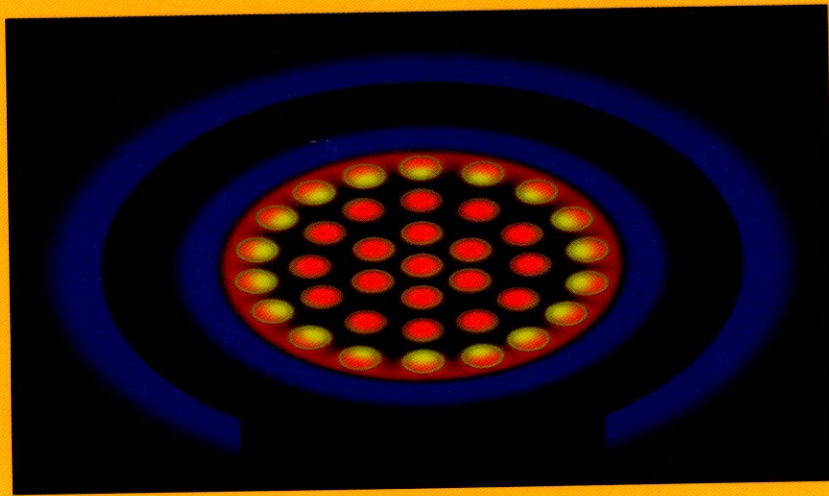


---

# La coloration des matériaux

*méthodes de calcul, simulation et formulation*

Michel Genetay



---

hermes

---

## Table des matières

<b>Introduction</b> .....	13
<b>Chapitre 1. L'homme et la couleur</b> .....	17
1.1. L'homme et la couleur .....	17
1.1.1. Perception des couleurs .....	17
1.1.2. Physiologie de la couleur.....	18
1.1.3. Aspects psychologiques.....	18
1.1.3.1. Couleurs froides.....	19
1.1.3.2. Couleurs chaudes.....	19
1.1.3.3. Couleurs claires.....	19
1.1.3.4. Couleurs sombres.....	20
1.1.3.5. Couleurs vives.....	20
1.1.3.6. Couleurs ternes .....	20
1.1.3.7. Rouge.....	20
1.1.3.8. Jaune .....	21
1.1.3.9. Vert .....	21
1.1.3.10. Bleu.....	21
1.1.3.11. Violet, pourpre .....	22
1.1.3.12. Marron, brun .....	22
1.1.3.13. Blanc .....	22
1.1.3.14. Noir.....	22
1.2. Histoire de la couleur .....	23
1.2.1. Couleurs primaires.....	23
1.2.1.1. Le spectre additif .....	23
1.2.1.2. Le spectre soustractif .....	23
1.2.1.3. Le spectre des artistes .....	23
1.2.1.4. Choix des couleurs primaires.....	24

1.2.2. Couleurs complémentaires .....	25
1.2.2.1. Couleurs secondaires .....	25
1.2.2.2. Couleurs tertiaires .....	25
1.2.2.3. Couleurs quaternaires .....	25
1.2.3. Terminologie des couleurs .....	26
1.2.3.1. Tonalité .....	26
1.2.3.2. Saturation .....	26
1.2.3.3. Luminosité .....	26
1.2.3.4. Chromaticité .....	27
1.2.3.5. Clarté .....	27
1.2.4. La mesure des couleurs .....	27
1.2.5. Les instruments de mesure .....	28
1.2.6. La couleur des objets de la vie courante .....	29

## Chapitre 2. Mélanges de matières colorées..... 31

2.1. Introduction aux mélanges .....	31
2.2. La méthode des plans d'expériences .....	34
2.2.1. Le plan d'expériences .....	34
2.2.2. Méthodologie des plans d'expériences .....	34
2.2.3. Plan de mélanges .....	37
2.2.4. Application à la couleur .....	38
2.3. Le calcul matriciel .....	39
2.3.1. Introduction .....	39
2.3.2. Définitions .....	39
2.3.2.1. Matrice .....	39
2.3.2.2. Matrice carrée .....	40
2.3.2.3. Matrice colonne ou vecteur .....	40
2.3.2.4. Matrice ligne .....	40
2.3.2.5. Matrice diagonale .....	41
2.3.2.6. Matrice symétrique .....	41
2.3.3. Opérations sur les matrices .....	41
2.3.3.1. Matrice transposée .....	41
2.3.3.2. Multiplication d'une matrice par un nombre .....	41
2.3.3.3. Multiplication d'une matrice par une matrice .....	42
2.3.3.4. Déterminant d'une matrice .....	44
2.3.3.5. Matrice inverse .....	45
2.4. L'analyse spectrale .....	46
2.4.1. Aspect physique de la lumière .....	46
2.4.2. Le spectrocolorimètre .....	47
2.5. Mélanges pour un colorant .....	50

