ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE

4è Année

Option ÉLECTRONIQUE



CONFORME AU PROGRAMME NATIONAL

EDITION 2025



TABLE DE MATIERE

PRÉLIMINAIRES 1
Objectifs Généraux du Cours 1
2. Compétences Visées 🛠️ </h2> 2
3. Approche Pédagogique 📚 5
CHAPITRE 1 : L'AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL EN COMMANDE ET RÉGULATION 10
1.1. L'amplificateur différentiel et le rejet du mode commun 10
- 1.1.1. Principe de la soustraction analogique en milieu industriel 10
- 1.1.2. Le Taux de Réjection du Mode Commun (TRMC) 12
- 1.1.3. Architecture interne et limitations 12

1.2. L'amplificateur d'instrumentation 14
- 1.2.1. Insuffisances du montage différentiel simple 14
- 1.2.2. Architecture à trois amplificateurs opérationnels 14
- 1.2.3. Application aux ponts de jauges 16

1.3. Montages de mise à l'échelle et de décalage de niveau 18
- 1.3.1. Nécessité du conditionnement de signal 18
- 1.3.2. Réalisation du gain et de l'offset 18
- 1.3.3. Exemple de dimensionnement 18

1.4. L'intégrateur et le dérivateur en régulation 20
- 1.4.1. L'action Intégrale : Mémoire et précision 20
- 1.4.2. L'action Dérivée : Anticipation et stabilité 20

1.5. Ressources complémentaires 22
- 1.5.1. Questions et réponses d'approfondissement 22
- 1.5.2. Confusions et erreurs fréquentes à éviter 23
- 1.5.3. Scenarios et Exercices 23

CHAPITRE 2 : CONCEPTION DE FILTRES ACTIFS POUR LE CONDITIONNEMENT DE SIGNAL 26
2.1. Nécessité du filtrage en milieu industriel 26
- 2.1.1. Nature et origine des perturbations 26
- 2.1.2. Avantage du filtrage actif sur le passif 26

2.2. Les filtres actifs passe-bas 28
- 2.2.1. Rôle et dimensionnement du premier ordre 28
- 2.2.2. Structure de Sallen-Key (Second ordre) 28

2.3. Les filtres actifs passe-haut 30
- 2.3.1. Élimination de la composante continue et des dérives 30
- 2.3.2. Architecture et limites de stabilité 30

2.4. Les filtres actifs passe-bande et réjecteurs 32
- 2.4.1. Sélection fréquentielle (Passe-bande) 32
- 2.4.2. Le filtre réjecteur de bande (Notch) 32

2.5. Ressources complémentaires 34
- 2.5.1. Questions et réponses d'approfondissement 34
- 2.5.2. Confusions et erreurs fréquentes à éviter 35
- 2.5.3. Scenarios et Exercices 35

CHAPITRE 3 : COMPARATEURS ET TRIGGERS DE SCHMITT 38

3.1. L'ampli-op en boucle ouverte : le comparateur 38
- 3.1.1. Fonctionnement en régime de saturation 38
- 3.1.2. Distinction entre Ampli-op et Comparateur dédié 40

3.2. Le comparateur simple et ses applications 42
- 3.2.1. Architecture du détecteur de seuil 42
- 3.2.2. Application à la surveillance de tension à Kindu 42
- 3.2.3. Limitations dues au bruit 42

3.3. Le comparateur à hystérésis (Trigger de Schmitt) 44
- 3.3.1. Principe de la réaction positive 44
- 3.3.2. Modélisation mathématique du Trigger de Schmitt inverseur 44

3.4. Conception de circuits de mise en forme 46
- 3.4.1. Du signal capteur au signal logique 46
- 3.4.2. Dimensionnement pour la compatibilité 46

3.5. Ressources complémentaires 49
- 3.5.1. Questions et réponses d'approfondissement 49
- 3.5.2. Confusions et erreurs fréquentes à éviter 49
- 3.5.3. Scenarios et Exercices 50

CHAPITRE 4 : LES CONVERTISSEURS DE DONNÉES (CAN/CNA) EN MILIEU INDUSTRIEL 53
4.1. Le rôle des convertisseurs dans l'automatisation 53
- 4.1.1. L'interface entre deux mondes 53
- 4.1.2. La chaîne d'acquisition et de restitution 53

4.2. Le convertisseur numérique-analogique (CNA) 54
- 4.2.1. Principe de la conversion pondérée 54
- 4.2.2. Le réseau R-2R 54

4.3. Le convertisseur analogique-numérique (CAN) 55
- 4.3.1. Nécessité de l'échantillonneur-bloqueur (Sample & Hold) 55
- 4.3.2. Le CAN à approximations successives (SAR) 55

4.4. Paramètres de choix d'un convertisseur 56
- 4.4.1. La Résolution 56
- 4.4.2. La fréquence d'échantillonnage 56
- 4.4.3. Le type d'entrée (Courant vs Tension) 56

4.5. Ressources complémentaires 56
- 4.5.1. Questions et réponses d'approfondissement 56
- 4.5.2. Confusions et erreurs fréquentes à éviter 57
- 4.5.3. Scenarios et Exercices 57

