



Katsushika Hokusai « La Grande Vague »  
(Kanagawa oki namiura) 1830-1832.

# Table des matières

<b>AVANT PROPOS .....</b>	<b>3</b>
<b>CHAPITRE I GENERALITES SUR LA BATHYMETRIE .....</b>	<b>13</b>
<b>1 BATHYMETRIE ET HYDROGRAPHIE .....</b>	<b>13</b>
<b>2 LA PLANETE BLEUE .....</b>	<b>13</b>
<b>3 BESOIN DE CONNAISSANCES .....</b>	<b>16</b>
3.1 <i>La navigation .....</i>	<i>16</i>
3.2 <i>L'exploitation des ressources marines .....</i>	<i>17</i>
3.3 <i>La gestion et la protection du littoral .....</i>	<i>18</i>
3.4 <i>La délimitation du plateau continental .....</i>	<i>18</i>
<b>4 SYSTEMES D'ACQUISITION DE LA BATHYMETRIE.....</b>	<b>19</b>
4.1 <i>Des origines à l'apparition des sondeurs multifaisceaux .....</i>	<i>19</i>
4.1.1 <i>Les premiers systèmes de sondage mécaniques.....</i>	<i>19</i>
4.1.2 <i>Apparition des sondeurs acoustiques .....</i>	<i>21</i>
4.2 <i>Alternatives aux systèmes acoustiques .....</i>	<i>24</i>
4.2.1 <i>Les imageurs panchromatiques multi et hyperspectraux.....</i>	<i>25</i>
4.2.2 <i>Télémètre laser ou LIDAR.....</i>	<i>28</i>
4.2.3 <i>Le radar à ouverture synthétique (SAR).....</i>	<i>31</i>
4.2.4 <i>La bathymétrie électromagnétique aéroportée (AEMB) .....</i>	<i>32</i>
4.2.5 <i>L'altimétrie satellitaire .....</i>	<i>33</i>
<b>CHAPITRE II CARACTERISTIQUES DES DONNEES MULTIFAISCEAUX .....</b>	<b>36</b>
<b>1 CAPTEURS ACOUSTIQUES ACTUELS.....</b>	<b>36</b>
1.1 <i>Les sondeurs monofaisceaux .....</i>	<i>37</i>
1.2 <i>Les systèmes multi-transducteurs .....</i>	<i>40</i>
1.3 <i>Les sonars latéraux.....</i>	<i>41</i>
1.4 <i>Les sonars interférométriques .....</i>	<i>46</i>
1.5 <i>Les sondeurs multifaisceaux.....</i>	<i>47</i>
<b>2 SYSTEME MULTIFAISCEAU .....</b>	<b>53</b>
2.1 <i>Système composite.....</i>	<i>53</i>
2.2 <i>Localisation géographique du porteur.....</i>	<i>55</i>
2.2.1 <i>Se localiser : des aides à la navigation aux systèmes de navigation .....</i>	<i>55</i>
2.2.2 <i>Systèmes globaux de positionnement par satellite (GNSS).....</i>	<i>56</i>
2.3 <i>Mesure d'attitude du porteur.....</i>	<i>59</i>
2.4 <i>Navigation inertielle.....</i>	<i>62</i>
2.5 <i>Caractérisation des propriétés physiques de la colonne d'eau.....</i>	<i>62</i>
2.5.1 <i>Profil de célérité .....</i>	<i>63</i>
2.5.2 <i>Célérité de surface .....</i>	<i>67</i>

<b>3</b>	<b>DONNEES BATHYMETRIQUES.....</b>	<b>68</b>
3.1	<i>Description du système multifaisceau dans le référentiel navire .....</i>	<i>68</i>
3.2	<i>Coordonnées d'une sonde .....</i>	<i>70</i>
3.2.1	<i>Dans le repère géographique.....</i>	<i>71</i>
3.2.2	<i>Dans le repère terrestre.....</i>	<i>72</i>
3.3	<i>Choix d'une référence verticale .....</i>	<i>72</i>
3.4	<i>Stockage numérique des données .....</i>	<i>75</i>
<b>4</b>	<b>EXERCICES DU CHAPITRE II.....</b>	<b>77</b>
