CONSTRUCTION

4ÈME Année

Option

MÉCANIQUE AUTOMOBILE

CONFORME AU PROGRAMME NATIONAL

EDITION 2025



TABLE DES MATIÈRES

PRÉLIMINAIRES **1**

1. Préface de l'Inspecteur Général à l'EPST 1
   - 1.1. Un Instrument Didactique au Service de la Compétence 1
   - 1.2. La Modernisation de l'Enseignement Technique 1
   - 1.3. Finalité Pédagogique et Impact National 1
2. Note de l'auteur à l'enseignant et à l'élève 1
   - 2.1. Une approche didactique duale 1
   - 2.2. La posture de l'enseignant : du transmetteur au guide 2
3. Comment utiliser ce manuel pour préparer l'Examen d'État 2
   - 3.1. Consolidation des savoirs théoriques 2
   - 3.2. Articulation entre théorie et pratique 2
   - 3.3. Mise en situation d'examen 3
4. Rappels fondamentaux de mécanique et de thermodynamique 3
   - 4.1. Principes de la mécanique newtonienne appliquée 3
   - 4.2. Lois de la thermodynamique et cycle moteur 3

PARTIE I. LE GROUPE MOTOPROPULSEUR (GMP) : LE CŒUR DE LA MACHINE **4**

a. Le principe fondamental 4

b. Anatomie d'un système complexe 4

c. De la puissance brute à la performance maîtrisée 4

d. L'évolution vers l'électronique 4

CHAPITRE 1. LE MOTEUR À COMBUSTION INTERNE : ANALYSE APPROFONDIE **5**

1.1. Cycles thermodynamiques réels (Otto, Diesel, Atkinson) 5
   - a. La respiration théorique du moteur 5
   - A. Le Cycle de Beau de Rochas (dit "Cycle Otto") 5
   - B. Le Cycle Diesel 6
   - C. Le Cycle Atkinson 6

1.2. Bilan thermique et énergétique du moteur 8
   - a. L'illusion de la puissance brute 8
   - A. La répartition de l'énergie 8

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- B. Le rendement effectif : Le vrai juge de paix.....9

1.3. Matériaux et procédés de fabrication des composants moteur.....11

- Une question de survie mécanique.....11
- A. Les Matériaux Stratégiques du Moteur.....11

FIGURE 1 : RÉF. IMG (9911-3874-5310).....14

Vue éclatée d'un piston et d'une bielle modernes.....14

- B. Les Procédés de Fabrication Clés.....14

FIGURE 2 : RÉF. IMG (4759-7892-8655).....17

Les étapes de fabrication d'un bloc-cylindres en fonte.....17

- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....17

1.4. Phénomènes de combustion anormale (cliquetis, auto-allumage).....19

- a. Le son d'un moteur en bonne santé.....19
- A. Le Cliquetis : La détonation non désirée.....19
- B. L'Auto-allumage : L'étincelle fantôme.....20

CHAPITRE 2. SYSTÈMES DE SURALIMENTATION.....22

2.1. Principe et technologie des turbocompresseurs.....22

- a. L'air, ce carburant invisible.....22
- A. Anatomie et fonctionnement d'un turbocompresseur.....22

FIGURE 3 : RÉF. IMG (0683-2596-6240).....24

Schéma de fonctionnement d'un turbocompresseur avec flux d'air et de gaz.....24

- B. Composants périphériques et régulation.....24

FIGURE 4 : RÉF. IMG (0028-3104-1333).....26

Le turbocompresseur et ses systèmes périphériques essentiels : intercooler et.....26

- b. Le mystère du bus de Boma.....26

2.2. Compresseurs volumétriques (Roots, à vis).....28

- a. La réponse instantanée comme philosophie.....28
- A. Le compresseur type Roots : la force brute.....28
- B. Le compresseur à vis : l'efficacité optimisée.....29

2.3. Systèmes de refroidissement de l'air d'admission (Intercoolers).....31

- a. Le paradoxe de la puissance.....31
- A. Principe physique : la densité de l'air.....31

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- B. Fonction et positionnement de l'échangeur....31
- C. Les deux grandes familles d'intercoolers....32

2.4. Gestion électronique de la pression de suralimentation....34
- a. Du mécanique à l'intelligent....34
- A. Le Cerveau du Système : L'ECU et ses Capteurs....34

FIGURE 5 : RÉF. IMG (1332-5003-0692)....36

Schéma de la boucle de régulation de la pression de suralimentation....36
- B. Le Bras Armé : L'Électrovanne et la Wastegate....36

CHAPITRE 3. LA TRANSMISSION DE PUISSANCE : ORGANES ET CINÉMATIQUE....39

3.1. Conception et calcul des embrayages....39
- a. De la main du charretier à la science de la friction....39
- A. Le Couple Transmissible : La Formule Clé....39
- B. Coefficient de Sécurité et Pression de Surface....39

3.2. Étude des boîtes de vitesses manuelles et synchroniseurs....42
- a. Du couple moteur au mouvement des roues....42
- A. Principe de fonctionnement d'une boîte manuelle....42
- B. Le rôle capital du synchroniseur....42

3.3. Analyse des boîtes de vitesses automatiques et convertisseur de couple....45
- a. Le confort contre l'effort....45
- A. Le convertisseur de couple : le remplaçant hydraulique de l'embrayage....45

FIGURE 6 : RÉF. IMG (4692-7998-9803)....47

Éclaté d'un convertisseur de couple montrant pompe, turbine et stator....47
- B. Le train épicycloïdal : le secret des rapports automatiques....47

3.4. Arbres de transmission et joints homocinétiques....49
- a. L'illusion de la simplicité....49
- A. L'Arbre de Transmission : Le Pont Mécanique....50

FIGURE 7 : RÉF. IMG (7488-6132-7659)....52

Vue éclatée d'un arbre de transmission avec ses joints homocinétiques....52
- B. Le Joint Homocinétique : L'Articulation Intelligente....52

FIGURE 8 : RÉF. IMG (5215-4051-0223)....54

Anatomie d'un joint homocinétique à billes de type Rzeppa....54

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- Scénarios et Exercices.....54

PARTIE II. CHÂSSIS ET LIAISONS AU SOL : LA DYNAMIQUE DU VÉHICULE.....57

Le châssis, squelette du véhicule.....57

Les liaisons au sol, contact vital.....57

La dynamique, une physique en mouvement.....57

L'enjeu, entre sécurité et performance.....57

CHAPITRE 4. LE DIFFÉRENTIEL ET LA TRANSMISSION FINALE.....58

4.1. Cinématique du différentiel simple (ouvert).....58

- a. Le paradoxe du virage.....58
- A. Principe de Fonctionnement.....58
- B. Composition et Cinématique.....58