CHAPITRE 5 : LE THYRISTOR (SCR) : PRINCIPE ET COMMANDE 62
5.1. Constitution et caractéristique statique 62
- 5.1.1. Structure interne et modélisation bipolaire 62
- 5.1.2. Analyse de la caractéristique Anode-Cathode 62
- 5.1.3. Courants de Verrouillage et de Maintien 63

5.2. Les conditions d'amorçage 63
- 5.2.1. Mécanismes de déclenchement 63
- 5.2.2. La zone de commande sûre 64

5.3. Les conditions de blocage 64
- 5.3.1. Principe de l'extinction 64
- 5.3.2. Commutation naturelle 64
- 5.3.3. Commutation forcée 65

5.4. Protection des thyristors 65
- 5.4.1. Protection contre les variations de courant (di/dt).....65
- 5.4.2. Protection contre les variations de tension (dv/dt) 65

5.5. Ressources complémentaires.....66
- 5.5.1. Questions et réponses d'approfondissement 66
- 5.5.2. Confusions et erreurs fréquentes à éviter 67
- 5.5.3. Scenarios et Exercices.....67

CHAPITRE 6 : LE TRIAC ET LA COMMANDE DE PUISSANCE EN ALTERNATIF 70

6.1. Constitution et principe du TRIAC.....70
- 6.1.1. L'interrupteur bidirectionnel pour le réseau alternatif 70
- 6.1.2. Structure en couches complexes.....70

6.2. Caractéristique et quadrants de fonctionnement 70
- 6.2.1. Les quatre modes de déclenchement.....70
- 6.2.2. Stratégie de commande industrielle.....71

6.3. Le DIAC comme circuit de déclenchement.....71
- 6.3.1. Nécessité d'un seuil franc.....71
- 6.3.2. Fonctionnement du DIAC 72

6.4. Comparaison Thyristor / TRIAC 72
- 6.4.1. Tableau de synthèse technique.....72
- 6.4.2. La limitation du dv/dt de commutation (Commutation failure).....73

6.5. Ressources complémentaires.....73
- 6.5.1. Questions et réponses d'approfondissement 73
- 6.5.2. Confusions et erreurs fréquentes à éviter 74
- 6.5.3. Scenarios et Exercices.....74

CHAPITRE 7 : REDRESSEURS COMMANDÉS ET GRADATEURS 77

7.1. Le redresseur monophasé tout thyristors.....77
- 7.1.1. Architecture du Pont de Graetz commandé (PD2).....77
- 7.1.2. Analyse des formes d'ondes et tension moyenne.....77
- 7.1.3. Fonctionnement en onduleur assisté (Récupération d'énergie).....78

7.2. Le redresseur mixte (semi-commandé) 78
- 7.2.1. Structure asymétrique et économie.....78

- 7.2.2. La fonction de roue libre inhérente....78

7.3. Le gradateur à commande de phase....79

- 7.3.1. Principe du découpage de phase AC....79
- 7.3.2. Le réseau de déphasage RC....79

7.4. Commande de charges inductives....79

- 7.4.1. Le conflit tension-courant....79
- 7.4.2. Défaut d'amorçage et asymétrie....80

7.5. Ressources complémentaires....80

- 7.5.1. Questions et réponses d'approfondissement....80
- 7.5.2. Confusions et erreurs fréquentes à éviter....81
- 7.5.3. Scenarios et Exercices....81

CHAPITRE 8 : HACHEURS ET ONDULEURS : PRINCIPES ET APPLICATIONS....84

8.1. Le hacheur série (dévolteur)....84

- 8.1.1. Principe de la conversion DC-DC abaisseuse....84
- 8.1.2. Rôle critique de la diode de roue libre....84
- 8.1.3. Conduction continue et discontinue....84

8.2. Le rapport cyclique....85

- 8.2.1. Définition et contrôle....85
- 8.2.2. Fonction de transfert en tension....85

8.3. L'onduleur monophasé en pont....85

- 8.3.1. Génération d'alternatif à partir du continu....85
- 8.3.2. Séquence de commande bipolaire....86
- 8.3.3. La gestion des temps morts (Dead Time)....86

8.4. La commande par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI ou PWM)....86

- 8.4.1. Vers la sinusoïde parfaite....86
- 8.4.2. Comparaison Sinus-Triangle....87
- 8.4.3. La commande scalaire V/f constant....87

8.5. Ressources complémentaires....87

- 8.5.1. Questions et réponses d'approfondissement....87
- 8.5.2. Confusions et erreurs fréquentes à éviter....88
- 8.5.3. Scenarios et Exercices....88

CHAPITRE 9 : LES CIRCUITS DE BASE DE LA LOGIQUE SÉQUENTIELLE (BASCULES) 93
9.1. Distinction entre logique combinatoire et séquentielle 93
- 9.1.1. L'absence de mémoire en logique combinatoire 93
- 9.1.2. La notion d'état et de mémorisation séquentielle 93

9.2. Les bascules RS et D 94
- 9.2.1. La bascule RS : Le verrou élémentaire 94
- 9.2.2. La bascule D : La synchronisation des données 94

9.3. La bascule JK 95
- 9.3.1. L'universalité de la JK 95
- 9.3.2. Le mode basculement (Toggle) 95

9.4. Entrées asynchrones (Preset, Clear) 95
- 9.4.1. La priorité sur l'horloge 95
- 9.4.2. Application à la sécurité (Power-On Reset) 96

