

SESSION DE 2007

CA/PLP

CONCOURS EXTERNE ET CAFEP

Section : GENIE ELECTRIQUE Option : électrotechnique et énergie

SCIENCES ET TECHNIQUES INDUSTRIELLES

Durée : 6 heures

Calculatrice électronique de poche, y compris programmable, alphanumérique ou à écran graphique, à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

L'usage de tout document et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Méto « Météor »

Composition du sujet :

Présentation	Page 2
Caractéristiques techniques d'une rame	Page 3
Caractéristiques d'un moteur asynchrone	Page 3
Travail demandé (cahier n°1) :	
Partie A : étude de la chaîne cinématique	Page 4
Partie B : étude de la motorisation	Page 10
Partie C : étude du convertisseur statique	Page 19
Documents réponses :	
Partie B : étude de la motorisation	Page 24
Partie C : étude du convertisseur statique	Page 27
Annexes :	
Partie A	Page 30
Partie B	Page 31
Partie C	Page 33

Conseils aux candidats :

Les différentes parties du sujet sont indépendantes. De nombreuses questions sont elles mêmes indépendantes. Une lecture attentive de l'ensemble s'avère nécessaire avant de composer.

Il sera tenu compte de la cohérence avec laquelle les candidats traiteront chaque partie, le jury préférant une réflexion d'ensemble de la partie abordée à un éparpillement des réponses.

Les candidats sont priés de rédiger sur le document fourni (cahier N°1). Il est demandé de présenter clairement les calculs, de dégager et d'encadrer les résultats relatifs à chaque question, d'utiliser les notations du sujet.

La qualité des réponses (utilisation d'une forme adaptée pour présenter le résultat, justification du résultat...) sera prise en compte dans l'évaluation.

Si vous estimez que le texte du sujet, de ses questions ou de ses annexes comporte une erreur, signalez lisiblement votre remarque dans votre copie et poursuivez l'épreuve en conséquence.

De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.

N.B. : *Hormis l'en-tête détachable, la copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.*

Tournez la page S.V.P.

A

PRÉSENTATION

Depuis plus de 100 ans, se sont succédées cinq générations de matériels roulants à la RATP. La sixième est en vue. Le dernier né de la cinquième génération est le MP89 : matériel roulant ferroviaire sur pneumatiques. Il se décline en deux versions :

- o La version CC (Conduite Conducteur) équipe les rames de la ligne 1 du métro parisien.
- o La version CA (Conduite Automatique) est destinée aux rames de la ligne METEOR, alias ligne 14.

Cette dernière version de matériel sera l'objet de l'étude proposée dans ce sujet.

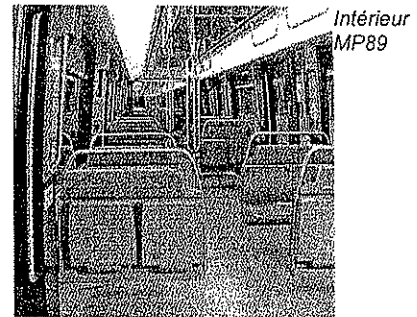
Les rames sont formées de 4 motrices encadrées par deux remorques. Les 6 voitures sont reliées entre elles par des soufflets permettant une large intercirculation. Les voyageurs peuvent aller d'un bout à l'autre des rames, et ainsi mieux se répartir. La capacité d'un train de 6 voitures en charge confort (4 voyageurs/m²) est de 722 voyageurs pour la version CA et 680 voyageurs pour la version CC.

Hormis l'absence de conducteur, les deux versions du MP89, CC et CA, sont identiques. Chacune des quatre motrices est équipée de deux bogies monomoteurs. Les moteurs utilisés, d'une puissance de 250 kW chacun, sont de type asynchrone triphasé. Ils sont alimentés, à partir de deux rails de guidage sous une tension de 750 VDC, par des onduleurs de tension à GTO. Les performances obtenues sont les suivantes :

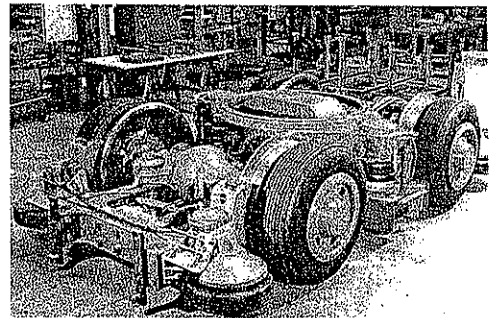
- o Vitesse maxi : 80 km/h
- o Accélération maxi : 1,34 m/s².
- o Décélération maxi : 2,3 m/s².



Voiture MP89

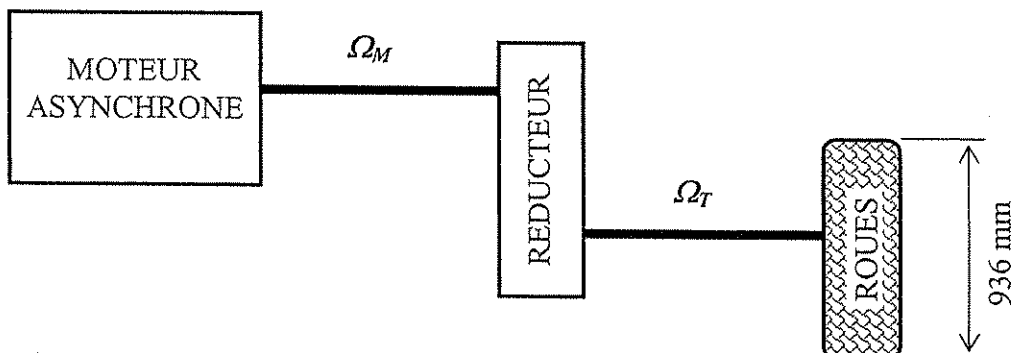


Intérieur MP89



Bogie moteur

Modèle simplifié de la chaîne cinématique



CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES D'UNE RAME MP 89 VERSION CA (résumé)

Type de roues	: Pneu
Type d'équipement	: Onduleur
Nombre de voitures	: 6
Nombre de motrices	: 4
Nombre de bogies par motrice	: 2
Nombre de moteurs par bogie	: 1
Longueur de la rame (en m)	: 90,28
Largeur de la rame (en m)	: 2,45
Hauteur d'une voiture (en m)	: 3,46
Largeur de rail (en m)	: 1,44
Superficie utile pour les voyageurs debouts (en m ²)	: 144,50
Nombre de voyageurs debouts, par m ² , en charge confort	: 4
Nombre de voyageurs debouts, par m ² , en charge normale	: 6
Nombre de voyageurs debouts, par m ² , en charge exceptionnelle	: 8
Nombre de places assises	: 144
Masse à vide du train (M_v en kg)	: 140 200
Masse d'inertie du train (M_i en kg)	: 29 448
Rapport des masses motrice/remorque	: 1,17
Vitesse max. du train en alignement droit (en km/h)	: 80
Diamètre d'une roue (D en m)	: 0,936
Rendement de la chaîne de transmission (η_T)	: 0,965
Rapport de réduction de la transmission (r)	: 9,11

CARACTÉRISTIQUES D'UN MOTEUR ASYNCHRONE DE TRACTION :

Type	: 4 ELA 2848
Type ventilation	: auto ventilé VORTEX
Rotor	: cage d'écureuil
Masse totale du moteur	: 170 kg
Couplage	: étoile
Nombre de paires de pôles (p)	: 2

CARACTÉRISTIQUES EN RÉGIME CONTINU, ONDULEUR, 70 Hz :

Puissance utile à l'arbre	: 250 kW
Couple à l'arbre	: 1 170 Nm
Tension simple (phase - neutre)	: 325 V
Courant par phase	: 312 A
Facteur de puissance ($\cos\phi$)	: 0,887
Vitesse de rotation	: 2 034 tr/min.
Glissement	: 3,15 %
Rendement	: 92,7 %

CARACTÉRISTIQUES EN RÉGIME MAXIMAL CONTINU SINUSOIDAL 70 Hz :

Puissance utile à l'arbre	: 300 kW
Couple à l'arbre	: 1 420 Nm
Tension simple (phase - neutre)	: 325 V
Courant par phase	: 369 A
Facteur de puissance ($\cos\phi$)	: 0,901
Vitesse de rotation	: 2 019 tr/min.
Glissement	: 3,84 %
Rendement	: 92,4 %

VALEURS MAXIMALES :

Puissance utile à l'arbre	: 325 kW
Fréquence	: 143 Hz
Couple à l'arbre	: 2 380 Nm
Tension simple	: 405 V
Courant par phase	: 510 A
Vitesse de rotation	: 4 130 tr/min.

1. The first step in the process of the investigation is the identification of the problem. This involves a thorough review of the available information and a clear definition of the issue at hand.

2. Once the problem is identified, the next step is to gather relevant data. This can be done through various methods, including interviews, surveys, and analysis of existing records.

3. After the data has been collected, it is essential to analyze it carefully. This step involves looking for patterns, trends, and any other information that may be useful in understanding the problem.

4. The final step in the process is to develop a plan of action. This plan should outline the steps that will be taken to address the problem and should be based on the findings of the investigation.

5. Once the plan has been developed, it is important to implement it. This involves putting the plan into action and monitoring the progress of the investigation.

6. Finally, it is essential to evaluate the results of the investigation. This step involves comparing the findings to the original problem and determining whether the plan has been effective in addressing the issue.