FIGURE 9 : RÉF. IMG (2116-2195-6060).....60

Vue éclatée d'un différentiel automobile simple ouvert.....60

FIGURE 10 : RÉF. IMG (0691-0744-7536).....62

Schéma cinématique d'un véhicule en virage montrant les trajectoires.....62

- b. Anecdote : La Fausse Panne de Papa Wemba.....62
- c. Scénarios et Exercices.....63

4.2. Technologies des différentiels à glissement limité.....64

- a. Le piège de la roue folle.....64
- A. Le différentiel à disques d'embrayage (Clutch-Type LSD).....64
- B. Le coupleur visqueux (Viscous Coupling LSD).....65

FIGURE 11 : RÉF. IMG (5559-0128-6722).....67

Vue éclatée d'un différentiel à glissement limité de type à disques.....67

- C. Le différentiel de type Torsen (Torque Sensing).....67

4.3. Conception des ponts rigides et des essieux.....70

- a. Le pont arrière, une histoire de robustesse.....70
- A. Anatomie et fonctionnement du pont rigide.....70
- B. Les trois types de montage d'essieu.....70

FIGURE 12 : RÉF. IMG (9478-3726-9563).....73

Vue éclatée comparative des trois types de montage d'essieu.....73

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- L'anecdote du camionneur de l'Équateur....73

4.4. Architecture des systèmes de transmission intégrale (4x4, AWD)....75

- a. L'héritage d'une quête de motricité....75
- A. Systèmes 4x4 Enclenchables (Part-Time 4WD)....75

FIGURE 13 : RÉF. IMG (9945-5593-1550)....77

Schéma de principe d'une transmission 4x4 enclenchable avec boîte de transfert....77

- B. Systèmes Permanents et Automatiques (Full-Time 4WD & AWD)....77

FIGURE 14 : RÉF. IMG (0223-5762-8085)....80

Architecture d'une transmission intégrale permanente avec différentiel ou cou....80

- b. L'anecdote du commerçant prudent....80

CHAPITRE 5. SYSTÈMES DE SUSPENSION....83

5.1. Géométrie des trains roulants (carrossage, pincement, chasse)....83

- a. L'héritage du char égyptien....83
- A. Le Carrossage : L'inclinaison verticale....83
- B. Le Pincement : Le parallélisme horizontal....83

FIGURE 15 : RÉF. IMG (7582-0793-9803)....86

Les trois angles fondamentaux de la géométrie du train roulant....86

- C. L'Angle de Chasse : La stabilité directionnelle....86
- SCÉNARIOS ET EXERCICES....87

5.2. Conception des suspensions indépendantes (MacPherson, double triangulation)....88

- a. Le paradoxe de l'indépendance....88
- A. La Jambe de Force MacPherson : La Simplicité Efficace....88

FIGURE 16 : RÉF. IMG (4426-6943-2246)....91

Comparaison schématique entre une suspension MacPherson et une suspension à d....91

- B. La Double Triangulation : La Précision Sportive....91

5.3. Étude des ressorts et barres stabilisatrices....94

- a. Le confort, une invention tardive....94
- A. Le ressort : le pilier porteur de la suspension....94

FIGURE 17 : RÉF. IMG (4249-1477-7427)....96

Principaux types de ressorts utilisés dans une suspension automobile....96

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- B. La barre stabilisatrice : le garant de l'équilibre en virage.....96

FIGURE 18 : RÉF. IMG (5252-2348-0076).....99

Action de la barre stabilisatrice pour contrer le roulis du véhicule.....99

- L'anecdote du garage de Goma.....99

5.4. Théorie et technologie des amortisseurs.....101

- a. L'illusion du confort.....101
- A. Le principe de l'amortissement hydraulique.....101

FIGURE 19 : RÉF. IMG (6719-5928-4989).....104

Schéma en coupe d'un amortisseur hydraulique télescopique avec ses clapets.....104

- B. Technologies principales : Monotube et Bitube.....104

FIGURE 20 : RÉF. IMG (0899-3313-2205).....107

Comparaison structurelle entre un amortisseur monotube et un amortisseur bitube.....107

- b. La panne de Tata Mbuyi sur la Nationale 1.....107

CHAPITRE 6. SYSTÈMES DE DIRECTION ET DE FREINAGE.....110

6.1. Cinématique de la direction et épure de Jeantaud.....110

- a. Le problème du ripage des roues.....110
- A. Le Principe Fondamental du Roulage sans Glissement.....110
- B. La Condition Géométrique de Jeantaud.....110

6.2. Technologie des directions assistées (hydraulique, électrique).....113

- a. Du bras à l'assistance : une histoire de force.....113
- A. La direction assistée hydraulique (DAH).....113

FIGURE 21 : RÉF. IMG (2286-6675-5668).....115

Schéma comparatif des directions assistées hydraulique et électrique.....115

- B. La direction assistée électrique (DAE).....115

6.3. Calcul et dimensionnement des systèmes de freinage.....117

- a. L'énergie cinétique, cet ennemi invisible.....117
- A. La physique du freinage : Énergie et Puissance.....118

FIGURE 22 : RÉF. IMG (5326-5977-0468).....120

Schéma des forces agissant sur une roue lors du freinage.....120

- B. Dimensionnement : Le couple de freinage.....120

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

FIGURE 23 : RÉF. IMG (1909-8450-1371)..... 123

Vue éclatée d'un étrier et d'un disque de frein..... 123

- Anecdote : Le Fuso surchargé de Mbandaka..... 123

6.4. Systèmes d'assistance au freinage (ABS, EBD, BAS)..... 125

- a. L'illusion du blocage..... 125
- A. Le Système Anti-blocage (ABS)..... 125
- B. La Répartition Électronique de Freinage (EBD)..... 125

FIGURE 24 : RÉF. IMG (5068-4487-3436)..... 127

Architecture des assistances au freinage : capteurs, calculateur et actionneu..... 127

- C. L'Assistance au Freinage d'Urgence (BAS/AFU)..... 127

PARTIE III. STRUCTURE ET SYSTÈMES ÉLECTRONIQUES : L'INTELLIGENCE EMBARQUÉE 130

a. De la dynamo à l'ordinateur de bord..... 130

b. L'Unité de Contrôle Électronique (ECU) : le cerveau du véhicule..... 130

c. Le réseau multiplexé (CAN Bus) : le système nerveux..... 130

d. Capteurs et Actuateurs : les sens et les muscles du système..... 130

CHAPITRE 7. LA STRUCTURE ET LA CARROSSERIE..... 131

7.1. Conception de la structure monocoque et sécurité passive..... 131

- a. L'œuf et la voiture..... 131
- A. La structure monocoque : l'exosquelette de l'automobile..... 131
- B. La sécurité passive : l'art de survivre à l'impact..... 131

7.2. Aérodynamique automobile (Cx, Cz, traînée et portance)..... 133

- a. L'air, cet obstacle invisible..... 133
- A. Les Forces Aérodynamiques Fondamentales..... 134
- B. Les Coefficients de Forme : Cx et Cz..... 134