9.5. Ressources complémentaires 96
- 9.5.1. Questions et réponses d'approfondissement 96
- 9.5.2. Confusions et erreurs fréquentes à éviter 97
- 9.5.3. Scenarios et Exercices 97

CHAPITRE 10 : LES COMPTEURS ET TEMPORISATEURS NUMÉRIQUES 100
10.1. Le compteur binaire asynchrone 100
- 10.1.1. Principe de la mise en cascade 100
- 10.1.2. Limitation de vitesse et aléas de propagation 100

10.2. Le compteur binaire synchrone 100
- 10.2.1. L'horloge parallèle 100
- 10.2.2. La logique de gestion des transitions 101

10.3. Les circuits intégrés compteurs 101
- 10.3.1. Composants standards (Série 74 et 4000) 101
- 10.3.2. La mise en cascade et le report (Carry) 101

10.4. Les temporisateurs programmables 102
- 10.4.1. Le principe "Compteur + Base de temps" 102
- 10.4.2. Fonctionnement en automatisme 102

10.5. Ressources complémentaires 102
- 10.5.1. Questions et réponses d'approfondissement 102
- 10.5.2. Confusions et erreurs fréquentes à éviter 103
- 10.5.3. Scenarios et Exercices 104

CHAPITRE 11 : INTRODUCTION À L'AUTOMATISME SÉQUENTIEL : LE GRAFCET 106
11.1. Le but du GRAFCET 106
- Nécessité d'un Langage de Description Normalisé 106
- Le GRAFCET comme Outil de Dialogue 106
- Distinction entre Logique Combinatoire et Séquentielle 107

11.2. Les éléments de base : étape, transition, liaison 107
- L'Étape : Représentation d'un État Stable 107
- La Transition : La Barrière Logique 108
- La Liaison Orientée 109

11.3. Les règles d'évolution 109
- Règle 1 : Situation Initiale 109
- Règle 2 : Le Franchissement d'une Transition 110
- Règle 3 : Évolution des Étapes Actives 110
- Règle 4 : Évolutions Simultanées 110
- Règle 5 : Priorité à l'Activation 111

11.4. Description d'un processus séquentiel simple 111
- Méthodologie de Construction 111
- Exemple d'Application : Commande d'une Perceuse Automatique 112

11.5. Ressources complémentaires 113
- 11.5.1 Questions et réponses d'approfondissement 113
- 11.5.2 Confusions et erreurs fréquentes à éviter 115

11.6. Scenarios et Exercices 116
- Scenarios et Exercices 116

ANNEXES ..... a
ANNEXES ..... a
RÉFÉRENTIELS TECHNIQUES ET MÉTHODOLOGIQUES 🛠️📚 i
1. Mémento des Montages à Amplificateur Opérationnel 💻 i

- 1.1. Hypothèses Fondamentales et Modélisation 📐 i
- 1.2. Le Montage Amplificateur Inverseur 🔄 i
- 1.3. Le Montage Amplificateur Non-Inverseur 📈 ii
- 1.4. Le Montage Suiveur de Tension (Buffer) 🛡️ iii
- 1.5. Le Montage Sommateur Inverseur ➕ iii
- 1.6. Le Montage Amplificateur Différentiel ⚖️ iv
- 1.7. Le Montage Intégrateur ⏳ iv

2. Guide de Choix d'un Composant de Puissance 🔌 ⚡ iv
- 2.1. Introduction à la Lecture des Datasheets 📄 iv
- 2.2. Les Paramètres de Tension (Tenue au Blocage) 🛑 v
- 2.3. Les Paramètres de Courant (Capacité de Conduction) 🌊 v
- 2.4. Les Paramètres de Gâchette (Commande) 🎮 vi
- 2.5. Les Paramètres Dynamiques et Thermiques 🌡️ ⏱️ vi

3. Tableau des Bascules Logiques 💾 🔄 vii
- 3.1. Bascule RS (Reset-Set) Asynchrone vii
- 3.2. Bascule D (Data) Synchrone..... vii
- 3.3. Bascule JK Synchrone viii
- 3.4. Bascule T (Toggle) viii

4. Introduction à l'Implantation d'un GRAFCET 🏭 🤖 ix
- 4.1. Principe Général de l'Évolution.....ix
- 4.2. Implantation en Logique Câblée (Séquenceur Pneumatique ou Électrique) ix
- 4.3. Implantation en Logique Programmée (Automates Industriels).....x
- 4.4. Exemple Pratique d'Équations (Démarrage Direct).....xi



PRÉLIMINAIRES

Objectifs Généraux du Cours

<h3>1.1. L'intégration systémique de l'électronique industrielle</h3> Ce manuel a pour vocation première de doter l'élève de 4ème année des humanités techniques des compétences indispensables à la compréhension, l'analyse et la conception des systèmes électroniques complexes qui régissent les processus industriels contemporains. L'objectif central dépasse la simple accumulation de connaissances théoriques sur des composants isolés pour bâtir un pont conceptuel solide et opérationnel entre trois disciplines souvent cloisonnées : l'électronique de signal, l'électronique de puissance et l'automatisme séquentiel.