<b>5</b>	<b>CORRIGE DES EXERCICES DU CHAPITRE II .....</b>	<b>78</b>
	<b>CHAPITRE III GENERALITES SUR LE TRAITEMENT DES DONNEES.....</b>	<b>81</b>
<b>1</b>	<b>NORME HYDROGRAPHIQUE .....</b>	<b>81</b>
1.1	<i>Organisation Hydrographique Internationale.....</i>	<i>81</i>
1.2	<i>Évolutions de la norme.....</i>	<i>82</i>
1.3	<i>La qualité en hydrographie.....</i>	<i>83</i>
1.4	<i>Mise en œuvre de la norme.....</i>	<i>84</i>
<b>2</b>	<b>CLASSIFICATION D'UN LEVE BATHYMETRIQUE .....</b>	<b>84</b>
<b>3</b>	<b>FACTEURS QUALITE DES DONNEES D'UN LEVE BATHYMETRIQUE.....</b>	<b>87</b>
3.1	<i>Incertitudes sur les mesures.....</i>	<i>87</i>
3.1.1	<i>Erreur et incertitude d'une mesure .....</i>	<i>87</i>
3.1.2	<i>Types d'incertitudes.....</i>	<i>88</i>
3.1.3	<i>Incertitude aléatoire et régions de confiance des mesures.....</i>	<i>89</i>
3.1.4	<i>Incertitudes sur les mesures définies par la norme S-44 .....</i>	<i>92</i>
3.2	<i>Couverture d'un levé.....</i>	<i>94</i>
3.2.1	<i>Évolution du critère dans la norme S-44.....</i>	<i>94</i>
3.2.2	<i>Couverture d'un sondeur multifaisceau .....</i>	<i>96</i>
3.2.3	<i>Détection d'éléments.....</i>	<i>98</i>
<b>4</b>	<b>ESTIMATION A PRIORI DE LA QUALITE DES DONNEES .....</b>	<b>98</b>
4.1	<i>Propagation d'erreurs : rappel du principe .....</i>	<i>98</i>
4.2	<i>Cas d'une fonction à une variable.....</i>	<i>99</i>
4.3	<i>Cas d'une fonction de N variables.....</i>	<i>100</i>
4.4	<i>Ajout d'une seconde fonction de N variables .....</i>	<i>101</i>
4.5	<i>Application aux données bathymétriques multifaisceau.....</i>	<i>102</i>
4.5.1	<i>Incertitude a priori sur la profondeur d'une sonde .....</i>	<i>102</i>
4.5.2	<i>Incertitude a priori sur la profondeur réduite d'une sonde .....</i>	<i>112</i>
4.5.3	<i>Incertitude a priori sur la position d'une sonde.....</i>	<i>115</i>
<b>5</b>	<b>CARACTERISTIQUES DU TRAITEMENT .....</b>	<b>126</b>
5.1	<i>Évolution des données .....</i>	<i>126</i>
5.1.1	<i>De l'analogique au numérique.....</i>	<i>126</i>
5.1.2	<i>Augmentation du volume des données.....</i>	<i>126</i>
5.1.3	<i>Nouvelle vision des données.....</i>	<i>128</i>
5.1.4	<i>Amélioration de la qualité des données.....</i>	<i>128</i>
5.1.5	<i>Enrichissement des données.....</i>	<i>129</i>
5.1.6	<i>Format numérique des données.....</i>	<i>129</i>
5.1.7	<i>Standardisation des données.....</i>	<i>129</i>
5.2	<i>Nouvelles orientations en matière de traitement.....</i>	<i>129</i>
5.2.1	<i>Avancées technologiques des systèmes informatiques .....</i>	<i>129</i>
5.2.2	<i>Éventail de nouveaux outils .....</i>	<i>130</i>
5.2.3	<i>Gestion numérique des traitements.....</i>	<i>131</i>
5.3	<i>Évolution des fournitures.....</i>	<i>131</i>

<b>6</b>	<b>PRINCIPALES ETAPES DU TRAITEMENT .....</b>	<b>131</b>
6.1	<i>Niveaux de traitement des données .....</i>	<i>131</i>