FIGURE 25 : RÉF. IMG (8575-3395-0958)..... 136

Visualisation des forces aérodynamiques sur une berline moderne en mouvement..... 136

- C. La Formule de la Traînée Aérodynamique..... 136

7.3. Zones de déformation programmée, airbags et prétensionneurs..... 138

- a. L'illusion de la solidité..... 138
- A. La déformation programmée : l'art de plier sans rompre..... 139

FIGURE 26 : RÉF. IMG (9398-6306-9589)..... 141

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

Structure d'une caisse automobile avec zones de déformation programmée.....141
- B. Airbags et prétensionneurs : le duo de choc.....141

7.4. Isolation acoustique et vibratoire (Analyse NVH).....144
- a. L'oreille du mécanicien.....144
- A. Définition du NVH (Noise, Vibration, and Harshness).....145
- B. Les trois voies de transmission.....145
- C. Solutions d'isolation et d'amortissement.....146

CHAPITRE 8. L'ARCHITECTURE ÉLECTRIQUE ET ÉLECTRONIQUE.....149

8.1. Le multiplexage et les réseaux CAN, LIN, FlexRay.....149
- a. Le passage de l'analogique au numérique.....149
- A. Le principe du multiplexage : Moins de fils, plus d'intelligence.....149

FIGURE 27 : RÉF. IMG (2080-2017-6477).....151

Schéma comparatif : Câblage traditionnel vs. câblage multiplexé en réseau CAN.....151
- B. Les protocoles de communication : Le langage des calculateurs.....151

FIGURE 28 : RÉF. IMG (8765-9192-5375).....153

Hiérarchie des réseaux embarqués : CAN, LIN et FlexRay en action.....153
- L'anecdote du mécanicien de Mbandaka.....153

8.2. Rôle et fonctionnement des calculateurs (ECU).....155
- a. Le cerveau caché du véhicule.....155
- A. Le rôle central de l'ECU : Un centre de décision.....155
- B. Le cycle de fonctionnement : Entrées, Traitement, Sorties.....156

8.3. Capteurs et actionneurs : principes et technologies.....158
- a. Le système nerveux de l'automobile.....158
- A. Les capteurs : les cinq sens du véhicule.....158

FIGURE 29 : RÉF. IMG (2512-6649-6799).....160

Schéma de principe d'un capteur de température moteur (sonde CTS).....160
- B. Les actionneurs : les muscles de la mécanique.....160

FIGURE 30 : RÉF. IMG (6702-5840-1004).....162

Fonctionnement d'un injecteur de carburant, un actionneur électromécanique ty.....162
- Une panne étrange sur la route de Boma.....162

8.4. Gestion de l'énergie : alternateur, batterie, démarreur.....164

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- a. Le trio inséparable de la puissance.....164
- A. La Batterie : Le Réservoir d'Énergie Chimique.....164

FIGURE 31 : RÉF. IMG (8016-1122-4500).....166

Schéma du circuit de charge et de démarrage du moteur thermique.....166
- B. L'Alternateur : L'Usine Électrique Embarquée.....166
- C. Le Démarreur : Le Coup de Force Initial.....167

FIGURE 32 : RÉF. IMG (0175-7855-1583).....169

Vue éclatée d'un alternateur automobile moderne et ses composants internes.....169
- Le silence angoissant de la panne à Bukavu.....169

CHAPITRE 9. CONFORT ET ASSISTANCE À LA CONDUITE (ADAS).....172

9.1. Principe de la climatisation automobile (cycle frigorifique).....172
- a. L'ancêtre de la fraîcheur motorisée.....172
- A. Le cycle frigorifique : un transfert de chaleur organisé.....172
- B. Les quatre phases du cycle.....172

FIGURE 33 : RÉF. IMG (2528-5645-8724).....175

Schéma du cycle frigorifique automobile et ses quatre composants clés.....175
- Une histoire de diagnostic à Kananga.....175

9.2. Systèmes d'infodivertissement et interfaces homme-machine (IHM).....177
- a. De l'encre à l'écran tactile.....177
- A. Rôles et architecture du système.....178
- B. Les composants physiques de l'interface.....178

FIGURE 34 : RÉF. IMG (8114-4588-0575).....180

Tableau de bord moderne avec écran tactile central et affichages numériques.....180
- C. Les canaux d'interaction.....180

9.3. Radars, caméras et capteurs pour les ADAS.....183
- a. L'œil et l'oreille de la machine.....183
- A. Le Radar : Le Gardien Longue Distance.....183
- B. La Caméra : L'Œil Analytique.....183

FIGURE 35 : RÉF. IMG (7333-7228-1062).....185

Positionnement stratégique des capteurs ADAS sur un véhicule moderne.....185
- C. Les Capteurs à Ultrasons : Les Spécialistes de la Proximité.....185

9.4. Régulateur adaptatif et freinage d'urgence autonome....187
- a. Les yeux qui ne se fatiguent jamais....187
- A. Le Régulateur de Vitesse Adaptatif (ACC) : Le confort intelligent....188
- B. Le Freinage d'Urgence Autonome (AEB) : La réaction salvatrice....188

PARTIE IV. PERFORMANCE, ENVIRONNEMENT ET NOUVELLES TECHNOLOGIES....191

a. La quête de la puissance maîtrisée....191

b. L'impératif écologique et la contrainte des émissions....191

c. L'arsenal technologique : Électronique, hybridation et matériaux....191

d. Le technicien automobile de demain : une compétence nouvelle....191

CHAPITRE 10. OPTIMISATION DES PERFORMANCES ET TENUE DE ROUTE....192

10.1. Centre de gravité, transferts de masse et roulis....192
- a. Le point d'équilibre invisible....192
- A. Le Centre de Gravité (CG)....192
- B. Les Transferts de Masse....192

FIGURE 36 : RÉF. IMG (6611-1961-3940)....194

Visualisation des transferts de masse sur un véhicule en virage....194
- C. Le Roulis et son Contrôle....194

10.2. Dynamique du pneumatique : adhérence et dérive....196
- a. La paume de la main et la tonne d'acier....196
- A. Le Cercle d'Adhérence de Kamm....197

FIGURE 37 : RÉF. IMG (2944-8798-9226)....199

Le cercle d'adhérence de Kamm et la limite des forces du pneu....199
- B. L'Angle de Dérive et la Rigidité de Dérive....199

FIGURE 38 : RÉF. IMG (9888-9661-6701)....202

Visualisation de l'angle de dérive d'un pneumatique en virage....202
- Scénarios et Exercices....202

10.3. Contrôle de stabilité (ESP) et antipatinage (ASR)....204
- a. L'ange gardien de la route glissante....204
- A. L'antipatinage (ASR) : Le dompteur d'accélération....204