Dans le contexte industriel actuel de la République Démocratique du Congo, la frontière entre ces domaines s'estompe progressivement. Une chaîne de production moderne, qu'il s'agisse d'une unité de traitement métallurgique dans le Lualaba ou d'une ligne d'embouteillage à Kinshasa, fonctionne comme un organisme unifié où l'information et l'énergie circulent en symbiose. Le cours explore donc en profondeur les interfaces analogiques qui agissent comme les organes sensoriels du système, captant les grandeurs physiques avec précision. Il analyse minutieusement les commutateurs de puissance semi-conducteurs qui, tels des muscles, convertissent l'énergie électrique en action mécanique ou thermique. Enfin, il décortique les logiques de commande séquentielles qui, à l'instar du système nerveux, orchestrent le tempo et la sécurité des opérations. La finalité ultime est la formation d'un technicien supérieur polyvalent, apte à intervenir avec assurance sur des chaînes de production automatisées, en maîtrisant la totalité de la chaîne d'action, depuis les circuits de commande basse tension jusqu'aux actionneurs de forte puissance.

<h3>1.2. Vers une autonomie technique et décisionnelle</h3>

L'ambition de ce programme est de transformer l'apprenant en un acteur technique autonome, capable de dépasser le simple rôle d'exécutant pour devenir un véritable analyste des systèmes. L'industrie nationale requiert des techniciens capables de diagnostiquer des pannes sur des équipements hétérogènes, d'adapter des technologies importées aux contraintes locales (chaleur, humidité, instabilité du réseau) et de concevoir des solutions de rénovation pour des installations vieillissantes.

Ce cours vise à inculquer une rigueur scientifique inébranlable dans le dimensionnement des composants et la structuration des commandes. L'élève apprendra à justifier chaque choix technologique par des critères d'efficacité énergétique, de fiabilité opérationnelle et de sécurité des personnes et des biens. En maîtrisant les interactions entre la partie commande (le cerveau numérique ou analogique) et la partie opérative (la puissance), le futur technicien sera en mesure d'optimiser les rendements de production et de garantir la continuité de service des infrastructures critiques, telles que celles gérées par la SNEL ou la REGIDESO.

<h3>1.3. L'adaptation aux réalités technologiques locales</h3> Au-delà des théories universelles, ce cours intègre spécifiquement les défis inhérents à l'environnement congolais. Nous formons des techniciens capables de comprendre l'impact d'une tension réseau fluctuante sur la commande des thyristors, ou les conséquences d'une température ambiante élevée sur la dissipation thermique des onduleurs. L'objectif est de développer une intelligence pratique qui permet de sélectionner des composants robustes et de concevoir des systèmes tolérants aux perturbations, assurant ainsi la pérennité des investissements industriels nationaux.

2. Compétences Visées 🛠️ </h2>

Au terme de cette année de formation intensive, l’élève aura acquis un ensemble cohérent de cinq compétences majeures, constituant le socle de son expertise professionnelle. Ces compétences sont conçues pour être immédiatement mobilisables sur le marché du travail.

<h3>2.1. Conception de circuits de conditionnement de signal</h3> La première compétence clé réside dans la capacité à concevoir des chaînes d'acquisition de données fiables et précises, essentielles pour la surveillance des processus. L'élève maîtrisera l'utilisation avancée des amplificateurs opérationnels pour interfacer le monde physique avec le monde numérique.

<h4>2.1.1. Analyse et Traitement du Signal</h4> Il saura dimensionner des montages amplificateurs, inverseurs, non-inverseurs ou d'instrumentation, pour adapter les niveaux de tension infimes issus de capteurs industriels variés (thermocouples, jauges de contrainte, débitmètres, sondes pH) aux standards des entrées d'automates (0-10V, 4-20mA). Cette compétence inclut la linéarisation des réponses de capteurs et la compensation des dérives thermiques.

<h4>2.1.2. Filtrage et Immunité au Bruit</h4> Il développera une expertise dans la conception de filtres actifs (passe-bas, passe-bande, réjecteur) pour éliminer les bruits parasites industriels générés par les variateurs de vitesse et les contacteurs de puissance. Il apprendra à protéger les étages d'entrée contre les surtensions transitoires, garantissant ainsi l'intégrité de l'information mesurée avant sa conversion numérique.

<h3>2.2. Maîtrise de la commutation de puissance</h3> La seconde compétence vise la gestion efficace de l'énergie électrique via les semi-conducteurs de puissance. L'élève deviendra expert dans le principe de fonctionnement et la commande des thyristors (SCR) et des TRIACs, véritables interrupteurs statiques de l'industrie.

<h4>2.2.1. Pilotage de la Gâchette et Synchronisation</h4> Il saura calculer et réaliser les circuits de commande de gâchette, en assurant une synchronisation parfaite avec le passage à zéro de la tension secteur pour minimiser les parasites électromagnétiques. Il maîtrisera les techniques d'isolation galvanique (optocoupleurs, transformateurs d'impulsion) indispensables pour la sécurité des circuits de commande et des opérateurs.

