiers et marins. . . . .	165
9.5.1. Les mangroves. . . . .	166
9.5.2. Les mers épicontinentales . . . . .	167
9.5.3. Les systèmes turbiditiques profonds . . . . .	168
9.5.4. Les <i>upwellings</i> . . . . .	170
9.5.5. Les dépôts de sapropèle . . . . .	172
9.5.6. Les sédiments marins d'origine corallienne . . . . .	173
9.6. Les relations matières organiques et concentrations en contaminants . . . . .	174

## **Chapitre 10. Caractérisation et évaluation de la stabilité de la matière organique du sol . . . . .**

Pierre BARRÉ, Lauric CÉCILLON et Eva KANARI

10.1. Introduction . . . . .	179
10.2. Pertinence et enseignements généraux de l'analyse par Rock-Eval <sup>®</sup> d'échantillons de sol . . . . .	180
10.2.1. Analyser des sols par Rock-Eval <sup>®</sup> , un détournement raisonnable . . . . .	180
10.2.2. Une évolution des paramètres Rock-Eval <sup>®</sup> marquée avec la profondeur du sol . . . . .	183
10.2.3. Spécificités des signaux Rock-Eval <sup>®</sup> de certains types de sol, horizons de sol et agrégats de sol . . . . .	186
10.3. Difficultés à relier signature Rock-Eval <sup>®</sup> et composition chimique de la matière organique des sols . . . . .	187
10.3.1. Apports de l'analyse Rock-Eval <sup>®</sup> de composés purs . . . . .	187
10.3.2. Liens entre composition chimique de la matière organique du sol déterminée par diverses méthodes et signature Rock-Eval <sup>®</sup> . . . . .	189
10.4. Évaluer la stabilité du carbone organique du sol par Rock-Eval <sup>®</sup> . . . . .	191
10.4.1. Qu'est-ce que la stabilité biogéochimique du carbone organique du sol ? . . . . .	191
10.4.2. Liens entre résultats Rock-Eval <sup>®</sup> et stabilité biogéochimique de la matière organique du sol observée sur le terrain . . . . .	193
10.4.3. Liens entre résultats Rock-Eval <sup>®</sup> et les techniques usuelles de quantification de la stabilité biogéochimique du carbone organique du sol . . . . .	195
10.5. Quantifier la stabilité du carbone organique du sol par Rock-Eval <sup>®</sup> en vue d'améliorer les modèles de dynamique du carbone du sol. . . . .	197
10.5.1. Les modèles de dynamique du carbone organique du sol. . . . .	197
10.5.2. Construction du modèle carbone stable à l'échelle du siècle . . . . .	198
10.5.3. Utilisation du modèle PARTY <sub>SOC</sub> pour estimer la taille du compartiment cinétique stable du modèle de dynamique du C du sol AMG. . . . .	201
10.6. Conclusion . . . . .	203

**Chapitre 11. Étude des évènements naturels et anthropiques . . . 205**

Yoann COPARD et François BAUDIN

11.1. Introduction . . . . .	205
11.2. Évènements d'origine géologique . . . . .	206
11.2.1. Circulations hydrothermales . . . . .	207
11.2.2. Radiolyse et autres relations U/matière organique . . . . .	210
11.2.3. Évènements magmatiques et métamorphiques . . . . .	211
11.3. Incendies et signature des résidus de combustion incomplète . . . . .	213
11.4. Altération supergène <i>versus</i> oxydation syn-diagénétique . . . . .	214
11.5. Oxydation artificielle . . . . .	218

**Chapitre 12. Détection et suivi de pollutions pétrolières dans l'environnement . . . . . 221**

Yves BENOIT

12.1. Introduction . . . . .	221
12.2. La méthode Pollut-Eval® . . . . .	223
12.2.1. Principe et équipements . . . . .	223
12.2.2. Quantification et caractérisation des polluants . . . . .	225
12.2.3. Pyrogrammes caractéristiques de coupes hydrocarbures de référence . . . . .	227
12.2.4. Deux exemples caractéristiques extraits de la base de données de référence . . . . .	227
12.2.5. Exemples de rapports caractéristiques pour le diagnostic de sols contaminés . . . . .	229
12.3. Influence de la matrice organique naturelle des sols sur les réponses observées . . . . .	230
12.3.1. Types d'échantillons et de sols naturels analysés . . . . .	231
12.3.2. Corrélation entre les différents signaux de pyrolyse et d'oxydation . . . . .	231

**Chapitre 13. Analyse des carbonates . . . . . 237**

François BAUDIN, Nicolas BOUTON et Adrien WATTRIPONT

13.1. Rappels des principes de l'analyse du carbone minéral par la méthode Rock-Eval® . . . . .	237
13.2. Effets cinétiques . . . . .	239
13.3. Artéfacts . . . . .	246
13.4. Discrimination et quantification de différentes espèces minérales carbonatées par la méthode Rock-Eval® . . . . .	249
13.5. Corrections en cas de présence de sidérite . . . . .	251

---

13.6. Du MinC du Rock-Eval® au pourcentage en carbonate . . . . .	255
13.7. Relations COT et MinC dans les sédiments et roches sédimentaires .	257
13.8. Conclusion . . . . .	259
<b>Chapitre 14. Quelle suite pour le Rock-Eval® ? . . . . .</b>	<b>261</b>
François BAUDIN et Nicolas BOUTON	
<b>Annexe 1. Unités, symboles et acronymes . . . . .</b>	<b>265</b>
François BAUDIN	
<b>Annexe 2. Formules utiles et paramètres dérivés de la méthode Rock-Eval® et leurs unités . . . . .</b>	<b>269</b>
François BAUDIN	
<b>Bibliographie . . . . .</b>	<b>273</b>
<b>Liste des auteurs . . . . .</b>	<b>301</b>
<b>Index . . . . .</b>	<b>303</b>