6.2	<i>Synoptique du traitement.....</i>	<i>131</i>
6.3	<i>Validation des données brutes .....</i>	<i>132</i>
6.3.1	Validation des données bathymétriques.....	132
6.3.2	Validation des données de navigation .....	133
6.3.3	Validation des données d'attitude .....	135
6.3.4	Autres données.....	137
6.4	<i>Correction et réduction des données bathymétriques .....</i>	<i>137</i>
6.5	<i>Géoréférencement des données.....</i>	<i>138</i>
6.6	<i>Contrôle qualité et validation des données géoréférencées.....</i>	<i>138</i>
<b>7</b>	<b>TRAITEMENT D'UN LEVE .....</b>	<b>140</b>
7.1	<i>Traitement journalier .....</i>	<i>140</i>
7.2	<i>Traitement global .....</i>	<i>140</i>
<b>8</b>	<b>EXERCICES DU CHAPITRE III .....</b>	<b>140</b>
<b>9</b>	<b>CORRIGES DES EXERCICES DU CHAPITRE III .....</b>	<b>142</b>
<b>CHAPITRE IV DETECTION ET IDENTIFICATION D'ERREURS SYSTEMATIQUES ..</b>		<b>146</b>
<b>1</b>	<b>ERREURS SYSTEMATIQUES .....</b>	<b>146</b>
1.1	<i>Définition .....</i>	<i>146</i>
1.2	<i>Traitement .....</i>	<i>146</i>
1.3	<i>Typologie.....</i>	<i>147</i>
1.4	<i>Erreurs systématiques fixes.....</i>	<i>150</i>
1.4.1	Biais sur les angles d'alignement entre la centrale d'attitude et le sondeur .....	150
1.4.2	Latence entre le système de positionnement et le sondeur .....	155
1.4.3	Erreurs de célérité.....	156
1.5	<i>Erreurs systématiques dynamiques.....</i>	<i>158</i>
1.5.1	Latence entre la centrale d'attitude et le sondeur.....	159
1.5.2	Désalignement de la centrale d'attitude .....	160
1.5.3	Biais sur les bras de levier.....	165
1.5.4	Gradient de célérité en surface et pilonnement .....	165
1.5.5	Célérité de surface et roulis .....	166
<b>2</b>	<b>CALIBRATION .....</b>	<b>167</b>
2.1	<i>Calibration des capteurs .....</i>	<i>167</i>
2.1.1	Étalonnage à la barre .....	168
2.1.2	Calibration d'un sondeur multifaisceau .....	168
2.1.3	Calibration d'une centrale d'attitude .....	169
2.2	<i>Calibration du système .....</i>	<i>169</i>
2.2.1	Approche séquentielle.....	169
2.2.2	Approche globale.....	174
<b>3</b>	<b>IDENTIFICATION D'ARTEFACTS .....</b>	<b>176</b>
3.1	<i>Procédure manuelle .....</i>	<i>176</i>
3.1.1	Principe .....	176
3.1.2	Exemples.....	177
3.2	<i>Méthodes semi-automatiques ou automatiques.....</i>	<i>193</i>
3.2.1	Identification des erreurs systématiques dynamiques.....	193
3.2.2	Correction d'erreurs de célérité .....	195
3.2.3	Recalage de la navigation.....	196
<b>4</b>	<b>EXERCICES DU CHAPITRE IV.....</b>	<b>196</b>
<b>5</b>	<b>CORRIGES DES EXERCICES DU CHAPITRE IV .....</b>	<b>198</b>

<b>CHAPITRE V VALIDATION MANUELLE ET AUTOMATIQUE DES DONNEES</b>	
<b>BATHYMETRIQUES .....</b>	<b>202</b>
<b>1 ERREURS PONCTUELLES.....</b>	<b>202</b>
1.1 <i>Généralités .....</i>	<i>202</i>
1.1.1 Terminologie.....	202