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32

33

34

35

36

37

38

39

40

41

42

43

44

45

46

47

48

49

50

51

52

53

54

55

56

57

58

59

60

61

62

63

64

65

66

67

68

69

70

71

72

73

74

75

76

77

78

79

80

81

82

83

84

85

86

87

88

89

90

91

92

93

94

95

96

97

98

99

100

101

102

103

104

105

106

107

108

109

110

111

112

113

114

115

116

117

118

119

120

121

122

123

124

125

126

127

128

129

130

131

132

133

134

135

136

137

138

139

140

141

142

143

144

145

146

147

148

149

150

151

152

153

154

155

156

157

158

159

160

161

162

163

164

165

166

167

168

169

170

171

172

173

174

175

176

177

178

179

180

181

182

183

184

185

186

187

188

189

190

191

192

193

194

195

196

197

198

199

200

201

202

203

204

205

206

207

208

209

210

211

212

213

214

215

216

217

218

219

220

221

222

223

224

225

226

227

228

229

230

231

232

233

234

235

236

237

238

239

240

241

242

243

244

245

246

247

248

249

250

251

252

253

254

255

256

257

258

259

260

261

262

263

264

265

266

267

268

269

270

271

272

273

274

275

276

277

278

279

280

281

282

283

284

285

286

287

288

289

290

291

292

293

294

295

296

297

298

299

300

301

302

303

304

305

306

307

308

309

310

311

312

313

314

315

316

317

318

319

320

321

322

323

324

325

326

327

328

329

330

331

332

333

334

335

336

337

338

339

340

341

342

343

344

345

346

347

348

349

350

351

352

353

354

355

356

357

358

359

360

361

362

363

364

365

366

367

368

369

370

371

372

373

374

375

376

377

378

379

380

381

382

383

384

385

386

387

388

389

390

391

392

393

394

395

396

397

398

399

400

401

402

403

404

405

406

407

408

409

410

411

412

413

414

415

416

417

418

419

420

421

422

423

424

425

426

427

428

429

430

431

432

433

434

435

436

437

438

439

440

441

442

443

444

445

446

447

448

449

450

451

452

453

454

455

456

457

458

459

460

461

462

463

464

465

466

467

468

469

470

471

472

473

474

475

476

477

478

479

480

481

482

483

484

485

486

487

488

489

490

491

492

493

494

495

496

497

498

499

500

501

502

503

504

505

506

507

508

509

510

511

512

513

514

515

516

517

518

519

520

521

522

523

524

525

526

527

528

529

530

531

532

533

534

535

536

537

538

5

A1.6.1. Écrire l'équation fondamentale de la dynamique au niveau de l'arbre d'un moteur :

1. The first step in the process of the investigation is the identification of the problem. This involves a thorough review of the available information and a clear definition of the issue at hand. Once the problem is identified, the next step is to gather relevant data and information. This can be done through various methods, including interviews, surveys, and document analysis. The third step is to analyze the data and information gathered. This involves identifying patterns, trends, and potential causes of the problem. The final step is to develop and implement a solution. This may involve creating a plan, allocating resources, and monitoring progress. The process of investigation is an ongoing one, and it may be necessary to revisit previous steps as more information is gathered or as the situation evolves.

$$C_M = \frac{D}{16 \times \eta_T \times r} \times (F_R + M_D \times a)$$

1. The first step in the process of the investigation is the identification of the problem. This is done by the investigator who is responsible for the investigation. The investigator must identify the problem and the scope of the investigation. This is done by the investigator who is responsible for the investigation.

2. The second step in the process of the investigation is the collection of data. This is done by the investigator who is responsible for the investigation. The investigator must collect data that is relevant to the problem and the scope of the investigation. This is done by the investigator who is responsible for the investigation.

3. The third step in the process of the investigation is the analysis of the data. This is done by the investigator who is responsible for the investigation. The investigator must analyze the data to determine the cause of the problem and the scope of the investigation. This is done by the investigator who is responsible for the investigation.

4. The fourth step in the process of the investigation is the development of a solution. This is done by the investigator who is responsible for the investigation. The investigator must develop a solution that addresses the problem and the scope of the investigation. This is done by the investigator who is responsible for the investigation.

5. The fifth step in the process of the investigation is the implementation of the solution. This is done by the investigator who is responsible for the investigation. The investigator must implement the solution that addresses the problem and the scope of the investigation. This is done by the investigator who is responsible for the investigation.

6. The sixth step in the process of the investigation is the evaluation of the solution. This is done by the investigator who is responsible for the investigation. The investigator must evaluate the solution to determine if it has been successful in addressing the problem and the scope of the investigation. This is done by the investigator who is responsible for the investigation.

7. The seventh step in the process of the investigation is the documentation of the solution. This is done by the investigator who is responsible for the investigation. The investigator must document the solution that addresses the problem and the scope of the investigation. This is done by the investigator who is responsible for the investigation.

8. The eighth step in the process of the investigation is the communication of the solution. This is done by the investigator who is responsible for the investigation. The investigator must communicate the solution that addresses the problem and the scope of the investigation. This is done by the investigator who is responsible for the investigation.

9. The ninth step in the process of the investigation is the monitoring of the solution. This is done by the investigator who is responsible for the investigation. The investigator must monitor the solution to determine if it is still successful in addressing the problem and the scope of the investigation. This is done by the investigator who is responsible for the investigation.

10. The tenth step in the process of the investigation is the termination of the solution. This is done by the investigator who is responsible for the investigation. The investigator must terminate the solution that addresses the problem and the scope of the investigation. This is done by the investigator who is responsible for the investigation.

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32

33

34

35

36

37

38

39

40

41

42

43

44

45

46

47

48

49

50

51

52

53

54

55

56

57

58

59

60

61

62

63

64

65

66

67

68

69

70

71

72

73

74

75

76

77

78

79

80

81

82

83

84

85

86

87

88

89

90

91

92

93

94

95

96

97

98

99

100

101

102

103

104

105

106

107

108

109

110

111

112

113

114

115

116

117

118

119

120

121

122

123

124

125

126

127

128

129

130

131

132

133

134

135

136

137

138

139

140

141

142

143

144

145

146

147

148

149

150

151

152

153

154

155

156

157

158

159

160

161

162

163

164

165

166

167

168

169

170

171

172

173

174

175

176

177

178

179

180

181

182

183

184

185

186

187

188

189

190

191

192

193

194

195

196

197

198

199

200

201

202

203

204

205

206

207

208

209

210

211

212

213

214

215

216

217

218

219

220

221

222

223

224

225

226

227

228

229

230

231

232

233

234

235

236

237

238

239

240

241

242

243

244

245

246

247

248

249

250

251

252

253

254

255

256

257

258

259

260

261

262

263

264

265

266

267

268

269

270

271

272

273

274

275

276

277

278

279

280

281

282

283

284

285

286

287

288

289

290

291

292

293

294

295

296

297

298

299

300

301

302

303

304

305

306

307

308

309

310

311

312

313

314

315

316

317

318

319

320

321

322

323

324

325

326

327

328

329

330

331

332

333

334

335

336

337

338

339

340

341

342

343

344

345

346

347

348

349

350

351

352

353

354

355

356

357

358

359

360

361

362

363

364

365

366

367

368

369

370

371

372

373

374

375

376

377

378

379

380

381

382

383

384

385

386

387

388

389

390

391

392

393

394

395

396

397

398

399

400

401

402

403

404

405

406

407

408

409

410

411

412

413

414

415

416

417

418

419

420

421

422

423

424

425

426

427

428

429

430

431

432

433

434

435

436

437

438

439

440

441

442

443

444

445

446

447

448

449

450

451

452

453

454

455

456

457

458

459

460

461

462

463

464

465

466

467

468

469

470

471

472

473

474

475

476

477

478

479

480

481

482

483

484

485

486

487

488

489

490

491

492

493

494

495

496

497

498

499

500

501

502

503

504

505

506

507

508

509

510

511

512

513

514

515

516

517

518

519

520

521

522

523

524

525

52

Point	V (km/h)	a (m/s ²)	F _R (N)	Ω _M (rad/s)	n _M (min ⁻¹ .)	C _M (Nm)
P ₀	0	0	0	0	0	0
P ₁	3,50					
P ₂	10					
P ₃	20					
P ₄	30					
P ₅	40					
P ₆	50					
P ₇	60					
P ₈	70					
P ₉	80					

A1.9. Décrire les contraintes supportées par le moteur si son point de fonctionnement se situe dans les zones 1 à 7 données dans cette figure. Préciser si chacun de ces fonctionnements est autorisé et éventuellement dans quelles limites. (2 phrases maxi. pour chaque zone).

Zone 1 :
Zone 2 :

Zone 3 :

Zone 4 :

Zone 5 :

Zone 6 :

Zone 7 :

A1.10. Tracer sur la figure A1 ci-dessous, à partir des résultats du tableau de la question A1.8, l'allure de la courbe $C_M = f(n_M)$. (Les points permettant de tracer cette courbe doivent être matérialisés par des croix visibles).