<h4>2.2.2. Applications Thermiques et Motrices</h4> Il sera capable de mettre en œuvre ces composants pour des applications concrètes de variation de puissance, telles que le contrôle précis de la température de fours industriels résistifs ou le démarrage progressif de moteurs asynchrones. Cette maîtrise permet de limiter les contraintes mécaniques sur les arbres de transmission et de réduire drastiquement les appels de courant sur le réseau lors des démarrages.

<h3>2.3. Ingénierie de la conversion d'énergie statique</h3> La troisième compétence concerne l'analyse et la conception des structures de conversion d'énergie qui alimentent les actionneurs modernes et régulent les flux énergétiques.

<h4>2.3.1. Redressement Commandé et Variation DC</h4> L'élève saura concevoir et dépanner des ponts redresseurs mixtes ou tout thyristors pour piloter la vitesse des moteurs à courant continu (encore présents dans l'industrie extractive) ou charger des parcs de batteries industrielles de secours. Il comprendra les phénomènes de commutation et les contraintes de filtrage associées.

<h4>2.3.2. Hachage et Ondulation</h4> Il acquerra une compréhension fine des principes des hacheurs pour la régulation DC-DC et des onduleurs pour la

génération de tensions alternatives variables. Ces technologies sont au cœur des variateurs de vitesse modernes (VFD) et des systèmes d'alimentation sans interruption (ASI) qui protègent les équipements sensibles des hôpitaux ou des centres de données contre les coupures de courant.

<h3>2.4. Spécification d'automatismes séquentiels par le GRAFCET</h3> La quatrième compétence est méthodologique et logique. L'élève acquerra la maîtrise du langage GRAFCET (Graphe Fonctionnel de Commande Étapes-Transitions) pour structurer intellectuellement la commande des systèmes automatisés.

<h4>2.4.1. Modélisation Rigoureuse des Procédés</h4> Il sera apte à traduire un cahier des charges fonctionnel complexe, exprimé en langage courant, en une représentation graphique claire, normée et non ambiguë. Cette modélisation définira avec précision les étapes du cycle, les transitions conditionnelles et les actions associées, éliminant tout risque d'interprétation erronée lors de la réalisation.

<h4>2.4.2. Coordination et Supervision</h4> Il saura gérer les séquences simultanées, les choix de divergence, les reprises sur arrêt et les modes de marche dégradés. Cette compétence lui permettra de fournir une spécification technique précise, directement utilisable pour la programmation d'automates industriels ou la réalisation de séquenceurs câblés fiables.

<h3>2.5. Architecture et Interfaçage des Microprocesseurs</h3> La cinquième compétence ouvre la porte vers l'intelligence numérique embarquée. L'élève comprendra l'architecture interne d'un système à microprocesseur et son rôle central de superviseur dans la commande de processus.

<h4>2.5.1. Gestion des Entrées/Sorties Industrielles</h4> Il maîtrisera les techniques d'interfaçage pour connecter le microprocesseur aux capteurs et actionneurs du monde réel. Cela implique l'utilisation de coupleurs optiques pour l'isolation, de relais pour la puissance, et de convertisseurs analogique-numérique (CAN) et numérique-analogique (CNA) pour la traduction des grandeurs physiques.

<h4>2.5.2. Logique Programmée vs Câblée</h4> Il appréhendera la différence fondamentale et les critères de choix entre la logique câblée figée (relais, circuits logiques) et la logique programmée flexible. Cette compréhension prépare le terrain pour l'utilisation avancée des automates

programmables industriels (API) et des systèmes embarqués, essentiels pour l'adaptabilité des lignes de production.

3. Approche Pédagogique 📚

La stratégie didactique adoptée dans ce manuel rompt volontairement avec l'enseignement théorique désincarné pour privilégier une approche systémique, pragmatique et profondément ancrée dans le réel industriel congolais.

<h3>3.1. Une démarche systémique et intégrée</h3> L'apprentissage est structuré pour éviter le morcellement stérile des connaissances. Chaque chapitre, bien qu'abordant une brique technologique spécifique (comme l'ampli-op, le thyristor ou le compteur), la situe immédiatement au sein d'une chaîne de commande complète. L'élève ne verra jamais un composant comme une entité isolée, mais toujours comme un maillon fonctionnel interagissant dynamiquement avec l'ensemble du système. Par exemple, l'étude du thyristor intègre nécessairement l'analyse du circuit de commande en amont (électronique de signal) et le comportement de la charge inductive en aval (électrotechnique). Cette vision globale est essentielle pour former des techniciens capables de comprendre les interdépendances complexes qui régissent les installations industrielles et d'anticiper les effets en cascade lors d'une modification technique ou d'une panne.

<h3>3.2. L'apprentissage par la résolution de problèmes (APP)</h3> Le moteur de la progression pédagogique est la résolution de problèmes concrets (Problem-Based Learning) inspirés de la réalité du terrain. L'accent est mis sur l'analyse de cas pratiques qui obligent l'élève à mobiliser simultanément des compétences en analogique, en puissance et en logique pour trouver une solution viable.

<h4>3.2.1. Scénarios Réalistes et Dépanage</h4> Les exercices et les exemples plongent l'élève dans des situations professionnelles authentiques. Il ne s'agit pas seulement de calculer une valeur de résistance, mais de comprendre pourquoi une résistance standard brûlerait dans telle application spécifique. Les scénarios incluent des diagnostics de pannes : identifier pourquoi un moteur vibre, pourquoi une mesure de température dérive, ou pourquoi une séquence s'arrête inopinément. Cela développe l'esprit critique et la capacité d'analyse déductive.