1.1.2 Définitions.....	202
1.1.3 Typologie.....	203
1.2 <i>En bathymétrie.....</i>	<i>203</i>
1.2.1 Définitions.....	203
1.2.2 Sources d'erreurs .....	204
1.2.3 Exemples.....	204
<b>2 APPROCHE MANUELLE DE LA VALIDATION .....</b>	<b>207</b>
2.1 <i>Contexte.....</i>	<i>207</i>
2.2 <i>Principe .....</i>	<i>207</i>
2.3 <i>Pratique et écueils .....</i>	<i>209</i>
2.3.1 Analyse de la qualité des données à l'échelle d'une zone du levé.....	209
2.3.2 Mise en œuvre de l'éditeur de fauchée.....	210
2.3.3 Filtrage des données.....	210
2.3.4 Mise en œuvre de l'éditeur géographique.....	211
2.3.5 Mise à jour de la carte de suivi des traitements .....	212
2.4 <i>Limites.....</i>	<i>212</i>
<b>3 GENERALITES SUR LES ALGORITHMES DE DETECTION D'ERREURS.....</b>	<b>213</b>
3.1 <i>Défis à relever.....</i>	<i>213</i>
3.2 <i>Caractéristiques des données.....</i>	<i>214</i>
3.2.1 Types de données.....	214
3.2.2 Marquage des données.....	214
3.3 <i>Classification des algorithmes .....</i>	<i>215</i>
3.3.1 Modélisation statistique des données.....	216
3.3.2 Description du voisinage des données.....	216
3.3.3 Regroupement ou agrégation des données .....	217
3.3.4 Classification des données .....	217
3.4 <i>Mise en forme des résultats .....</i>	<i>217</i>
3.5 <i>Evaluation des algorithmes .....</i>	<i>218</i>
<b>4 VALIDATION AUTOMATIQUE DES DONNEES BATHYMETRIQUES .....</b>	<b>220</b>
4.1 <i>Spécificités du contexte hydrographique.....</i>	<i>220</i>
4.1.1 Caractéristiques des données bathymétriques.....	220
4.1.2 Caractéristiques des mesures aberrantes .....	220
4.1.3 Classification des approches .....	221
4.2 <i>Algorithmes de validation semi-automatique ou automatique .....</i>	<i>222</i>
4.2.1 Regroupement de données (Du, 1996).....	222
4.2.2 Détection de sondes isolées (Eeg, 1995).....	225
4.2.3 Approximation robuste (Motao, 1999).....	227
4.2.4 Triangulation robuste (Canepa, 2003).....	228
4.2.5 Estimation combinée de la bathymétrie et de son incertitude (Calder, 2003).....	231
4.2.6 Validation hiérarchique et robuste de la bathymétrie (Debes, 2012).....	235
4.3 <i>Estimation des performances d'un algorithme.....</i>	<i>239</i>
<b>CHAPITRE VI MODELISATION DU TERRAIN.....</b>	
<b>241</b>	
<b>1 MODELES NUMERIQUES DE TERRAIN .....</b>	<b>241</b>
1.1 <i>Intérêts d'un modèle de terrain .....</i>	<i>241</i>
1.2 <i>Définition .....</i>	<i>242</i>

1.3	<i>Principe de l'interpolation spatiale</i> .....	242
1.3.1	Interpolation dans un espace à une dimension .....	242
1.3.2	Interpolation ou extrapolation .....	243
1.3.3	Interpolation spatiale .....	244
1.4	<i>Différents modèles</i> .....	245
1.4.1	DTM, DEM ou DSM .....	245
1.4.2	Principaux types d'interpolateur .....	246
1.4.3	Différents types de maillage .....	246
<b>2</b>	<b>PRINCIPALES TECHNIQUES D'INTERPOLATION SPATIALE</b> .....	<b>247</b>