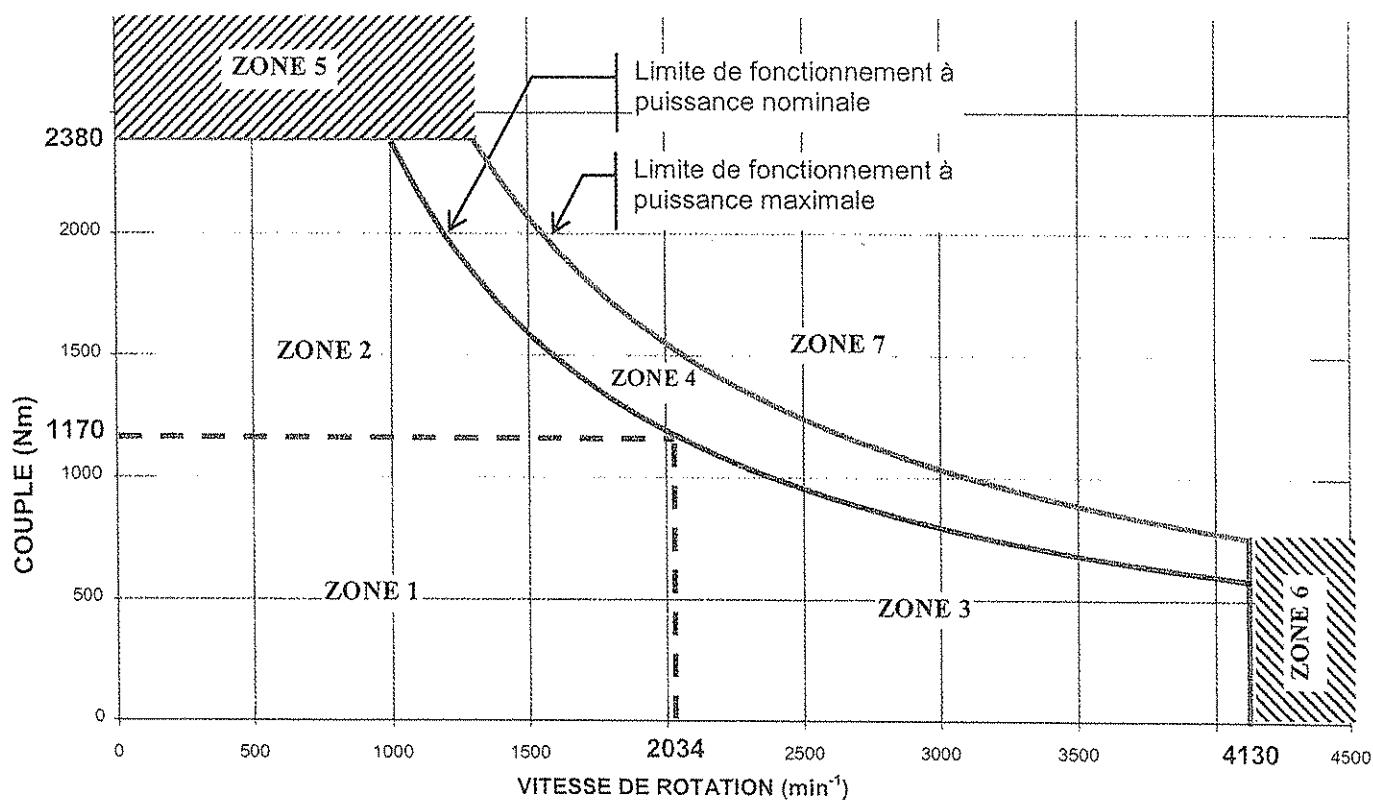


Fig. A1 : limites de fonctionnement d'un moteur asynchrone de la rame MP89

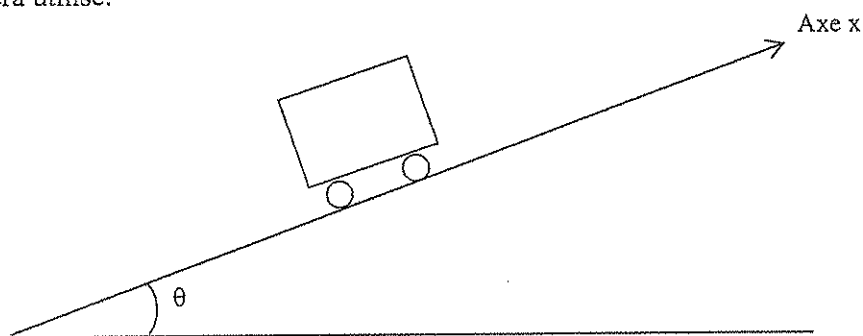
A1.11. Conclure.

A2. Vérification des performances de la motorisation en tunnel, pente de 6 %, alignement droit et en charge exceptionnelle (8 voyageurs par mètre carré).

La masse d'une rame en charge exceptionnelle est $M_{CE} = 231\,200\text{ kg}$.

On notera θ l'angle d'inclinaison de la voie par rapport à l'horizontale, a l'accélération linéaire de la rame, F_R la résistance à l'avancement, F_M la Force motrice et $M_{CE} \times g$ et M_{DE} respectivement le poids d'une rame et la masse inertielle en charge exceptionnelle.

Le modèle suivant sera utilisé.



A2.1. Représenter sur la figure ci-dessus, suivant l'axe x , l'ensemble des efforts auxquels sera soumise une rame.

A2.2. Montrer que le couple résistant en régime établi, ramené à l'arbre d'un moteur, peut s'écrire sous la forme suivante :

$$C_{RME} = \frac{(F_R + M_{CE} \times g \times \sin \theta) \times D}{16 \times \eta_T \times r}$$

A2.3. Calculer ce couple pour une vitesse $V = 39 \text{ km/h}$, correspondant à la vitesse de croisière d'une rame de la ligne METEOR.

A2.4. Calculer la vitesse de rotation n_M du moteur dans ce cas.

A2.5. Calculer la puissance utile P_u d'un moteur nécessaire pour maintenir la rame à cette vitesse.

A2.6. Conclure, en comparant les résultats des questions A2.3, A2.4 et A2.5 aux caractéristiques techniques données pour un moteur.

PARTIE B : ÉTUDE DE LA MOTORISATION

B1. Étude du moteur asynchrone triphasé en régime nominal

L'objectif est de déterminer les grandeurs électriques (fréquence, courant, tension) en sortie du variateur, nécessaires au fonctionnement nominal des moteurs.

La motorisation utilisée est de type asynchrone. Un variateur de vitesse permet de piloter un ensemble de deux bogies monomoteurs. On prendra comme modèle du moteur asynchrone triphasé le schéma équivalent par phase *fig. B1* (les pertes fer et mécaniques sont négligées). Ce modèle est issu de la documentation donnée par le constructeur (*annexe B1*). Le moteur fonctionne au point nominal, en régime thermique établi. On considère que les courants et tensions sont parfaitement sinusoïdaux (fondamental de chaque grandeur).

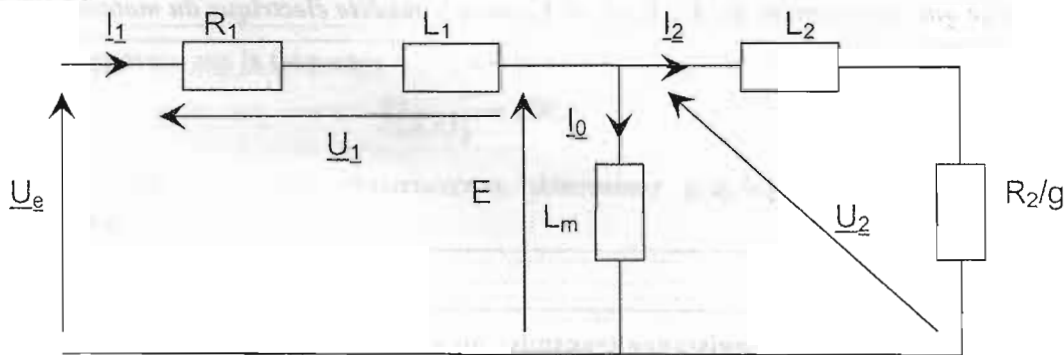


Fig. B1: Schéma équivalent d'une phase moteur.

Rappels :

- Puissance utile nominale : $P_N = 250 \text{ kW}$
- Vitesse nominale de l'arbre : $n_N = 2\,034 \text{ tr.min}^{-1}$
- Nombre de paires pôles du moteur : $p = 2$
- Glissement au point de fonctionnement nominal : $g = 3,15\%$
- Couplage étoile

B1.1. Déterminer la vitesse de synchronisme n_s exprimée en min^{-1} .

B1.2. En déduire la fréquence f_s de la tension d'alimentation du moteur. Comparer la valeur trouvée à celle donnée dans les caractéristiques du moteur.

B1.8. Déterminer l'expression complexe de la tension $\underline{U}_2 / \bar{I}_2$

Pour la suite, on supposera que la fréquence f_s d'alimentation du moteur est de 70 Hz et on prendra :

$$\underline{U}_2 / \underline{I}_2 = 300 e^{j3.2^\circ} \text{ (V)}$$

B1.9. À l'aide des documents constructeurs, déterminer graphiquement la valeur de l'inductance magnétisante L_m .

B1.10. Déterminer l'expression complexe du courant $\underline{I}_0 / \underline{\vec{E}}$.

B1.11. Déterminer l'expression complexe du courant $\underline{I}_2 / \underline{\vec{E}}$.

B1.12. Déterminer l'expression complexe du courant $\underline{I}_1 / \bar{E}$

B1.13. Déterminer l'expression complexe de la tension $\underline{U}_1 / \bar{I}_1$

B1.14. En déduire la valeur efficace de la tension d'alimentation U_e entre phase et neutre du moteur en régime nominal.