FIGURE 39 : RÉF. IMG (0762-0328-3162)....207

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

Schéma fonctionnel du système d'antipatinage ASR sur un essieu moteur....207
- B. Le contrôle de stabilité (ESP) : Le gardien de la trajectoire....207

10.4. Équations fondamentales du mouvement du véhicule....210
- a. L'essence du mouvement....210
- A. La grande équation du déplacement....210
- B. Anatomie des forces résistantes....211

CHAPITRE 11. DÉPOLLUTION ET IMPACT ENVIRONNEMENTAL....215

11.1. Formation des polluants (NOx, CO, HC, Particules)....215
- a. La chimie d'un moteur n'est jamais parfaite....215
- A. Le Monoxyde de Carbone (CO) et les Hydrocarbures Imbrûlés (HC)....215
- B. Les Oxydes d'Azote (NOx)....215
- C. Les Particules (Suies)....216

FIGURE 40 : RÉF. IMG (9792-3430-8078)....218

Schéma simplifié de la formation des polluants dans un cylindre moteur....218
- d. Anecdote du mécanicien de Mbandaka....218

11.2. Le pot catalytique à trois voies et la sonde lambda....220
- a. L'erreur du "vidange" de pot....220
- A. Le catalyseur : un chimiste dans l'échappement....220
- B. La sonde lambda : l'espion du moteur....221

FIGURE 41 : RÉF. IMG (4298-1825-9050)....223

Schéma fonctionnel du système de dépollution avec sonde lambda et catalyseur....223
- L'anecdote du garagiste de Mbuji-Mayi....223

11.3. Systèmes de recirculation des gaz d'échappement (EGR)....225
- a. Le paradoxe du gaz recyclé....225
- A. Principe de fonctionnement et composants....225

FIGURE 42 : RÉF. IMG (8290-9122-4617)....228

Schéma simplifié d'un circuit EGR avec ses composants principaux....228
- B. Conditions d'activation et pannes courantes....228

11.4. Filtre à particules (FAP) et réduction catalytique sélective (SCR)....230
- a. L'ennemi invisible du moteur diesel....230
- A. Le Filtre à Particules (FAP) : le piège à suies....231
- B. La Réduction Catalytique Sélective (SCR) : le destructeur de NOx....231

CHAPITRE 12. MOTORISATIONS ALTERNATIVES ET VÉHICULES DU FUTUR.....235

12.1. Architecture des véhicules hybrides (série, parallèle, PHEV).....235

- a. Une alliance de deux mondes.....235
- A. L'architecture Série : La centrale électrique embarquée.....235
- B. L'architecture Parallèle : La collaboration directe.....235

FIGURE 43 : RÉF. IMG (4476-9576-7439).....237

Schéma comparatif des architectures hybrides série et parallèle.....237

- C. L'hybride rechargeable (PHEV) : L'autonomie électrique étendue.....237

12.2. Principe du véhicule électrique à batterie (BEV).....240

- a. Le silence qui remplace le bruit.....240
- A. L'architecture d'un BEV : Une simplicité redoutable.....240

FIGURE 44 : RÉF. IMG (9330-4970-9873).....242

Schéma de principe d'un véhicule électrique et ses flux d'énergie.....242

- B. Le cycle de fonctionnement : Deux phases opposées.....242

12.3. Technologie des batteries et gestion thermique (BMS).....244

- a. Le paradoxe de l'énergie embarquée.....244
- A. Le cœur électrique : la batterie Lithium-ion.....244

FIGURE 45 : RÉF. IMG (9262-7290-3280).....246

Structure interne d'une cellule de batterie Lithium-ion.....246

- B. Le cerveau de la batterie : le BMS (Battery Management System).....246

12.4. Introduction aux véhicules à pile à combustible (Hydrogène).....248

- a. L'eau comme seul "pot d'échappement".....248
- A. Le principe de la pile à combustible (PAC).....249
- B. Architecture d'un véhicule à hydrogène (FCEV).....249

FIGURE 46 : RÉF. IMG (9438-4206-2599).....251

Schéma de fonctionnement d'un véhicule à pile à combustible hydrogène.....251

- L'anecdote du technicien de Goma.....251

Annexe A : Lexique technique trilingue (Français - Lingala - Swahili).....253

- A. Le Moteur et ses Composants (Motɛ́rɛ na biténi na yangó / Injini na Sehemu.....253
- B. Le Système de Transmission (Sistɛ́mɛ ya Transmisyɔ́ / Mfumo wa Transmisheni)....254
- C. Le Châssis, la Suspension et la Direction (Shasí, Suspansyɔ́ na Direksyɔ́ 255
- D. Le Système de Freinage (Sistɛ́mɛ ya Frɛ́ / Mfumo wa Breki).....255

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- E. Le Système Électrique et Électronique (Sistémɛ ya kura na Elektroniki / M.....255

Annexe B : Tableaux de conversion des unités.....256

- A. Principes et Unités Fondamentales.....256
- B. Pression (Pneumatiques, Systèmes hydrauliques, Suralimentation).....257
- C. Couple de Serrage (Assemblages mécaniques).....257
- D. Puissance Moteur.....258
- E. Volume et Cylindrée.....259

Annexe C : Principaux symboles normalisés en schématique automobile.....259

- A. Principes Fondamentaux de Lecture.....259
- B. Alimentation et Masses.....260
- C. Dispositifs de Commande et de Connexion.....261
- D. Dispositifs de Protection.....261
- E. Récepteurs, Actionneurs et Capteurs.....262

Annexe D : Bibliographie sélective et ressources en ligne.....262

- A. Ouvrages de référence fondamentaux.....262
- B. Revues techniques et publications spécialisées.....264
- C. Bases de données et portails en ligne.....264
- D. Normes et standards industriels.....265

PRÉLIMINAIRES

1. Préface de l'Inspecteur Général à l'EPST

1.1. Un Instrument Didactique au Service de la Compétence

La formation des techniciens en mécanique automobile requiert une approche pédagogique précise. Cet ouvrage offre aux formateurs une structure rigoureuse, articulant la connaissance théorique fondamentale avec sa mise en application directe. Sa démarche privilégie le raisonnement technique et la résolution de problèmes concrets. Il outille l'enseignant pour construire des situations d'apprentissage significatives, où l'élève est acteur de sa propre qualification professionnelle.

1.2. La Modernisation de l'Enseignement Technique

Face aux évolutions technologiques rapides du secteur automobile, une mise à niveau constante des contenus est impérative. Ce manuel aligne le curriculum national sur les standards actuels de la construction automobile. Il fournit un référentiel unifié. Il garantit ainsi une qualité d'enseignement homogène sur l'ensemble du territoire, de Mbandaka à Lubumbashi. La maîtrise de ses contenus assure une base solide et pertinente pour l'épreuve de l'Examen d'État.