2.1	<i>Classification des interpolateurs</i> .....	247
2.1.1	Critères de classification .....	247
2.1.2	Interpolateurs déterministes ou stochastiques .....	247
2.1.3	Interpolateurs discrets ou continus .....	248
2.1.4	Interpolateurs locaux ou globaux .....	249
2.1.5	Interpolateurs exacts ou approximatifs .....	249
2.2	<i>Techniques barycentriques</i> .....	249
2.2.1	Interpolation par moyenne glissante .....	250
2.2.2	Interpolation par moyenne pondérée par l'inverse de la distance (IDW) .....	251
2.3	<i>Techniques de partitionnement de l'espace</i> .....	256
2.3.1	Triangulations .....	256
2.3.2	Voisins naturels .....	267
2.4	<i>Les splines</i> .....	271
2.4.1	Historique .....	271
2.4.2	Généralités .....	272
2.4.3	Bases polynomiales usuelles .....	275
2.4.4	B-splines et paramétrisation globale .....	280
2.4.5	Autres types de splines .....	284
2.4.6	Approche variationnelle des splines .....	285
2.5	<i>Les surfaces de tendance</i> .....	289
2.5.1	Régression classique .....	289
2.5.2	Régression locale .....	290
2.6	<i>Le Krigeage</i> .....	291
<b>3</b>	<b>CONSTRUCTION D'UN MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN</b> .....	<b>295</b>
3.1	<i>Facteurs affectant la qualité d'un modèle de terrain</i> .....	295
3.1.1	Qualité des données .....	295
3.1.2	Morphologie du terrain .....	296
3.1.3	Interpolateur .....	296
3.2	<i>Résolution, multirésolution d'un modèle</i> .....	297
<b>4</b>	<b>MODELES BATHYMETRIQUES</b> .....	<b>299</b>
4.1	<i>Modèles bathymétriques à l'échelle mondiale</i> .....	299
4.1.1	Histoire de la carte bathymétrique des Océans : GEBCO (Carpine 2003) .....	299
4.1.2	Inventaire des modèles disponibles .....	304
4.1.3	Différences entre modèles .....	307
4.1.4	Construction de modèles globaux: exemple .....	309
4.2	<i>Modèles bathymétriques à l'échelle régionale</i> .....	311
4.3	<i>Surfaces de Navigation</i> .....	313
	<b>CHAPITRE VII SYNTHESE D'UN LEVE BATHYMETRIQUE</b> .....	<b>316</b>
<b>1</b>	<b>ESTIMATION A POSTERIORI DE LA PRECISION DES SONDÉS</b> .....	<b>316</b>
1.1	<i>Précision verticale</i> .....	316
1.1.1	Construction d'une surface de référence .....	316

1.1.2 Comparaison de données au modèle de référence .....	317
1.1.3 Comparaison de données à différents systèmes de mesures bathymétriques.....	320
1.2 <i>Précision horizontale</i> .....	321
<b>2 CONTROLE QUALITE DES MODELES NUMERIQUES DE TERRAIN .....</b>	<b>322</b>
2.1 <i>Généralités</i> .....	322
2.2 <i>Mesures globales</i> .....	323
2.3 <i>Distribution spatiale des écarts</i> .....	325
2.4 <i>Description qualitative des écarts</i> .....	326
<b>3 REPRESENTATION DES DONNEES BATHYMETRIQUES.....</b>	<b>327</b>
3.1 <i>Histoire</i> .....	327
3.2 <i>Différents modes de représentation des données spatiales</i> .....	329