2.6. Mélanges pour deux colorants .....	57
2.6.1. Un peu de mathématiques .....	62
2.6.2. Colorimétrie des mélanges de deux colorants .....	63
2.6.2.1. Mélanges du jaune et du rouge .....	63
2.6.2.2. Mélanges du rouge et du bleu .....	69
2.6.2.3. Mélanges du bleu au jaune .....	69
2.6.2.4. Mélanges ternaires jaune, bleu, blanc .....	69
2.6.2.5. Mélanges ternaires jaune, rouge, blanc .....	69
2.6.2.6. Mélanges ternaires rouge, bleu, blanc .....	69
2.7. Mélanges pour trois colorants .....	74
2.7.1. Représentation géométrique des mélanges à quatre constituants .....	75
2.7.2. Un peu de mathématiques .....	84
2.8. Mélanges pour quatre colorants .....	85
2.9. Conclusion sur les mélanges de couleurs .....	86

## Chapitre 3. Modèles mathématiques..... 89

3.1. Introduction, l'émail céramique .....	89
3.2. Le modèle du premier degré .....	91
3.3. Le modèle quadratique .....	94
3.4. Le modèle spécial cubique .....	102
3.4.1. Calcul des coefficients du modèle spécial cubique .....	104
3.4.1.1. La matrice du plan de mélanges .....	104
3.4.1.2. Construction de la matrice [X] .....	106
3.4.1.3. Construction de la matrice transposée de [X] .....	106
3.4.1.4. Construction de la matrice d'information .....	108
3.4.1.5. Construction de la matrice de dispersion [dispX] .....	109
3.4.1.6. Vecteurs des réponses .....	110
3.4.1.7. Construction de la matrices [COL] .....	111
3.4.1.8. Construction des matrices [B] .....	112
3.4.2. Calcul des coordonnées colorimétriques .....	113
3.4.3. Calcul d'un écart colorimétrique .....	114
3.4.4. Calculs pour une composition quelconque .....	116
3.4.5. Commentaire .....	117
3.5. Le modèle cubique .....	118
3.5.1. Modèle cubique pour trois constituants .....	121
3.5.2. Modèle cubique pour quatre constituants .....	121
3.6. Le modèle quartique .....	126
3.6.1. Plan de mélanges pour un modèle quartique .....	128
3.6.2. Résolution mathématique .....	131
3.6.2.1. Principe mathématique .....	131
3.6.2.2. Calcul des coefficients du modèle .....	131
3.6.3. Calcul des coordonnées à l'aide du modèle .....	134