B1.15. Déduire des questions précédentes la valeur de la tension efficace U , de la fréquence f_s et du courant efficace I en sortie du variateur.

B2. Comportement et caractéristiques de l'ensemble moto-variateur

L'objectif est de vérifier la stratégie de pilotage du variateur associé aux moteurs asynchrones triphasés.

On dispose, dans le document **ANNEXE B2**, des caractéristiques moteur suivantes :

- couple électromagnétique en fonction de la vitesse : $C_{em} = f(n)$
- fréquence glissée en fonction de la vitesse : $f_g = f(n)$.

La fréquence glissée correspond à la fréquence des courants rotoriques.

B2.1. Déterminer l'expression de la fréquence f (en Hz), image de la vitesse de rotation du moteur, en fonction de n et p .

B2.2. Effectuer les calculs pour chaque vitesse donnée et compléter le document réponse DR.B1

B2.3. Donner l'expression de la fréquence f_s des courants statoriques en fonction des fréquences f et f_g

B2.4. Effectuer les calculs pour chaque vitesse donnée et compléter le document réponse DR.B1

B2.5. En déduire l'expression du glissement g en fonction de f_s et f_g

Effectuer les calculs pour chaque vitesse donnée et compléter le document réponse DR.B1

.....

.....

.....

.....

.....

.....

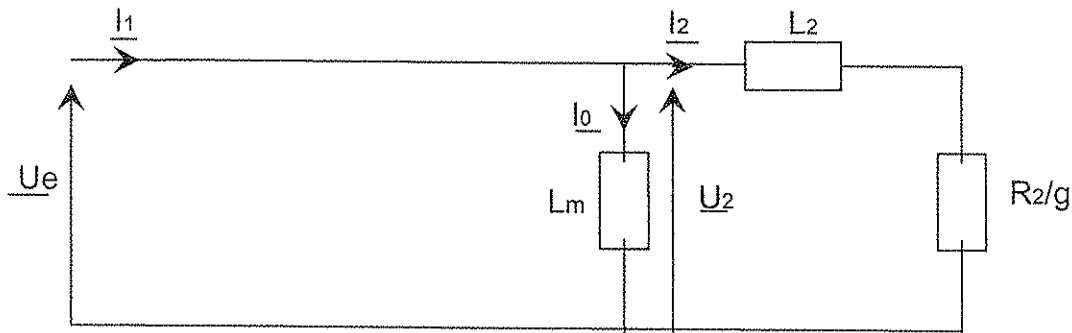
.....

.....

.....

.....

B2.6. On se propose de déterminer l'expression du couple électromagnétique C_{em} du moteur asynchrone en fonction des éléments du modèle électrique simplifié ci-dessous. Ce modèle ne tient plus compte des pertes au stator.



B2.6.1. Exprimer la puissance transmise P_r en fonction du couple électromagnétique C_{em} et de la vitesse de synchronisme Ω_s . Indiquer les unités de ces grandeurs.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

B2.6.2. Déterminer l'expression de la vitesse de synchronisme Ω_s en fonction de la fréquence des courants statoriques f_s et du nombre de paires de pôles p .

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118 119 120 121 122 123 124 125 126 127 128 129 130 131 132 133 134 135 136 137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156 157 158 159 160 161 162 163 164 165 166 167 168 169 170 171 172 173 174 175 176 177 178 179 180 181 182 183 184 185 186 187 188 189 190 191 192 193 194 195 196 197 198 199 200 201 202 203 204 205 206 207 208 209 210 211 212 213 214 215 216 217 218 219 220 221 222 223 224 225 226 227 228 229 230 231 232 233 234 235 236 237 238 239 240 241 242 243 244 245 246 247 248 249 250 251 252 253 254 255 256 257 258 259 260 261 262 263 264 265 266 267 268 269 270 271 272 273 274 275 276 277 278 279 280 281 282 283 284 285 286 287 288 289 290 291 292 293 294 295 296 297 298 299 300 301 302 303 304 305 306 307 308 309 310 311 312 313 314 315 316 317 318 319 320 321 322 323 324 325 326 327 328 329 330 331 332 333 334 335 336 337 338 339 340 341 342 343 344 345 346 347 348 349 350 351 352 353 354 355 356 357 358 359 360 361 362 363 364 365 366 367 368 369 370 371 372 373 374 375 376 377 378 379 380 381 382 383 384 385 386 387 388 389 390 391 392 393 394 395 396 397 398 399 400 401 402 403 404 405 406 407 408 409 410 411 412 413 414 415 416 417 418 419 420 421 422 423 424 425 426 427 428 429 430 431 432 433 434 435 436 437 438 439 440 441 442 443 444 445 446 447 448 449 450 451 452 453 454 455 456 457 458 459 460 461 462 463 464 465 466 467 468 469 470 471 472 473 474 475 476 477 478 479 480 481 482 483 484 485 486 487 488 489 490 491 492 493 494 495 496 497 498 499 500 501 502 503 504 505 506 507 508 509 510 511 512 513 514 515 516 517 518 519 520 521 522 523 524 525 526 527 528 529 530 531 532 533 534 535 536 537 538 539 540 541 542 543 544 545 546 547 548 549 550 551 552 553 554 555 556 557 558 559 560 561 562 563 564 565 566 567 568 569 570 571 572 573 574 575 576 577 578 579 580 581 582 583 584 585 586 587 588 589 590 591 592 593 594 595 596 597 598 599 600 601 602 603 604 605 606 607 608 609 610 611 612 613 614 615 616 617 618 619 620 621 622 623 624 625 626 627 628 629 630 631 632 633 634 635 636 637 638 639 640 641 642 643 644 645 646 647 648 649 650 651 652 653 654 655 656 657 658 659 660 661 662 663 664 665 666 667 668 669 670 671 672 673 674 675 676 677 678 679 680 681 682 683 684 685 686 687 688 689 690 691 692 693 694 695 696 697 698 699 700 701 702 703 704 705 706 707 708 709 710 711 712 713 714 715 716 717 718 719 720 721 722 723 724 725 726 727 728 729 730 731 732 733 734 735 736 737 738 739 740 741 742 743 744 745 746 747 748 749 750 751 752 753 754 755 756 757 758 759 760 761 762 763 764 765 766 767 768 769 770 771 772 773 774 775 776 777 778 779 780 781 782 783 784 785 786 787 788 789 790 791 792 793 794 795 796 797 798 799 800 801 802 803 804 805 806 807 808 809 810 811 812 813 814 815 816 817 818 819 820 821 822 823 824 825 826 827 828 829 830 831 832 833 834 835 836 837 838 839 840 841 842 843 844 845 846 847 848 849 850 851 852 853 854 855 856 857 858 859 860 861 862 863 864 865 866 867 868 869 870 871 872 873 874 875 876 877 878 879 880 881 882 883 884 885 886 887 888 889 890 891 892 893 894 895 896 897 898 899 900 901 902 903 904 905 906 907 908 909 910 911 912 913 914 915 916 917 918 919 920 921 922 923 924 925 926 927 928 929 930 931 932 933 934 935 936 937 938 939 940 941 942 943 944 945 946 947 948 949 950 951 952 953 954 955 956 957 958 959 960 961 962 963 964 965 966 967 968 969 970 971 972 973 974 975 976 977 978 979 980 981 982 983 984 985 986 987 988 989 990 991 992 993 994 995 996 997 998 999 1000 1001 1002 1003 1004 1005 1006 1007 1008 1009 1010 1011 1012 1013 1014 1015 1016 1017 1018 1019 1020 1021 1022 1023 1024 1025 1026 1027 1028 1029 1030 1031 1032 1033 1034 1035 1036 1037 1038 1039 1040 1

1. The first step in the process of the investigation is the identification of the problem. This is done by the investigator who is responsible for the investigation. The investigator must identify the problem and the scope of the investigation. The investigator must also identify the objectives of the investigation and the methods to be used. The investigator must also identify the resources available for the investigation.

2. The second step in the process of the investigation is the collection of data. This is done by the investigator who is responsible for the investigation. The investigator must collect data from the sources identified in the first step. The investigator must also collect data from the sources identified in the first step. The investigator must also collect data from the sources identified in the first step.

3. The third step in the process of the investigation is the analysis of the data. This is done by the investigator who is responsible for the investigation. The investigator must analyze the data collected in the second step. The investigator must also analyze the data collected in the second step. The investigator must also analyze the data collected in the second step.

4. The fourth step in the process of the investigation is the interpretation of the results. This is done by the investigator who is responsible for the investigation. The investigator must interpret the results of the analysis in the third step. The investigator must also interpret the results of the analysis in the third step. The investigator must also interpret the results of the analysis in the third step.

5. The fifth step in the process of the investigation is the reporting of the results. This is done by the investigator who is responsible for the investigation. The investigator must report the results of the investigation to the appropriate authorities. The investigator must also report the results of the investigation to the appropriate authorities. The investigator must also report the results of the investigation to the appropriate authorities.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
84

[illegible]

1. The first step in the process of identifying a problem is to define the problem clearly. This involves identifying the symptoms of the problem and determining the scope of the problem. Once the problem has been defined, the next step is to identify the causes of the problem. This involves identifying the factors that are contributing to the problem and determining the relationships between these factors. Once the causes of the problem have been identified, the next step is to develop a plan of action. This involves identifying the steps that need to be taken to solve the problem and determining the resources that will be needed to implement the plan. Once a plan of action has been developed, the next step is to implement the plan. This involves carrying out the steps that have been identified in the plan and monitoring the progress of the implementation. Finally, the last step in the process is to evaluate the results of the implementation. This involves determining whether the problem has been solved and whether the resources have been used effectively.