1.3. Finalité Pédagogique et Impact National

L'objectif terminal de cet enseignement est la formation de professionnels autonomes et qualifiés. L'enseignant utilise ces supports pour transformer l'apprenant en un technicien capable d'analyser, de diagnostiquer et d'intervenir sur des systèmes complexes. La maîtrise de ces compétences prépare la jeunesse à intégrer efficacement le tissu économique national, contribuant au développement des services et de l'industrie dans toutes nos provinces.

---

2. Note de l'auteur à l'enseignant et à l'élève

2.1. Une approche didactique duale

La structure de chaque chapitre suit un principe didactique précis. Elle articule la rigueur théorique à la compétence pratique immédiate. Le savoir technique

est d'abord présenté sous sa forme axiomatique et fondamentale. Puis, sa transposition concrète intervient systématiquement via des scénarios et des exercices d'application. Cette progression du général au particulier vise à solidifier la maîtrise conceptuelle avant d'aborder sa mise en œuvre technique. L'objectif est la formation d'un technicien capable de raisonner avant d'agir.

2.2. La posture de l'enseignant : du transmetteur au guide

La section "Scénarios et Exercices" offre à l'enseignant un outil de médiation pédagogique. Elle permet de transformer le concept abstrait en un problème tangible, contextualisé. Cette démarche déplace le rôle de l'enseignant. Il évolue d'un simple transmetteur de connaissances vers un guide méthodologique. Son intervention devient cruciale pour connecter la théorie à la réalité de l'atelier, que ce soit pour une réparation à Matadi ou un diagnostic à Kisangani. Il accompagne l'élève dans la construction d'un raisonnement technique autonome et adaptable.

---

3. Comment utiliser ce manuel pour préparer l'Examen d'État

3.1. Consolidation des savoirs théoriques

L'architecture de chaque leçon favorise une maîtrise séquentielle des compétences. Les concepts théoriques fondamentaux sont traités avec une rigueur terminologique absolue. Cette approche garantit l'acquisition des prérequis essentiels pour les items complexes de l'Examen d'État. L'enseignant utilise la clarté des démonstrations pour valider la compréhension de l'élève avant de passer aux applications pratiques. Chaque point de matière est une réponse potentielle à une question de l'épreuve nationale.

3.2. Articulation entre théorie et pratique

Systématiquement, la fin de chaque chapitre propose une transition didactique vers la résolution de problèmes. Les sections "Scénarios et Exercices" ancrent les notions abstraites dans des réalités techniques plausibles, du dépannage d'un camion à Gemena à la maintenance d'un bus à Matadi. L'enseignant guide l'élève dans la déconstruction des énoncés. Il l'amène à identifier les variables pertinentes et à mobiliser le théorème ou la procédure adéquate.

3.3. Mise en situation d'examen

La complexité progressive des exercices culmine avec des problèmes de synthèse. Ces derniers simulent fidèlement le format et le niveau d'exigence de l'épreuve de Construction Automobile. Leur résolution exige une démarche structurée, telle que détaillée dans les corrigés pas-à-pas. L'enseignant utilise ces cas comme des évaluations formatives ou comme base pour des épreuves blanches. Il prépare ainsi efficacement au TENASOSP et à l'Examen d'État.

---

4. Rappels fondamentaux de mécanique et de thermodynamique

4.1. Principes de la mécanique newtonienne appliquée

Une compréhension approfondie des principes de la mécanique classique est un prérequis à l'étude des systèmes automobiles. La dynamique du véhicule, incluant l'accélération, le freinage et la tenue de route, obéit directement aux lois fondamentales du mouvement de Newton. L'analyse des forces, des moments de force (couples) et des énergies cinétique et potentielle est indispensable pour le dimensionnement des composants du châssis, de la suspension et de la transmission. Ces rappels consolident le socle analytique nécessaire au calcul des structures et à la prédiction du comportement dynamique global.

4.2. Lois de la thermodynamique et cycle moteur

Le moteur à combustion interne est un système thermodynamique par essence. Sa performance est directement régie par les deux premières lois de la thermodynamique. La première loi, celle de la conservation de l'énergie, quantifie la conversion de l'énergie thermique issue de la combustion en travail mécanique utile. La seconde loi fixe les limites théoriques du rendement, introduisant la notion irréductible d'entropie et de pertes thermiques. La modélisation des cycles thermodynamiques réels (Beau de Rochas/Otto, Diesel) permet de prédire la pression, la température et le volume au sein du cylindre à chaque phase. La maîtrise de ces concepts est fondamentale pour optimiser le rendement du moteur et gérer sa dissipation thermique.

Partie I. Le Groupe Motopropulseur (GMP) : Le Cœur de la Machine

a. Le principe fondamental

Le groupe motopropulseur, ou GMP, regroupe tous les organes générant la puissance et la transmettant aux roues. Il est le véritable système nerveux et musculaire de l'automobile. Sans lui, une Toyota Hilux, même flambant neuve sortie du port de Boma, reste une simple sculpture métallique inerte. Son rôle premier est de convertir une énergie, souvent chimique, en un travail mécanique : la rotation des roues.

b. Anatomie d'un système complexe

Plusieurs organes majeurs composent cette chaîne cinématique. Au départ se trouve le moteur, la source de toute puissance. Vient ensuite le système d'embrayage, qui connecte ou déconnecte le moteur de la boîte de vitesses. Cette dernière adapte le couple et la vitesse. Enfin, la transmission (arbres, pont, différentiel) achemine la force jusqu'aux roues motrices pour propulser le véhicule.

c. De la puissance brute à la performance maîtrisée

Un moteur puissant ne garantit rien seul. La qualité du GMP détermine le comportement réel du véhicule sur la route. Pensez à un camion Man chargé de minerais luttant pour gravir une pente près de Likasi. C'est l'étagement de sa boîte de vitesses et l'efficacité de sa transmission qui lui permettent de vaincre la côte sans caler. Le GMP transforme la force brute en performance utile et contrôlable.

d. L'évolution vers l'électronique

Autrefois, la gestion du GMP était purement mécanique et hydraulique. Les réglages dépendaient du savoir-faire du mécanicien de Bukavu ou de Mbandaka. Aujourd'hui, l'électronique est reine. Des calculateurs (ECU) analysent des centaines de paramètres en temps réel via des capteurs. Ils pilotent l'injection, l'allumage et même les changements de rapports pour optimiser le rendement, la consommation et les émissions polluantes.

Chapitre 1. Le Moteur à Combustion Interne : Analyse Approfondie

1.1. Cycles thermodynamiques réels (Otto, Diesel, Atkinson)

a. La respiration théorique du moteur

Pendant que Nicolaus Otto perfectionnait son moteur en 1876, il a surtout formalisé une chorégraphie invisible : le cycle à quatre temps. Ce cycle est la respiration fondamentale de la plupart des moteurs à essence, de la petite motopompe sur le fleuve Congo à la berline qui traverse Goma. C'est une séquence de transformations de pression et de volume.