<h4>3.2.2. Synergie Technologique</h4> L'élève constate par la pratique la nécessaire complémentarité des technologies. Il découvre comment une

boucle de régulation analogique s'intègre harmonieusement dans une séquence GRAFCET, ou comment un microprocesseur supervise un étage de puissance à thyristors. Cette approche renforce sa compréhension de l'architecture globale des automatismes et le prépare à dialoguer avec des spécialistes de différents domaines.

<h3>3.3. Projets Contextualisés et Ancrage Local</h3> Pour donner tout son sens et sa pertinence à la formation, le cours s'appuie sur des projets fédérateurs qui résonnent avec l'environnement socio-économique immédiat de l'élève. Ces projets permettent d'intégrer, de synthétiser et de valider l'ensemble des compétences acquises dans un cadre signifiant et motivant.

<h4>3.3.1. Projet A : Station de Pompage REGIDESO à Kananga 💧</h4> Dans ce projet fil rouge, l'élève sera amené à concevoir le système de commande complet d'une petite station de pompage autonome destinée à alimenter un quartier périphérique. Ce projet mobilise transversalement :

- Le conditionnement précis des signaux des capteurs de niveau (cuve) et de pression (conduite) via des amplificateurs opérationnels.
- La commande de puissance des motopompes triphasées utilisant des démarreurs progressifs à thyristors pour protéger le réseau local fragile.
- La logique séquentielle de gestion des pompes (alternance pour usure égale, démarrage de la pompe de secours en cas de défaillance) décrite rigoureusement par un GRAFCET.
- La gestion des alarmes et des sécurités pour prévenir le fonctionnement à sec ou les surcharges.

<h4>3.3.2. Projet B : Automatisation Agroalimentaire à Mbandaka 🏭</h4> Un second projet portera sur l'automatisation d'une étape de production (par exemple, le dosage et l'emballage de farine de manioc) dans une unité de transformation locale. Ce cas d'étude mettra en lumière :

- L'utilisation de capteurs de position, de présence et de poids (jauges de contrainte).
- Le pilotage d'actionneurs électromécaniques (moteurs de convoyeurs) et pneumatiques (vérins d'éjection).
- La synchronisation fine des tâches par une logique séquentielle rigoureuse pour optimiser la cadence.

- L'importance cruciale de la maintenabilité et de la robustesse des solutions choisies face aux conditions d'humidité élevée de la région équatoriale.

Cette approche pédagogique garantit que l'élève ne se contente pas d'apprendre "comment ça marche" théoriquement, mais comprenne profondément "à quoi ça sert" et "comment le mettre en œuvre efficacement" dans le contexte spécifique et exigeant de l'industrie en République Démocratique du Congo.

Éditions Donel C.
Direction Éditoriale et Conception Générale :
MURHULA BAZIKANGE M.
Pour contacts, mon site web :
https://murhulabazikange.com/

© 2025, Donel Consulting, Kin. RDC
Tous droits réservés.

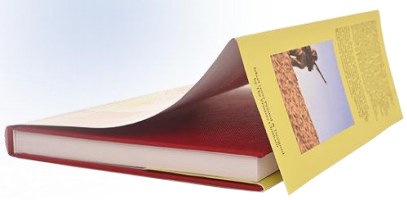
Pour l'excellence de l'éducation en RDC,
Tous les manuels scolaires en un seul endroit,
sur ce site web :
https://manuels-scolaires-rdc.com/

Pour plus de détails, scannez ceci :

PARTIE I

LES INTERFACES ANALOGIQUES POUR LA COMMANDE INDUSTRIELLE

Cette partie se consacre à l'étude des circuits qui forment l'interface entre le monde physique des capteurs et le monde numérique de la commande. Les processus industriels sont régis par des grandeurs physiques (température, pression, vitesse) qui sont de nature analogique. L'élève y apprendra à utiliser l'amplificateur opérationnel pour conditionner, filtrer et préparer ces signaux avant leur conversion, une étape cruciale pour garantir la fiabilité et la précision de toute chaîne de régulation.



CHAPITRE 1 : L'AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL EN COMMANDE ET RÉGULATION

1.1. L'amplificateur différentiel et le rejet du mode commun

1.1.1. Principe de la soustraction analogique en milieu industriel

L'environnement industriel, tel que celui rencontré dans les usines de traitement métallurgique du Haut-Katanga ou les stations de pompage de la Regideso, se caractérise par une pollution électromagnétique intense. Les moteurs de forte puissance, les variateurs de vitesse et les lignes à haute tension génèrent des champs parasites qui induisent des tensions indésirables sur les câbles de mesure. L'amplificateur différentiel constitue la première ligne de défense contre ces perturbations.