B2.9. Tracer la caractéristique $U_e = f(n)$ sur le document réponse DR.B2.

B2.10. Calculer le rapport U_e / f_s et compléter le document réponse DR.B1.

Document réponse DR.B1 et DR.B2. Les zones de réponse sont indiquées par des lignes pointillées.

B2.11. Tracer la caractéristique $U_e / f_s = f(n)$ sur le document réponse DR.B3.

B2.12. Commenter les courbes $U_e = f(n)$ et $U_e / f_s = f(n)$.

Document réponse DR.B3. Les zones de réponse sont indiquées par des lignes pointillées.

B2.13. Démontrer que le couple électromagnétique est maximum si $g = \frac{R_2}{L_2 \times 2\pi \times f_s}$. Donner alors l'expression de $C_{em MAX}$

Document réponse DR.B4. Les zones de réponse sont indiquées par des lignes pointillées.

B2.14. Montrer que le couple électromagnétique maximum C_{emMAX} reste constant si le rapport $\frac{U_e}{f_s} = cste$.

Document réponse DR.B5. Les zones de réponse sont indiquées par des lignes pointillées.

La stratégie de commande dite scalaire ($U / f = \text{cte}$) n'est pas celle retenue dans cette application industrielle. En effet, elle ne permet pas un contrôle suffisamment rigoureux du couple notamment à petite vitesse. Ceci est dû à l'impossibilité de maîtriser indépendamment les courants I_0 et I_2 du modèle électrique simplifié (module et déphasage).

B2.15. Proposer une stratégie de commande industrielle qui permet de remédier à ces inconvénients. Expliquer son principe à l'aide d'une représentation de Fresnel.

PARTIE C : ÉTUDE DU CONVERTISSEUR STATIQUE

L'objectif est de justifier le choix des interrupteurs semi-conducteurs utilisés dans l'onduleur de tension. La structure de l'onduleur de tension est donnée ci-dessous (fig. C1).

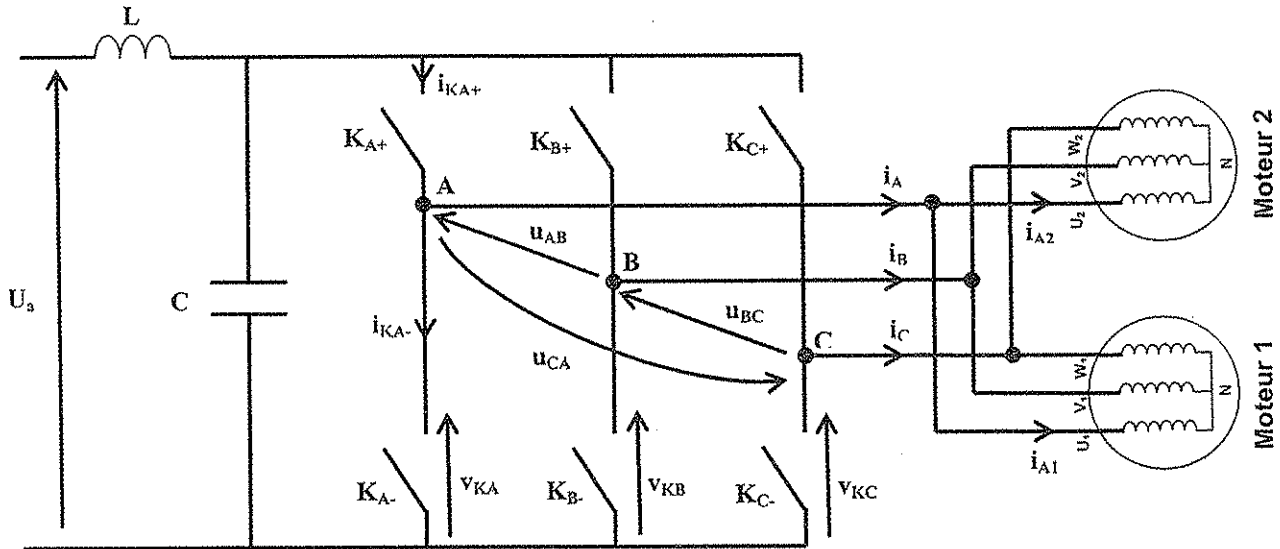


fig. C1

L'onduleur est alimenté, à travers un filtre LC, à partir des rails de guidage de la rame sous une tension continue $U_a = 750 \text{ V}$. Il est constitué de trois bras comportant chacun deux interrupteurs K_{i+} et K_{i-} ($i = A, B, C$). La commande des deux interrupteurs d'un bras d'onduleur est complémentaire : lorsque K_{i+} est fermé, K_{i-} est ouvert et réciproquement.

Plusieurs types de commandes de l'onduleur sont utilisés en fonction de la fréquence souhaitée des tensions statoriques, donc de la vitesse de la rame et des moteurs, (Document ANNEXE C1). L'étude porte sur la commande pleine onde avec un rapport cyclique $\alpha = 0,5$. Nous considérons :

- Les moteurs parfaitement identiques, équilibrés et en charge nominale,
- Les courants dans les moteurs parfaitement sinusoïdaux,
- Les interrupteurs parfaits.

C1. Détermination des formes d'ondes des tensions.

C1.1. Exprimer les tensions u_{AB} , u_{BC} et u_{CA} en fonction de v_{KA} , v_{KB} et v_{KC} .

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

C1.2. Exprimer v_{AN} , v_{BN} et v_{CN} en fonction de u_{AB} , u_{BC} et u_{CA} .

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

[illegible]

C1.5. Montrer que le fondamental de la tension $v_{ANI}(t)$ s'écrit sous la forme suivante :

$$v_{ANI}(t) = \frac{2U_a}{\pi} \sin \omega t$$

C2.1. Exprimer, pour les deux états (bloqué et passant) de l'interrupteur K_A , le courant i_{KA} en fonction de i_A , puis en fonction du courant moteur i_{A1} .

[illegible]

La structure de l'interrupteur K_A est donnée ci-dessous (fig.C2). Il est constitué d'un GTO et d'une diode montés tête-bêche.

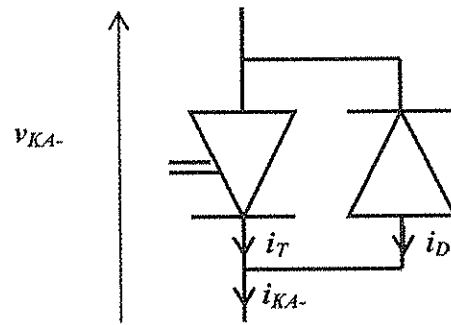


fig. C2

C2.3. Justifier ce choix à partir de la forme d'onde du courant i_{KA} .

1. The first step in the process of the investigation is the identification of the problem. This involves a thorough review of the available information and a clear definition of the issue at hand. The next step is to gather data, which can be done through various methods such as interviews, surveys, and experiments. Once the data is collected, it is analyzed to identify patterns and trends. This analysis leads to the formulation of hypotheses, which are then tested through further data collection and analysis. The final step is to draw conclusions based on the results of the investigation and to recommend appropriate actions to address the problem.

2. The second step in the process is the identification of the causes of the problem. This involves a detailed examination of the data and a search for factors that may have contributed to the issue. Once the causes are identified, the next step is to develop a plan of action to address the problem. This plan should be based on the findings of the investigation and should take into account the resources available and the potential risks involved. The plan is then implemented, and the results are monitored to ensure that the problem is being effectively addressed.

3. The third step in the process is the implementation of the plan of action. This involves putting the plan into practice and ensuring that all necessary resources are allocated. The implementation should be done in a systematic and organized manner, with clear roles and responsibilities assigned to each team member. Once the plan is implemented, the next step is to evaluate the results and determine if the problem has been effectively addressed. If not, the process may need to be repeated or modified to better address the issue.

4. The fourth step in the process is the evaluation of the results. This involves a thorough review of the data and a comparison of the results to the original problem statement. The evaluation should take into account the effectiveness of the plan of action and the impact of the intervention. Once the results are evaluated, the next step is to draw conclusions and make recommendations for future actions. These recommendations should be based on the findings of the investigation and should aim to prevent the problem from recurring.

5. The fifth step in the process is the documentation of the findings and the recommendations. This involves creating a clear and concise report that summarizes the results of the investigation and the actions taken to address the problem. The report should be shared with all relevant stakeholders and should serve as a reference for future investigations. The final step in the process is the follow-up, which involves monitoring the situation to ensure that the problem has been effectively addressed and that the recommendations have been implemented.

La forme du courant i_{A1} dans la phase A du moteur 1 est donnée dans le document réponse **DR.C2**. Son expression est :

$$i_A(t) = 312\sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi)$$

C2.4. Tracer sur le document réponse DR.C2. les formes d'ondes des courants i_{KA} , i_T et i_D .

C3. Détermination des contraintes sur les GTO.