Ces cycles théoriques sont des modèles parfaits sur papier. La réalité du terrain, avec ses pertes de chaleur par les parois du cylindre et ses frictions mécaniques, déforme ce diagramme idéal. Comprendre cette différence entre la théorie pure et la pratique du garage est essentiel pour tout mécanicien qui veut poser un diagnostic juste.

A. Le Cycle de Beau de Rochas (dit "Cycle Otto")

Un allumage commandé par une bougie définit le cycle Otto. Il anime la quasi-totalité des moteurs à essence. Sa particularité théorique est une combustion qui se produit à volume constant. Le piston est au Point Mort Haut (PMH), l'espace dans la chambre ne change pas durant l'explosion du mélange air-essence.

Ce cycle se décompose en quatre temps moteurs :

- **Admission :** Le piston descend, la soupape d'admission s'ouvre. Le cylindre aspire le mélange air-carburant.
- **Compression :** Les soupapes se ferment. Le piston remonte et comprime ce mélange.
- **Combustion-Détente :** La bougie produit une étincelle. Le mélange explose, repoussant violemment le piston vers le bas. C'est le seul temps moteur.
- **Échappement :** Le piston remonte, la soupape d'échappement s'ouvre pour évacuer les gaz brûlés.

B. Le Cycle Diesel

Différemment, le cycle Diesel s'appuie sur l'auto-inflammation du carburant. Aucune bougie n'est nécessaire. Ici, seul de l'air est admis puis comprimé à un taux beaucoup plus élevé que dans un moteur Otto. Cette forte compression élève la température de l'air au-delà du point d'auto-inflammation du gazole.

Le carburant est alors injecté en fin de compression. Il s'enflamme spontanément au contact de l'air surchauffé. La caractéristique de ce cycle est une combustion théorique à pression constante. Le moteur Diesel est le roi du couple à bas régime, ce qui explique sa domination dans les camions transportant le cuivre de Lubumbashi ou les grumes de la Province Orientale.

C. Le Cycle Atkinson

Visant un rendement énergétique supérieur, le cycle Atkinson modifie la géométrie du moteur. Son principe fondamental est simple : la course de détente est plus longue que la course de compression. En pratique, cela s'obtient souvent en retardant la fermeture de la soupape d'admission. Une partie du mélange admis est ainsi refoulée dans le collecteur d'admission au début de la compression.

Le résultat est une moindre consommation de carburant. La contrepartie est une puissance spécifique plus faible, surtout à bas régime. Ce compromis rend le cycle Atkinson idéal pour les véhicules hybrides, où un moteur électrique compense le manque de punch au démarrage.

Cas pratique : Le diagnostic du Vieux Mbuta à Matadi

Le Vieux Mbuta est un mécanicien respecté au port de Matadi. Il n'a pas besoin d'ordinateur pour "parler" aux moteurs. Un jour, un camion FUSO en provenance de Boma arrive à son atelier. Le chauffeur se plaint que le moteur "claque" anormalement à l'accélération et dégage une fumée noire épaisse. Les jeunes apprentis pensent à un problème de turbo.

Mbuta demande juste de démarrer le moteur et écoute attentivement. Le claquement sec et métallique est typique. Il ne s'agit pas de la mécanique pure, mais du cycle lui-même. Il explique que la fumée noire indique une combustion incomplète. Le claquement, lui, révèle une injection de gazole mal synchronisée. Le carburant est injecté trop tôt dans le cylindre, provoquant une détonation brutale au lieu d'une combustion progressive. Le cycle Diesel est perturbé à sa source.

Exercice 1 : Le moteur "essoufflé" de la Toyota de Maman Hélène

Énoncé : Maman Hélène, commerçante à Kinshasa, remarque que sa Toyota Corolla à essence manque de puissance dans les côtes de Mont-Ngafula et consomme beaucoup plus qu'avant. Un mécanicien évoque une "perte de compression" sans plus de détails. En vous basant sur le cycle Otto, quelle phase du cycle est directement responsable de ce symptôme ?

Résolution pas-à-pas :

1. **Étape 1 : Identifier le cycle concerné** Le véhicule est une Toyota Corolla à essence. Le moteur fonctionne donc selon le cycle Otto à quatre temps.
2. **Étape 2 : Analyser le symptôme principal** Le symptôme est une "perte de compression". La compression est l'action de presser le mélange air-essence avant l'allumage pour maximiser la force de l'explosion.
3. **Étape 3 : Relier le symptôme à la phase du cycle** La phase directement responsable est la **phase de compression**. Si, pendant cette phase, les soupapes ne sont pas parfaitement étanches ou si les segments du piston sont usés, une partie du mélange s'échappe. La pression finale avant l'allumage est alors trop faible. La combustion qui suit est moins puissante, ce qui explique la perte de puissance et la surconsommation.

Exercice 2 : Le choix du transporteur du Kasaï

Énoncé : Un entrepreneur de Mbuji-Mayi veut acheter un camion pour transporter des sacs de ciment vers Kananga. La route est difficile. Le vendeur lui propose deux options : un camion avec un moteur essence (cycle Otto) très puissant, ou un camion avec un moteur Diesel (cycle Diesel) de puissance maximale légèrement inférieure mais avec un couple bien plus important. Quel cycle est le plus adapté à son besoin et pourquoi ?

Résolution pas-à-pas :

1. **Étape 1 : Définir le besoin technique** Le besoin est de transporter des charges lourdes (ciment) sur une route difficile. Cela exige une grande force de traction, surtout à bas régime, pour démarrer en charge et monter les côtes. Cette force est représentée par le couple moteur.

2. **Étape 2 : Comparer les caractéristiques des cycles** Le cycle Otto (essence) produit sa puissance à des régimes moteur plus élevés. Son couple est généralement plus faible à bas régime. Le cycle Diesel, grâce à son taux de compression très élevé et sa combustion à pression constante, génère un couple très important dès les bas régimes. Il est aussi plus économe en carburant.
3. **Étape 3 : Conclure sur le choix optimal** Le moteur fonctionnant sur le **cycle Diesel** est le choix indiscutable. Son couple élevé à bas régime est parfaitement adapté pour mouvoir des charges lourdes. La puissance maximale inférieure n'est pas un problème, car c'est la force de traction (le couple) qui prime pour un camion de transport.

1.2. Bilan thermique et énergétique du moteur

a. L'illusion de la puissance brute

Même si un constructeur annonce fièrement 150 chevaux pour un moteur, cette puissance est une fiction partielle. Une grande partie de l'énergie contenue dans le carburant ne se transforme jamais en mouvement. C'est une loi fondamentale de la thermodynamique.