La fonction primaire de cet étage consiste à amplifier exclusivement la différence de potentiel entre ses deux entrées, inverseuse (V_-) et non-inverseuse (V_+), tout en éliminant les tensions identiques présentes sur les deux bornes. Mathématiquement, la tension de sortie V_{out} s'exprime par la relation :

$$V_{out} = A_d(V_+ - V_-) + A_c\left(\frac{V_+ + V_-}{2}\right)$$

Dans cette équation, A_d représente le gain différentiel (le gain utile) et A_c le gain de mode commun (le gain parasite). Dans un scénario idéal, A_c est nul. En pratique, lorsqu'un capteur de température situé à 50 mètres de l'armoire de commande transmet un signal via une paire torsadée, le bruit électromagnétique induit la même tension parasite sur les deux fils. L'amplificateur différentiel soustrait ces deux tensions, annulant ainsi le bruit pour ne conserver que le signal utile du capteur.

CHAPITRE 1 : L'AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL EN COMMANDE ET RÉGULATION

1.1. L'amplificateur différentiel et le rejet du mode commun

1.1.1. Principe de la soustraction analogique en milieu industriel

SCÉNARIO INDUSTRIEL : USINE DE TRAITEMENT MÉTALLURGIQUE, HAUT-KATANGA

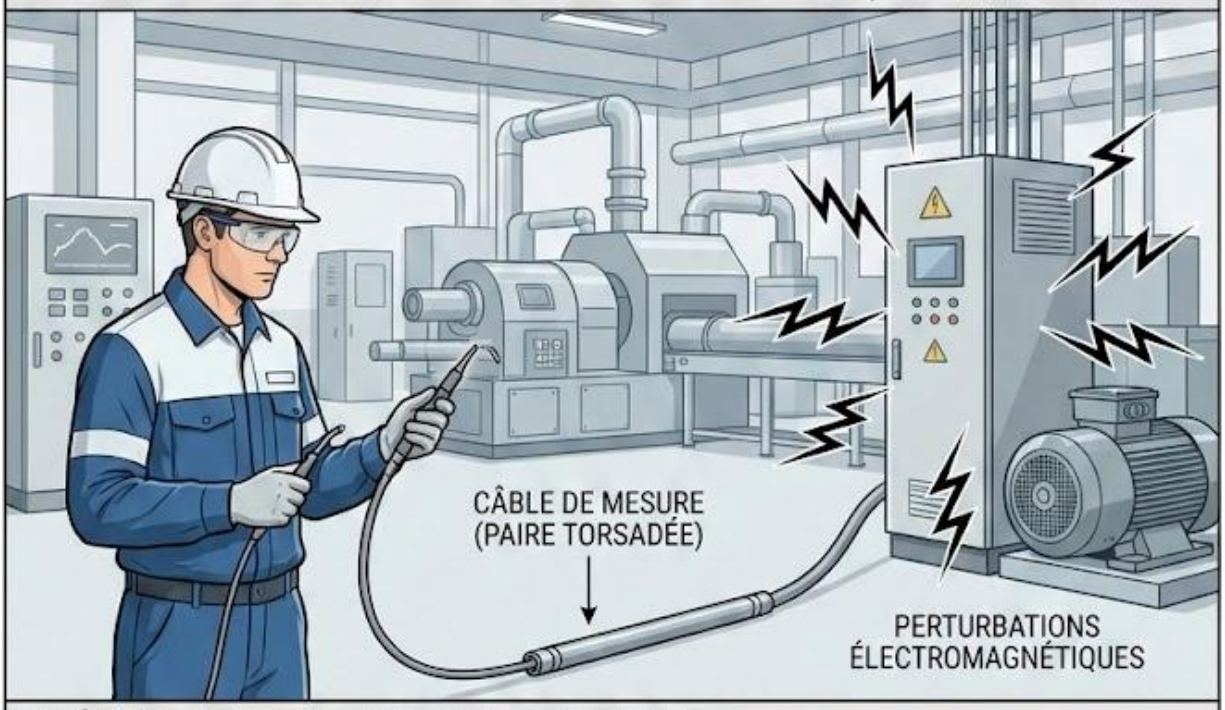
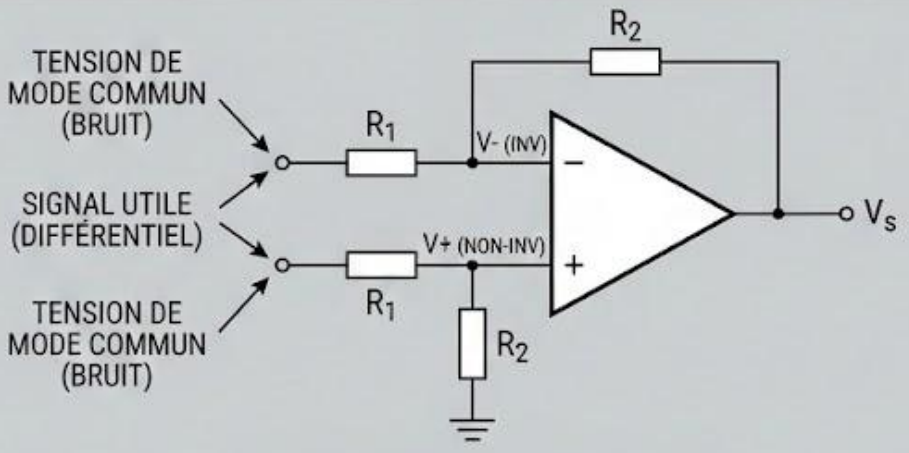


SCHÉMA DE PRINCIPE : SOUSTRACTION ANALOGIQUE



$$V_s = A_d(V+ - V-) + A_c\left(\frac{V+ + V-}{2}\right)$$

Gain différentiel (A_d) — Gain de mode commun (A_c)

L'amplificateur différentiel soustrait les tensions parasites pour isoler le signal utile du capteur.