C3.1. Donner l'expression du courant moyen $I_{T_{\text{moy}}}$ dans le GTO en fonction du facteur de puissance $\cos \varphi$ du moteur. Pour quelle valeur de φ ce courant est-il maximal ? Calculer la valeur correspondante $I_{T_{\text{moymax}}}$

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
84

[illegible]

1. The first step in the process of the investigation is the identification of the problem. This involves a thorough review of the available information and a determination of the scope of the problem. The next step is the collection of data, which may involve interviews, observations, and the review of documents. The third step is the analysis of the data, which involves identifying patterns and trends. The fourth step is the interpretation of the results, which involves drawing conclusions from the data. The final step is the reporting of the findings, which involves preparing a written report and presenting the results to the appropriate authorities.

2. The second step in the process of the investigation is the collection of data. This involves gathering information from various sources, including interviews, observations, and the review of documents. The data collected should be organized and analyzed to identify patterns and trends. The next step is the interpretation of the results, which involves drawing conclusions from the data. The final step is the reporting of the findings, which involves preparing a written report and presenting the results to the appropriate authorities.

3. The third step in the process of the investigation is the analysis of the data. This involves identifying patterns and trends in the data. The data should be organized and analyzed to identify patterns and trends. The next step is the interpretation of the results, which involves drawing conclusions from the data. The final step is the reporting of the findings, which involves preparing a written report and presenting the results to the appropriate authorities.

4. The fourth step in the process of the investigation is the interpretation of the results. This involves drawing conclusions from the data. The data should be organized and analyzed to identify patterns and trends. The next step is the reporting of the findings, which involves preparing a written report and presenting the results to the appropriate authorities.

5. The fifth step in the process of the investigation is the reporting of the findings. This involves preparing a written report and presenting the results to the appropriate authorities. The report should be clear, concise, and easy to understand. The results should be presented in a logical and organized manner. The final step is the reporting of the findings, which involves preparing a written report and presenting the results to the appropriate authorities.

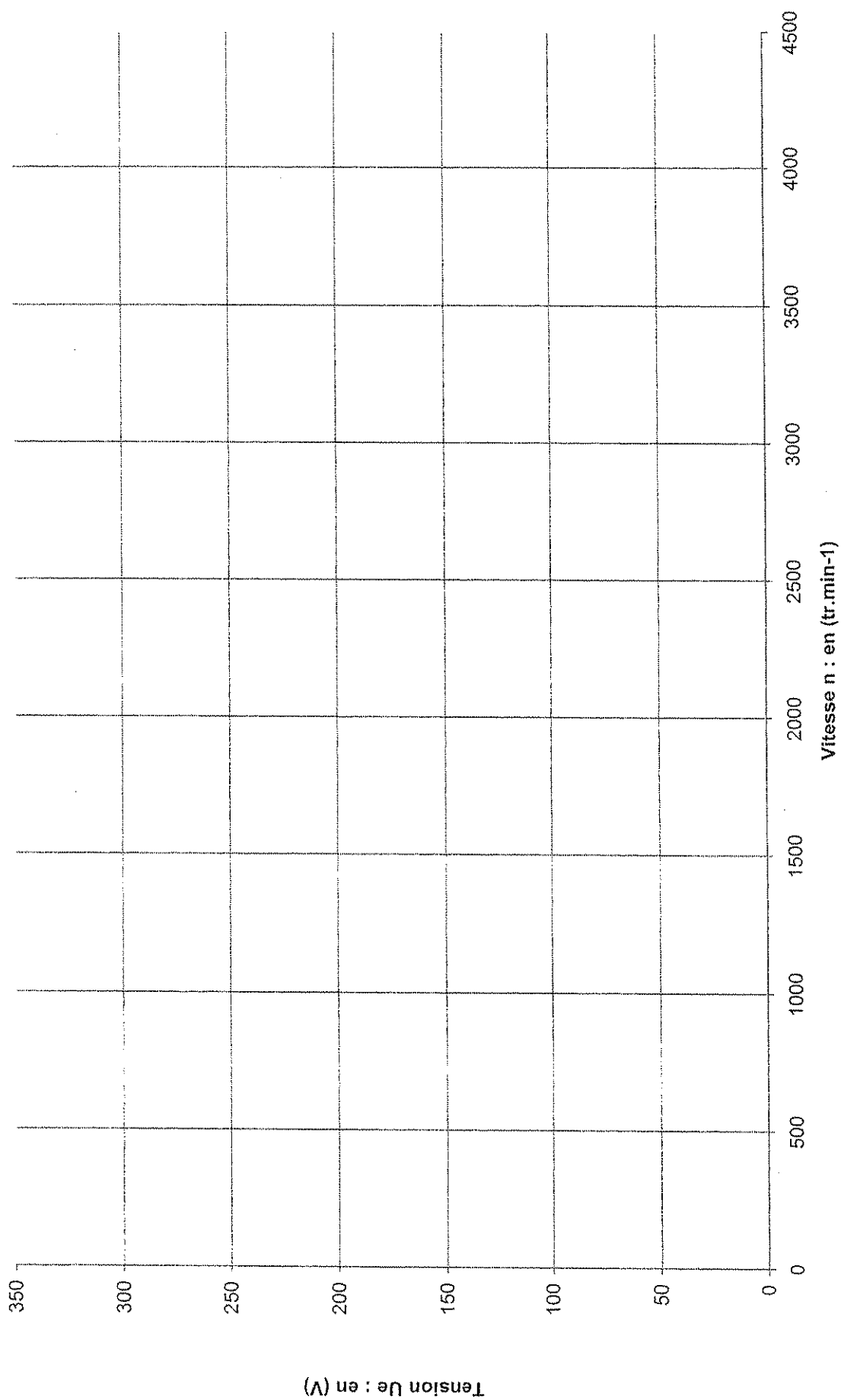
DOCUMENTS

RÉPONSES

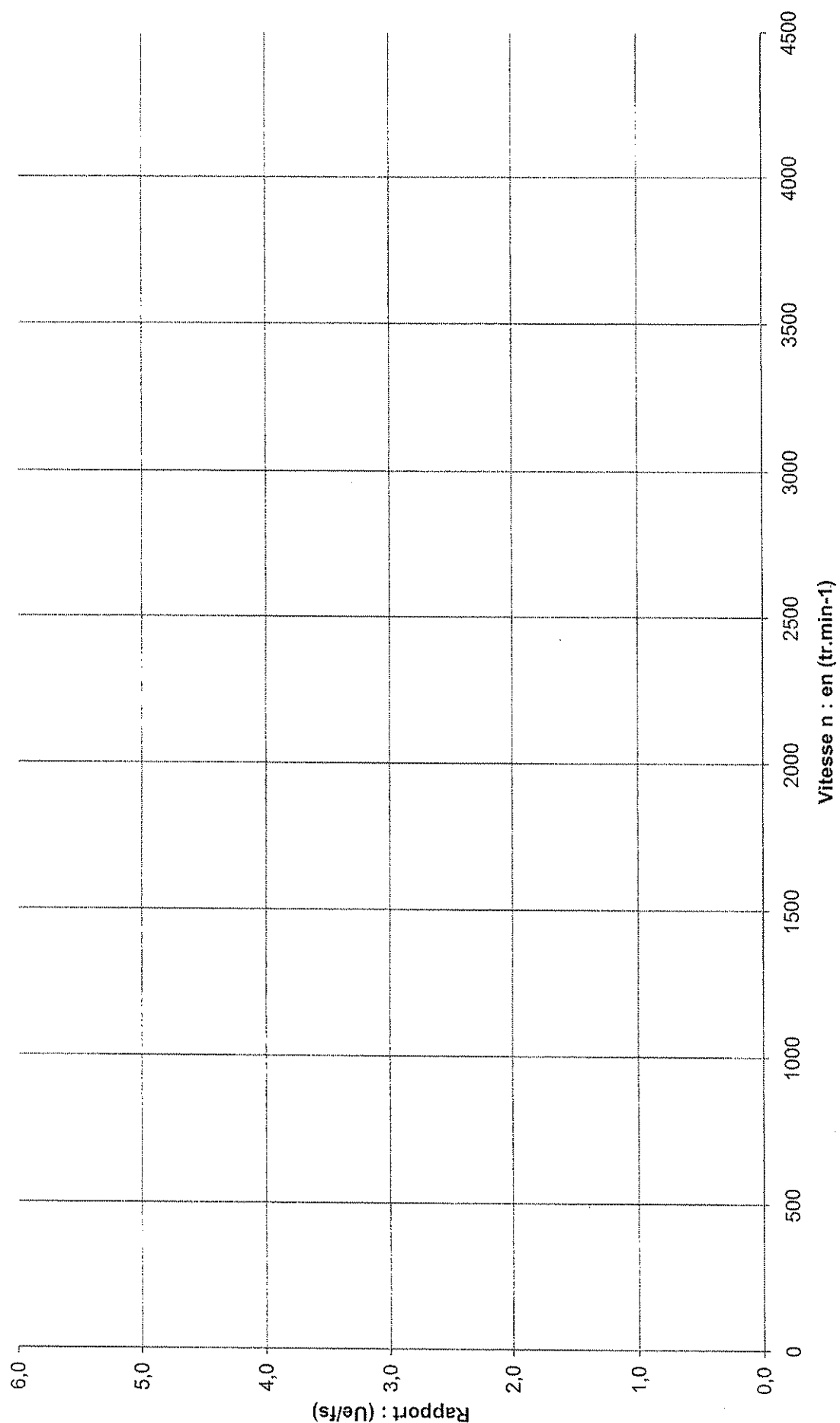
Partie B Étude de la Motorisation

n (tr.min-1)	f (Hz) Question B2.1	fs (Hz) Question B2.2	g % Question B2.5	Ue (V) Question B2.8	Ue/fs (V/Hz) Question B2.10
0					
399,9					
801,3					
1 266,3					
1 678,5					
1 998,6					
2 500,2					
2 985					
3 504,3					
4 134,6					