Cette énergie perdue se manifeste concrètement. La chaleur intense qui se dégage du capot d'une voiture après un trajet entre Boma et Matadi en est la preuve la plus évidente. Cette chaleur est de l'énergie chimique convertie, mais non utilisée pour la propulsion.

A. La répartition de l'énergie

La combustion d'un litre de carburant libère une quantité totale d'énergie, considérée comme 100%. Cette énergie se divise en plusieurs postes principaux. Le moteur est une machine de conversion où les pertes sont majoritaires.

Cette répartition typique pour un moteur à essence moderne est la suivante :

- **Puissance effective (ou travail utile) :** C'est la seule part qui fait avancer le véhicule. Elle représente entre 25% et 35% de l'énergie totale. C'est la force qui atteint les roues après avoir vaincu les frottements internes.

- **Chaleur évacuée par les gaz d'échappement :** Une part massive, environ 30% à 40%, s'échappe sous forme de gaz brûlants dans la ligne d'échappement.
- **Chaleur évacuée par le système de refroidissement :** Le liquide de refroidissement absorbe et dissipe vers l'extérieur environ 25% à 30% de la chaleur générée par la combustion pour éviter la surchauffe.
- **Pertes diverses (frottements et rayonnement) :** Les 5% à 10% restants sont perdus par le frottement des pièces internes (pistons, bielles, vilebrequin) et le rayonnement thermique direct du bloc moteur.

B. Le rendement effectif : Le vrai juge de paix

Le rendement effectif d'un moteur mesure son efficacité réelle. Il compare l'énergie utile (la puissance aux roues) à l'énergie totale fournie par le carburant. Sa formule est un indicateur de performance essentiel pour tout mécanicien.

$$\eta_{eff} = \frac{\text{Puissance effective}}{\text{Puissance calorifique du carburant}}$$

Un rendement élevé signifie que le moteur convertit mieux le carburant en mouvement. La quête des ingénieurs est d'augmenter la part de la puissance effective en réduisant les trois autres postes de perte.

L'anecdote de la vieille Mercedes 190D à Kisangani

Papa Bolingo, un transporteur respecté de la Province Orientale, possédait une Mercedes 190D qui avait déjà fait plusieurs fois le tour du monde en kilomètres. Son moteur semblait indestructible. Un jour, un jeune mécanicien fraîchement diplômé, Jean, lui fait remarquer que son moteur "perd beaucoup d'énergie". Papa Bolingo rit et lui répond : "Mon fils, ce moteur ne perd rien, il chauffe juste beaucoup. C'est le signe qu'il travaille dur !". Jean lui expliqua alors patiemment le bilan thermique. Il lui démontra que la chaleur excessive sous le capot était en réalité 30% du carburant payé à la pompe qui partait en fumée… ou plutôt, en chaleur dans le radiateur. Papa Bolingo comprit que le "travail dur" de son moteur était en grande partie un gaspillage d'argent.

Exercice 1 : Le calcul du rendement d'un Prado au Kasaï

Énoncé : Un moteur de Toyota Prado V6, lors d'un trajet difficile entre Mbuji-Mayi et Kananga, consomme une quantité de carburant libérant une puissance calorifique totale de 150 kW. Après mesure au banc de puissance, la puissance

effective transmise aux roues est de 45 kW. Calculez le rendement effectif du moteur dans ces conditions.

Résolution pas-à-pas :

1. **Étape 1 : Identification des données** La puissance calorifique totale du carburant est de 150 kW. La puissance effective (utile) est de 45 kW.
2. **Étape 2 : Application de la formule du rendement** La formule du rendement effectif est $\eta_{eff} = \frac{\text{Puissance effective}}{\text{Puissance calorifique du carburant}}$.
3. **Étape 3 : Calcul et conclusion** On remplace les valeurs dans la formule : $\eta_{eff} = \frac{45\,\text{kW}}{150\,\text{kW}} = 0.3$. Le rendement effectif du moteur est de 0.3, soit 30%. Cela signifie que 70% de l'énergie du carburant est perdue en chaleur et frottements.

Exercice 2 : Diagnostic surchauffe à l'Équateur

Énoncé : Un mécanicien à Gemena reçoit un bus qui surchauffe constamment, surtout dans les embouteillages. Le chauffeur affirme que le bus n'a pas perdu de puissance et que la fumée d'échappement semble normale. En se basant sur le bilan thermique, quelle partie de la gestion énergétique du moteur est la plus probablement défaillante ?

Résolution pas-à-pas :

1. **Étape 1 : Analyse des symptômes** Les informations clés sont : surchauffe moteur, puissance effective conservée, gaz d'échappement normaux.
2. **Étape 2 : Corrélation avec le bilan thermique**
   - La puissance effective est normale (25-35%), donc la combustion et la transmission de force fonctionnent correctement.
   - Les gaz d'échappement sont normaux, donc la perte de chaleur par cette voie (30-40%) est probablement dans les clous.
   - La surchauffe indique que la chaleur n'est pas évacuée correctement du bloc moteur.
3. **Étape 3 : Conclusion du diagnostic** Le problème se situe au niveau de la chaleur évacuée par le système de refroidissement (qui

gère 25-30% de l'énergie). Le système (radiateur bouché, thermostat bloqué, pompe à eau défaillante) n'arrive plus à dissiper sa part de l'énergie thermique, provoquant l'accumulation de chaleur dans le moteur.

1.3. Matériaux et procédés de fabrication des composants moteur

Une question de survie mécanique

Lorsque la température à l'intérieur d'un cylindre dépasse 2000°C, chaque pièce métallique subit des contraintes extrêmes de chaleur et de pression. Cette fournaise, répétée des milliers de fois par minute, met à l'épreuve les limites de la science des matériaux. Un simple défaut, une impureté ou un mauvais choix d'alliage conduit inévitablement à la panne.

Le choix d'un matériau n'est donc jamais un hasard. Il répond à un cahier des charges précis : résister à la chaleur, aux forces mécaniques et à l'usure, tout en restant le plus léger possible. C'est un véritable défi d'ingénierie, où chaque gramme et chaque degré comptent pour la performance et la fiabilité du moteur.

A. Les Matériaux Stratégiques du Moteur

La performance d'un moteur dépend directement des matériaux qui le composent. Chaque pièce possède une composition optimisée pour sa fonction spécifique.

- **Bloc-cylindres et culasse :** Ils sont souvent fabriqués en fonte grise ou en alliages d'aluminium. La fonte offre une excellente absorption des vibrations et une bonne résistance à l'usure, à un coût modéré. L'aluminium, plus léger, améliore la dissipation de la chaleur et réduit le poids total du véhicule.
- **Pistons :** Majoritairement en alliages d'aluminium-silicium (Al-Si). Ces matériaux combinent légèreté, pour réduire l'inertie, et une excellente conductivité thermique pour évacuer la chaleur de la combustion.
- **Bielles et vilebrequin :** Ces pièces subissent des efforts de traction et de torsion immenses. Elles sont donc fabriquées en aciers spéciaux, souvent forgés, contenant des éléments comme le chrome et le molybdène pour une résistance maximale à la fatigue.