3.6.4. Calcul de l'écart colorimétrique.....	137
3.6.5. Calculs pour une composition quelconque.....	137
3.6.5.1. Calcul de la coordonnée « L* ».....	138
3.6.5.2. Calcul de la coordonnée « a* ».....	139
3.6.5.3. Calcul de la coordonnée « b* ».....	140
3.6.6. Examen des courbes de variation.....	142
3.7. Composition, teneur en colorants.....	145
<b>Chapitre 4. Formulation</b> .....	149
4.1. Introduction à la formulation.....	149
4.2. Mélanges ternaires.....	151
4.2.1. Le modèle quartique pour trois constituants.....	152
4.2.2. Méthode de calcul « Mathécolor ».....	154
4.2.3. Ensemble des mélanges ternaires.....	160
4.2.4. Ensemble des réponses, espace des teintes.....	160
4.3. Formulation des mélanges quaternaires.....	164
4.3.1. Etape 1 de Mathécolor pour 4 constituants.....	165
4.3.2. Etape 2 de Mathécolor.....	165
4.3.3. Etape 3 de Mathécolor.....	165
4.3.4. Etape 4 de Mathécolor.....	165
4.3.5. La zone de calcul.....	166
4.3.6. Exemple d'automatisation des calculs.....	167
4.3.6.1. Macrocommande « transfert (t) ».....	167
4.3.6.2. Macrocommande « recherche (Z) ».....	169
4.3.7. Méthode de calcul (Mathécolor) et le modèle quartique.....	170
4.3.7.1. Le nuage de composition.....	170
4.3.7.2. Le « pas ».....	171
4.3.7.3. L'algorithme de calcul.....	171
4.3.7.4. Résultats de la formulation.....	172
<b>Chapitre 5. Extrapolation</b> .....	177
5.1. Introduction à l'extrapolation.....	177
5.2. Extrapolation ternaire.....	178
5.2.1. Représentation géométrique de l'extrapolation.....	182
5.2.2. Signification de l'extrapolation.....	184
5.2.2.1. Cas du point N extérieur au côté AB.....	184
5.2.2.2. Cas du point P extérieur à AB au-dessus de A.....	185
5.2.2.3. Raisons de l'approche algébrique des mélanges.....	185
5.2.3. Application de l'extrapolation.....	187
5.3. Représentation triangulaire des mélanges ternaires.....	188
5.3.1. Configuration de Gibb's.....	189
5.3.2. Démonstration.....	189
5.3.2.1. Premier cas.....	189
5.3.2.2. Deuxième cas.....	189
5.3.2.3. Troisième cas.....	190
5.3.3. Configuration de Roozeboom.....	192
5.4. Mélanges quaternaires.....	193
5.4.1. Comparaison des ensembles des couleurs et des mélanges.....	195
5.4.1.1. Ensemble des mélanges.....	195
5.4.1.2. Ensemble des couleurs, le solide.....	196
5.4.1.3. Solide des couleurs.....	197
5.4.2. Méthode Mathécolor.....	205
5.4.3. Extrapolation autour du tétraèdre.....	206
5.4.4. Représentation tétraédrique des mélanges quaternaires.....	208
5.4.5. Démonstration géométrique de la somme algébrique.....	210
5.4.6. Représentation géométrique par plans de coupe.....	210
5.4.7. Conséquence de l'extrapolation dans l'espace.....	218
5.4.8. Signification de la représentation algébrique des compositions.....	218
5.5. Conclusion.....	218
<b>Chapitre 6. Applications</b> .....	221
6.1. Principe global de calcul.....	221
6.1.1. Introduction.....	221
6.1.2. Application à trois constituants.....	222
6.1.2.1. Changement d'axes.....	225
6.1.2.2. Plan de mélanges inclus.....	227
6.1.3. Application à quatre constituants.....	229
6.1.3.1. Changement d'axes.....	235
6.1.3.2. Plan de mélanges inclus.....	236
6.2. Correction d'un écart de couleur.....	239
6.2.1. Quelques considérations théoriques sur la correction.....	241
6.2.2. Exemple de la correction d'un écart.....	242
6.2.2.1. Ecart de teinte.....	242
6.2.2.2. Ecart de couleur.....	244
6.3. Extrapolation.....	246
6.4. Remplacement d'un colorant.....	249
6.4.1. Cas général.....	249
6.4.2. Colorant proche.....	255
6.4.3. Modèle simplifié.....	257
6.5. Autres systèmes colorimétriques.....	261
6.5.1. Cas du système colorimétrique « X, Y, Z ».....	261
6.5.2. Le système colorimétrique « L* C* h ».....	263
6.6. Mélange de deux couleurs.....	268
6.7. Optimisation des réponses, application généralisée.....	268

<b>Chapitre 7. Conclusions</b> .....	273
7.1. Formulation .....	273
7.2. Généralités sur les applications .....	275
7.3. Domaine céramique .....	276
7.4. Les peintures .....	277
7.5. Teinté dans la masse .....	278
7.6. Point de vue qualité .....	278
7.7. Conclusion .....	279
<b>Annexes</b> .....	281
A. Logiciels et feuilles de calculs .....	281
A.1. Fichier SPECTRES .....	281
A.1.1. Page « roue art » .....	281
A.1.2. Page « SPEjrb » .....	282
A.1.3. Page « Pljrb » .....	282
A.1.4. Page « GRAPHjrb » .....	282
A.2. Fichier modèle quadratique .....	283
A.2.1. Page « calculs 10 » .....	283
A.2.2. Page « Moindre-carré 19 » .....	283
A.2.3. Page « graphiques » .....	284
A.3. Fichier Modèle cubique spécial .....	285
A.3.1. Page « direct15 » .....	285
A.3.2. Page « calcul 19 » .....	286
A.3.3. Page « mélanges 43 » .....	286
A.3.4. Page « graphique » .....	287
A.4. Fichier Modèle Quantique .....	287
A.4.1. Page « Quartic 35x35MC » .....	288
A.4.2. Page « Quartic 35 » .....	289
A.4.3. Page « Quartic 39 » .....	289
A.4.4. Page « graphique » .....	290
A.5. Fichier Ternaire JRB .....	290
A.5.1. Page « Matrices » .....	290
A.5.2. Page « Calculs » .....	291
A.5.3. Page « Recherche » .....	291
A.5.4. Page « chgAxes » .....	292
A.5.5. Page « Macro 1 » .....	293
A.6. Fichier Quantique JRBB .....	293
A.6.1. Page « Matrices » .....	293
A.6.2. Page « Calculs » .....	294
A.6.3. Page « Simul » .....	294
A.6.4. Page « Recherche » .....	295
A.6.5. Page « Axes » .....	295

A.6.6. Pages « Macro1 », « Macro2 » et « Macro3 » .....	295
A.6.7. Page « Données » .....	295
B. Matrices du modèle quartique .....	297
B.1. Matrice du modèle .....	297
B.2. Matrice transposée .....	300
B.3. Matrice d'information .....	302
B.4. Matrice de dispersion .....	305

<b>Bibliographie</b> .....	309
----------------------------	-----

<b>Index</b> .....	311
--------------------	-----