$U_e = f(n)$

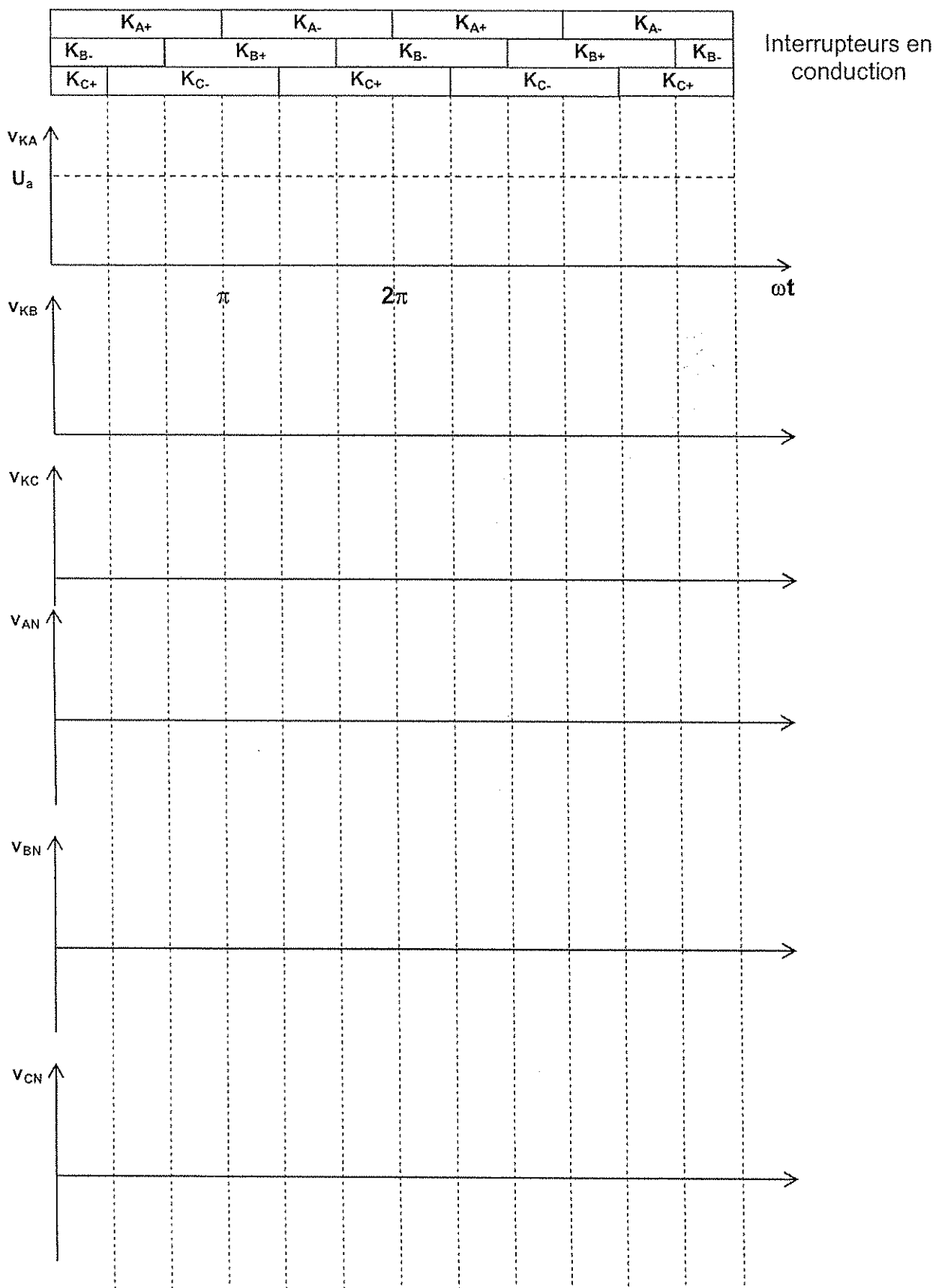


$U_e/f_s = f(n)$

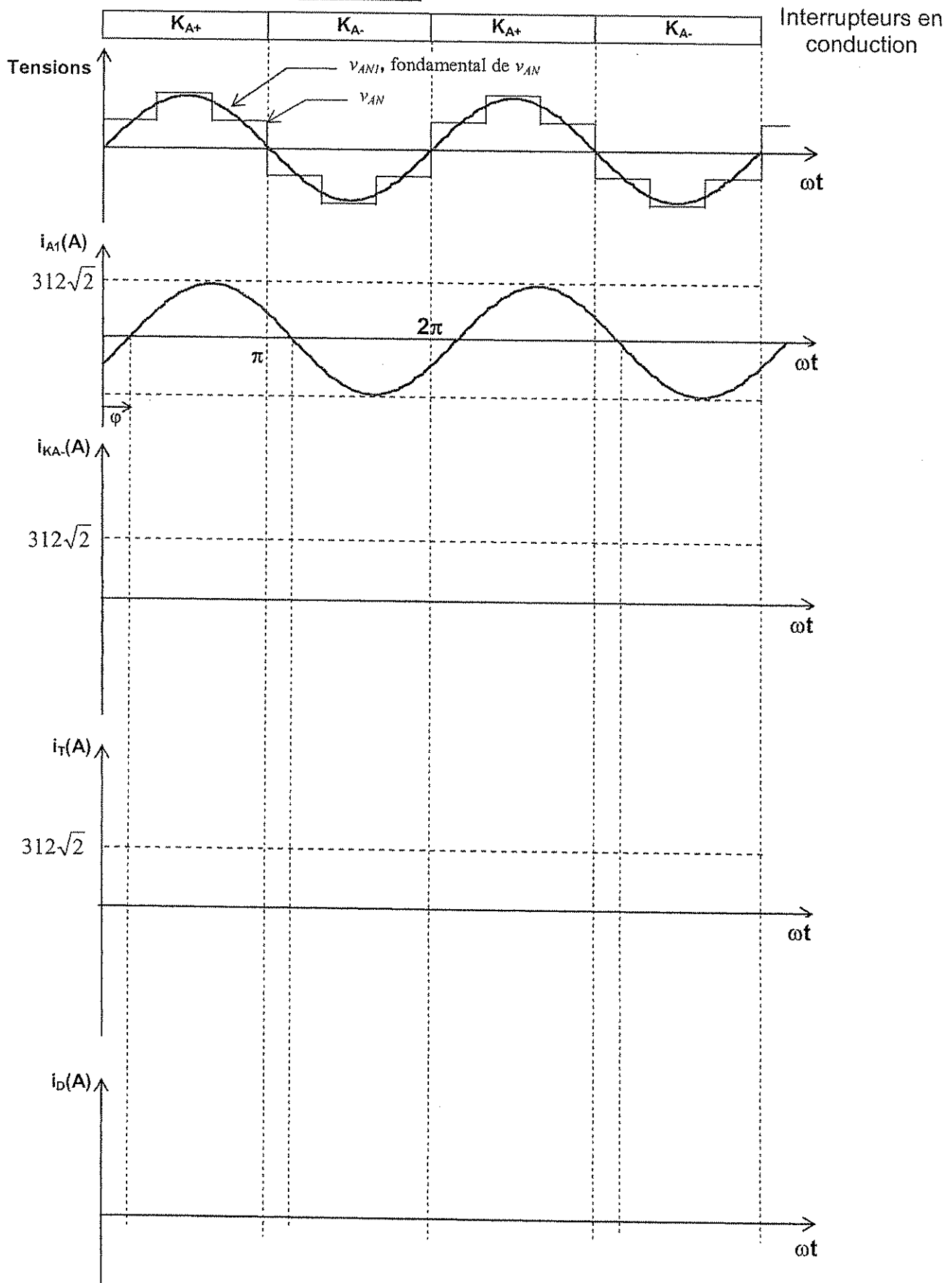


Partie C Étude du convertisseur statique

Document réponse **DR.C1**



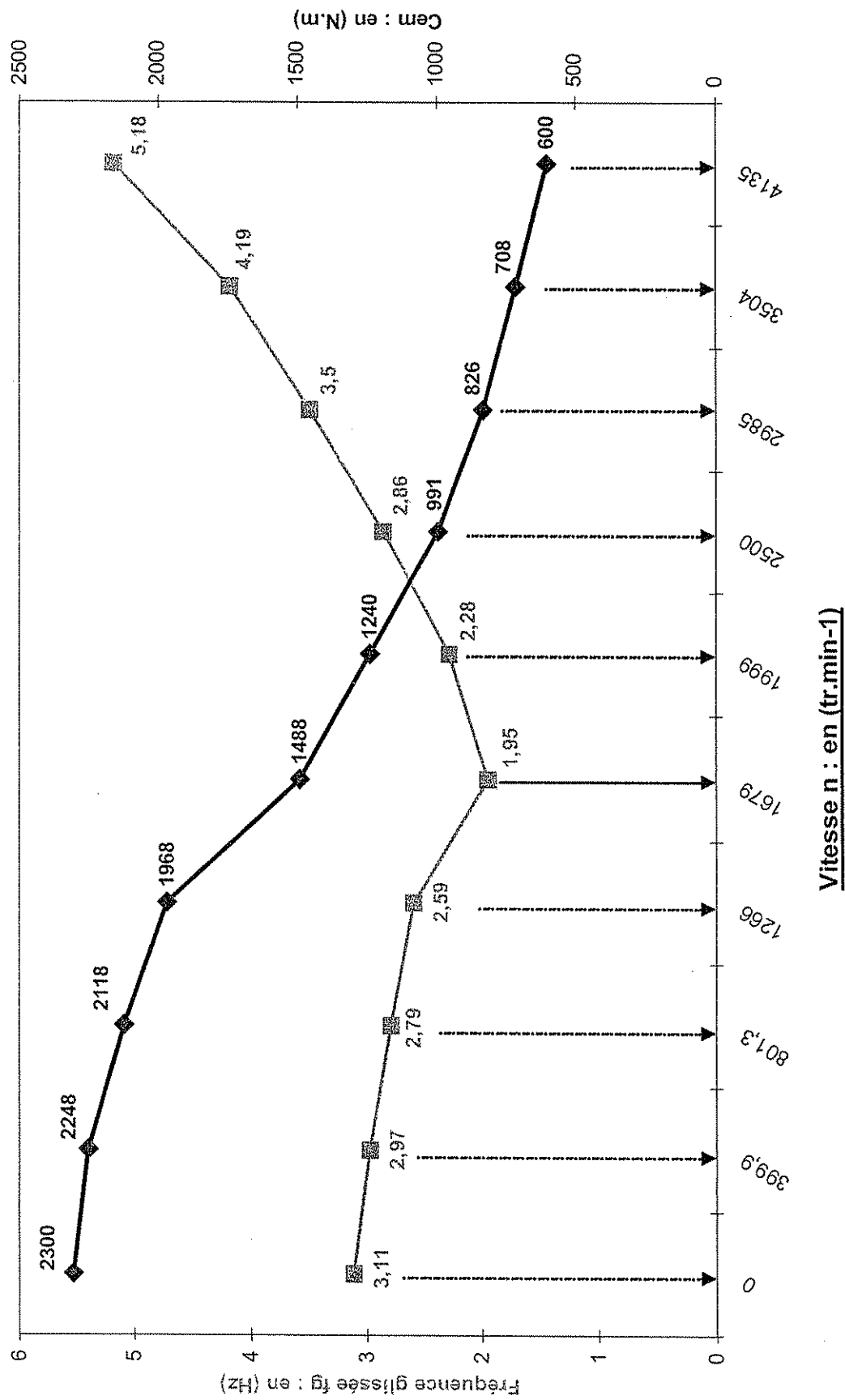
Document réponse **DR.C2**



DOCUMENTS

ANNEXES

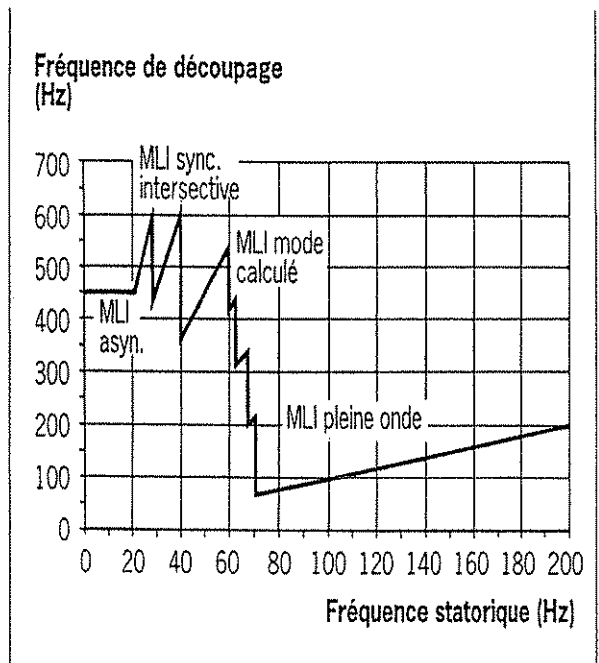
Moteur Asynchrone Type 4 ELA 2848



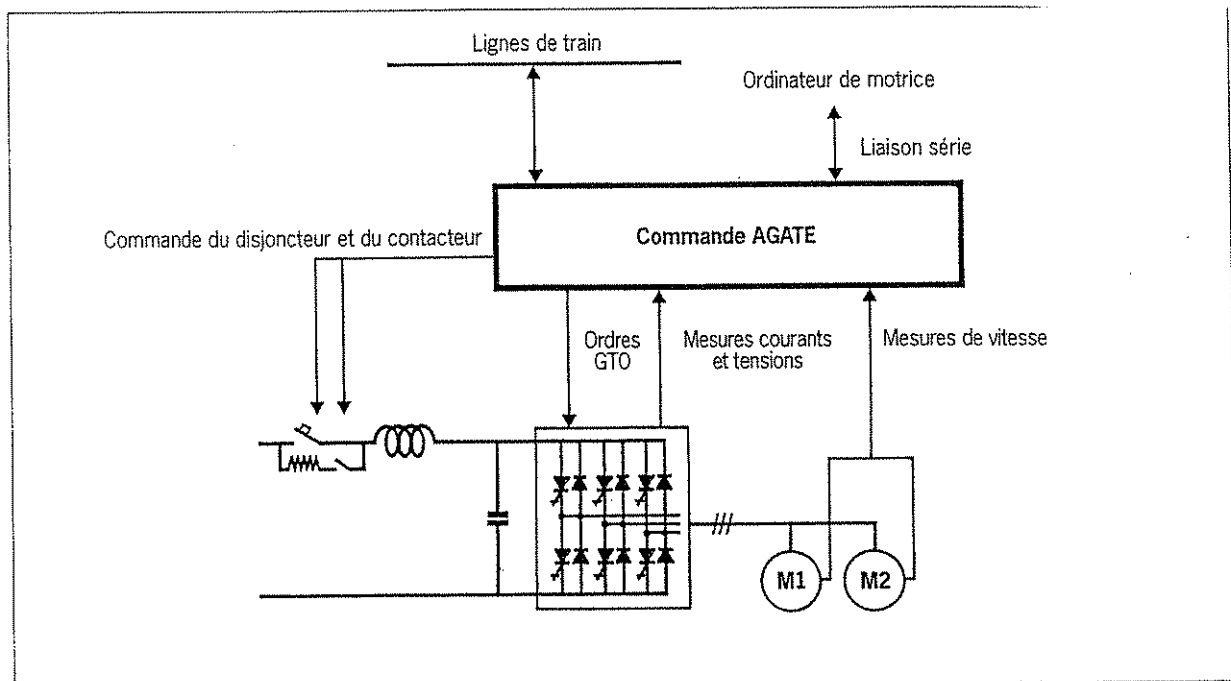
Fonctionnement de la MLI et environnement de la commande AGATE

La MLI permet d'appliquer aux moteurs une tension triphasée réglable en amplitude et en fréquence. Le type de MLI utilisé est lié à la vitesse de rotation des moteurs et à la valeur de la tension à leur fournir. La MLI retenue correspond au meilleur compromis entre les harmoniques du courant moteur et les pertes de l'onduleur, directement liées à la fréquence de découpage. Quatre modes différents sont utilisés pour couvrir toute la plage de fonctionnement :

- **MLI asynchrone intersective** : La fréquence de découpage est fixe, indépendante de la vitesse. L'utilisation d'une fréquence de découpage réduite permet de maîtriser les pertes de l'onduleur. Ce mode de MLI n'est utilisable qu'aux faibles fréquences statoriques.
- **MLI synchrone intersective** : La fréquence de découpage est un multiple de la fréquence statorique. Différents multiples permettent de couvrir une large plage de vitesse tout en conservant une fréquence de découpage correcte pour l'onduleur. Ce mode de MLI n'est utilisable que pour une tension inférieure à 70 % du maximum.