- **Soupapes :** Les soupapes d'admission sont en acier au chrome-silicium. Celles d'échappement, soumises à des gaz très chauds, nécessitent des superalliages ou des aciers bimétalliques encore plus résistants à la chaleur.

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

Figure 1 : Réf. IMG (9911-3874-5310)

Vue éclatée d'un piston et d'une bielle modernes

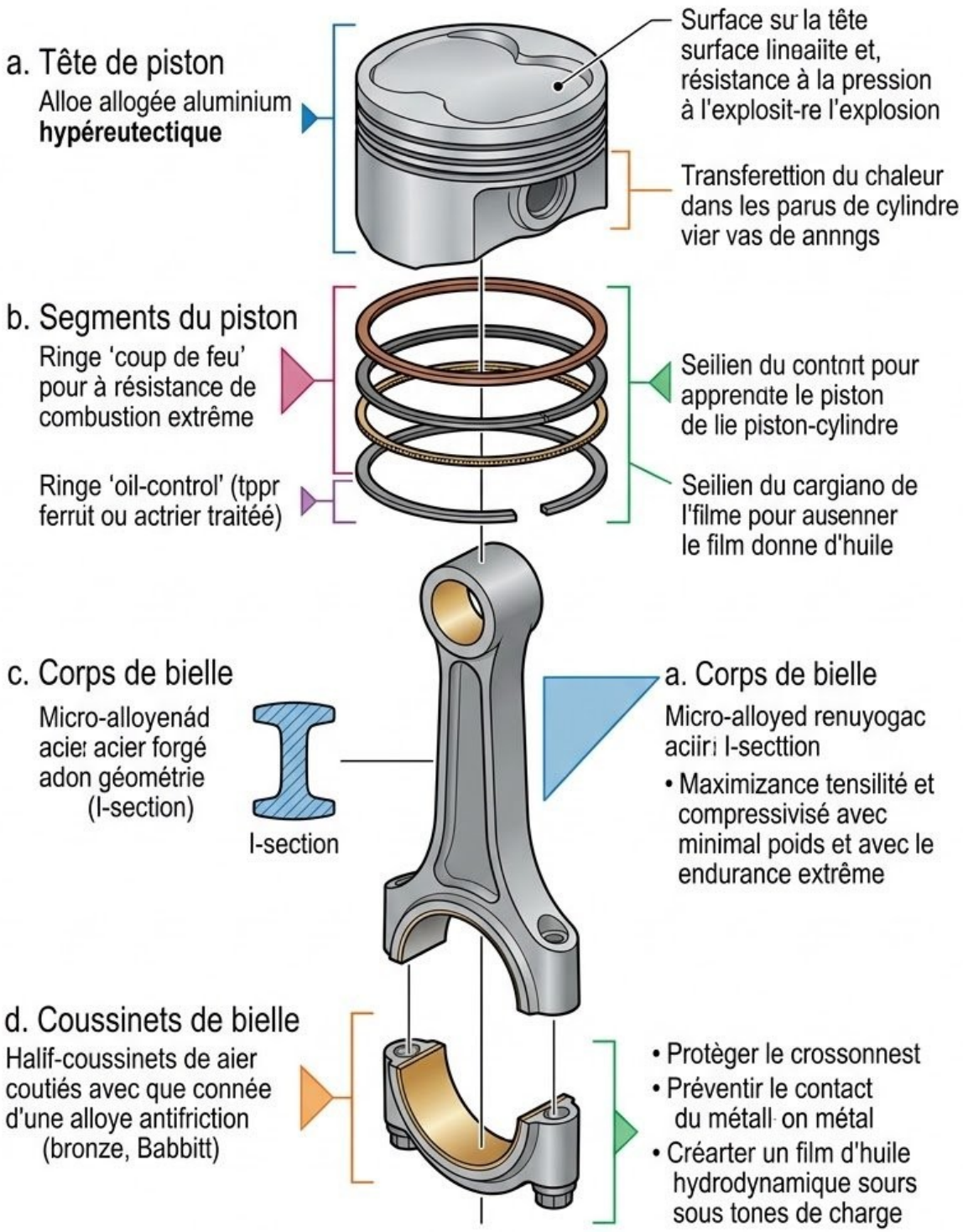


Figure 1 : Réf. IMG (9911-3874-5310)

Vue éclatée d'un piston et d'une bielle modernes

a. Tête de piston

L'analyse visuelle montre une surface lisse, conçue pour résister à la pression de l'explosion. Sa composition en alliage d'aluminium hypereutectique lui permet de supporter des températures élevées tout en évacuant rapidement la chaleur vers les parois du cylindre, via les segments.

b. Segments du piston

Typiquement en fonte ou en acier traité, ces anneaux assurent l'étanchéité entre le piston et le cylindre. Le segment "coup de feu" (le plus haut) est spécialement traité pour résister aux températures et pressions extrêmes de la combustion. Les segments racleurs gèrent le film d'huile.

c. Corps de bielle

La section en "I" de la bielle est une signature du forgeage. Cette forme offre une résistance maximale à la traction et à la compression avec un poids minimal. Le matériau est un acier micro-allié, traité thermiquement pour une endurance extrême face aux cycles de charge.

d. Coussinets de bielle

Ces demi-coques en acier, recouvertes d'un alliage antifriction (bronze, Babbitt), protègent le vilebrequin. Elles créent un film d'huile hydrodynamique qui empêche le contact métal contre métal, même sous des charges de plusieurs tonnes.

■ ■ ■

B. Les Procédés de Fabrication Clés

Obtenir la pièce finale requiert une succession d'opérations complexes. La méthode de fabrication est aussi cruciale que le matériau lui-même.

- **Le Moulage :** Cette technique consiste à couler du métal en fusion dans un moule pour obtenir une forme brute, appelée "brut de fonderie". Elle est utilisée pour les pièces complexes comme le bloc-cylindres et la culasse.
- **Le Forgeage :** Le métal est chauffé puis frappé ou pressé dans une matrice pour obtenir sa forme. Ce processus aligne le grain du métal,

conférant aux pièces (bielles, vilebrequins) une résistance mécanique et à la fatigue très élevée.

- **L'Usinage :** C'est l'ensemble des techniques d'enlèvement de matière (tournage, fraisage, perçage, rectification) pour donner à la pièce ses dimensions finales et son état de surface. Un cylindre est par exemple alésé puis rectifié (honing).
- **Les Traitements Thermiques :** Des opérations comme la trempe ou la cémentation modifient la structure du métal en surface ou à cœur pour en augmenter la dureté et la résistance à l'usure (pignons, arbres à cames, axes de piston).