3.2.1 Sélection et représentation de sondes .....	330
3.2.2 Extraction et tracé d'isobathes.....	331
3.2.3 Du 1D au 2D.....	335
3.2.4 Représentations 2D ou raster d'un terrain .....	335
3.2.5 Du 2D à l'illusion du 3D.....	340
3.3 <i>Nouvelles approches</i> .....	345
<b>4 RAPPORT DE LEVE .....</b>	<b>345</b>
4.1 <i>Description générale de la zone de levé</i> .....	345
4.2 <i>Acquisition et traitement des données</i> .....	346
4.3 <i>Description des références verticale et horizontale</i> .....	347
<b>CHAPITRE VIII ANALYSE MORPHOLOGIQUE DE TERRAIN .....</b>	<b>348</b>
<b>1 BREVE HISTOIRE DE LA GEOMORPHOMETRIE.....</b>	<b>348</b>
1.1 <i>Hypsométrie – formes planimétriques</i> .....	348
1.2 <i>Réseau de drainage – analyse fréquentielle des pentes</i> .....	349
1.3 <i>Premiers modèles numériques de terrains – outils numériques</i> .....	350
1.4 <i>Quantification de formes paysagères</i> .....	350
<b>2 DEFINITION ET PRINCIPES .....</b>	<b>351</b>
<b>3 DESCRIPTEURS DE GEOMORPHOMETRIE GENERALE.....</b>	<b>352</b>
3.1 <i>Généralités</i> .....	352
3.2 <i>Pentes et exposition d'un terrain</i> .....	352
3.2.1 Voisinage de 3 points (TPP).....	355
3.2.2 Voisinage constitué des 4 plus proches voisins (FCN).....	356
3.2.3 Voisinage de 8 points.....	356
3.2.4 Voisinage de 9 points.....	358
3.3 <i>Courbures d'un terrain</i> .....	359
3.3.1 Courbure d'une courbe.....	359
3.3.2 Courbures d'une surface.....	359
3.3.3 Courbures principales, courbure moyenne et courbure gaussienne .....	367
3.3.4 Autres courbures .....	368
3.3.5 Calcul de courbures sur une grille régulière.....	369
3.4 <i>Précision des indicateurs morphométriques d'un terrain</i> .....	371
3.5 <i>Index de position bathymétrique</i> .....	374
3.6 <i>Autres de mesures de rugosité</i> .....	374
<b>4 DESCRIPTEURS HYDROLOGIQUES D'UN TERRAIN .....</b>	<b>376</b>
4.1 <i>Connexités</i> .....	376
4.2 <i>Détection de maxima</i> .....	376
4.2.1 Maxima régionaux .....	376
4.2.2 Maxima significatifs .....	377

---

4.2.3	Ligne de partage des eaux (LPE) .....	378
4.2.4	Surface drainée et lignes structurales .....	379
<b>5</b>	<b>GEOMORPHOMETRIE DES FONDS MARINS .....</b>	<b>380</b>
5.1	<i>Classification de surfaces</i> .....	<i>380</i>
5.1.1	Principe.....	380
5.1.2	Spécificité du contexte géomorphologique.....	380
5.1.3	Exemples de classification .....	381
5.2	<i>Exemples</i> .....	<i>382</i>
5.2.1	Caractérisation et répartition des pockmarks.....	382
5.2.2	Etude de la migration de dunes .....	383
5.2.3	Analyse de la distribution spatiale du corail.....	384
<b>6</b>	<b>EXERCICES DU CHAPITRE VIII.....</b>	<b>387</b>
<b>7</b>	<b>CORRIGES DES EXERCICES DU CHAPITRE VIII.....</b>	<b>388</b>
	<b>GLOSSAIRE.....</b>	<b>393</b>
	<b>INDEX .....</b>	<b>396</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>401</b>