- **MLI synchrone à angles calculés** : La forme d'onde est générée à partir d'angles calculés. Ces angles sont choisis de manière à éliminer le maximum d'harmoniques. L'utilisation de différents nombres d'angles permet de couvrir une large plage de vitesse tout en limitant la fréquence de découpage de l'onduleur.
- **MLI pleine onde** : L'utilisation de la tension continue est maximale et les pertes de l'onduleur sont réduites (rendement supérieur à 99 %).



Fonctionnement de la MLI



Environnement de la commande AGATE.

Extraits de la REVUE TECHNIQUE GEC ALSTHOM N° 8-1992

Extraits des caractéristiques des GTO 2 500V 2200A 4 μ F PP63

V_{DRM}	Maximum repetitive peak-off state voltage (50 Hz half sine wave)	2 500 V
V_{RRM}	Maximum repetitive peak reverse voltage (50 Hz half sine wave)	17 V
V_D (DC)	Permanent DC voltage	1 500 V
I_{TGQM}	Maximum repetitive controlable on-state current	2 200 A
I_{TAVM}	Maximum average on-state current (50 Hz half sine wave)	320 A
I_{TRMS}	RMS on-state current	585 A
I_{TSM}	Maximum surge on-state current, non-repetitive (50 Hz half sine wave)	12 kA
dv/dt	Critical rate of rise of off-state voltage	1 000 V/μs
di/dt	Critical rate of rise of on-state current	298 A/μs
C_S	Snubber capacity	4 μF
T_{(VJ) min}	Minimum virtual junction temperature	- 40 °C
T_{(VJ) max}	Maximum virtual junction temperature	+ 125 °C