1.1.2. Le Taux de Réjection du Mode Commun (TRMC)

La performance d'un amplificateur différentiel se mesure par sa capacité à discriminer le signal utile du bruit de fond. Ce paramètre se nomme le Taux de Réjection du Mode Commun (TRMC) ou CMRR (Common Mode Rejection Ratio). Il se définit comme le rapport entre le gain différentiel et le gain de mode commun :

$$CMRR = 20\log\left(\frac{|A_d|}{|A_c|}\right)$$

Pour une application industrielle fiable, une valeur de CMRR supérieure à 90 dB est impérative. Cela signifie que le bruit de mode commun est atténué d'un facteur 30 000 par rapport au signal utile. Lors du choix d'un amplificateur opérationnel pour une carte de commande destinée à fonctionner à proximité des redresseurs de la SNEL, l'élève doit systématiquement vérifier cette valeur dans la datasheet du composant. Un CMRR insuffisant entraîne une instabilité des mesures et des déclenchements intempestifs des systèmes de sécurité.

1.1.3. Architecture interne et limitations

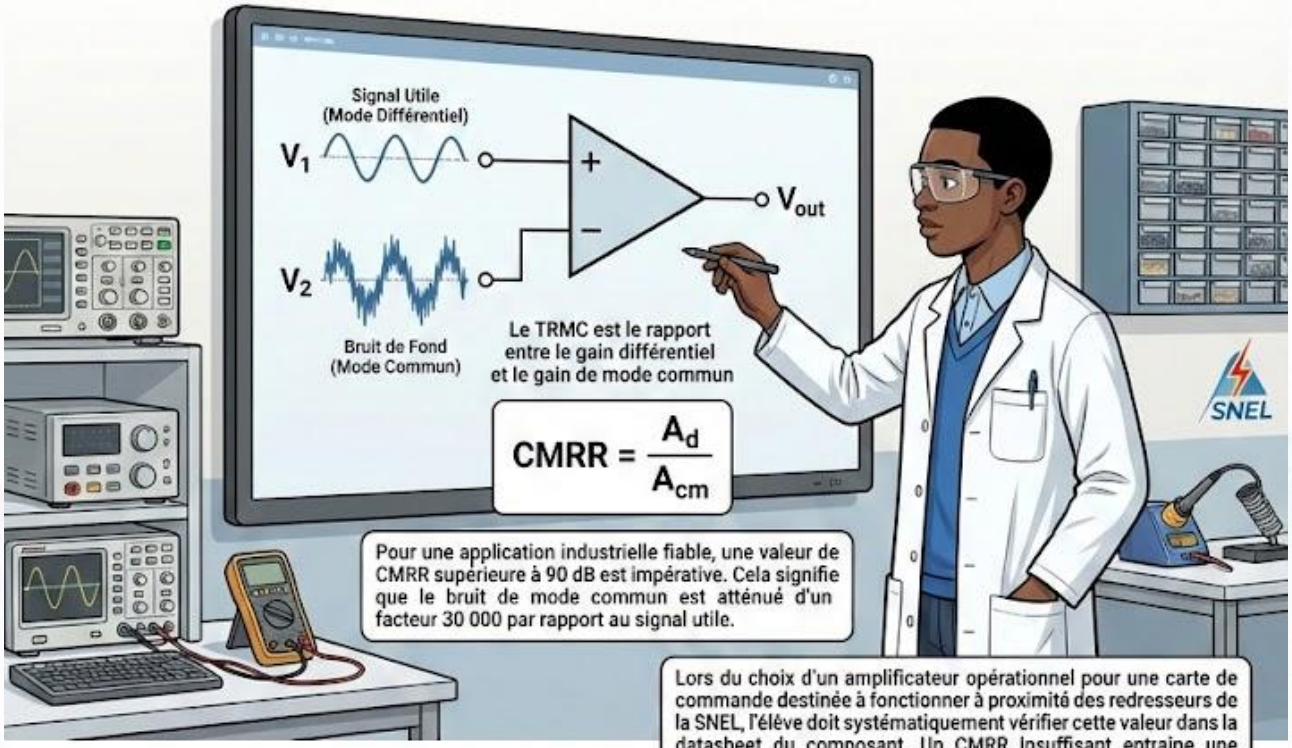
La structure de base repose sur quatre résistances de précision. L'équilibre strict des rapports de résistance détermine la qualité de la réjection. Si nous utilisons quatre résistances R_1, R_2, R_3, R_4, la condition d'équilibre pour obtenir une soustraction parfaite est :

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}$$

Toute dérive thermique ou tolérance imprécise de ces composants dégrade immédiatement le CMRR. C'est pourquoi, en électronique industrielle, on privilégie l'usage de réseaux de résistances intégrés ou découpés au laser, garantissant un appariement thermique parfait, plutôt que des composants discrets standards.

1.1.2. Le Taux de Réjection du Mode Commun (TRMC)

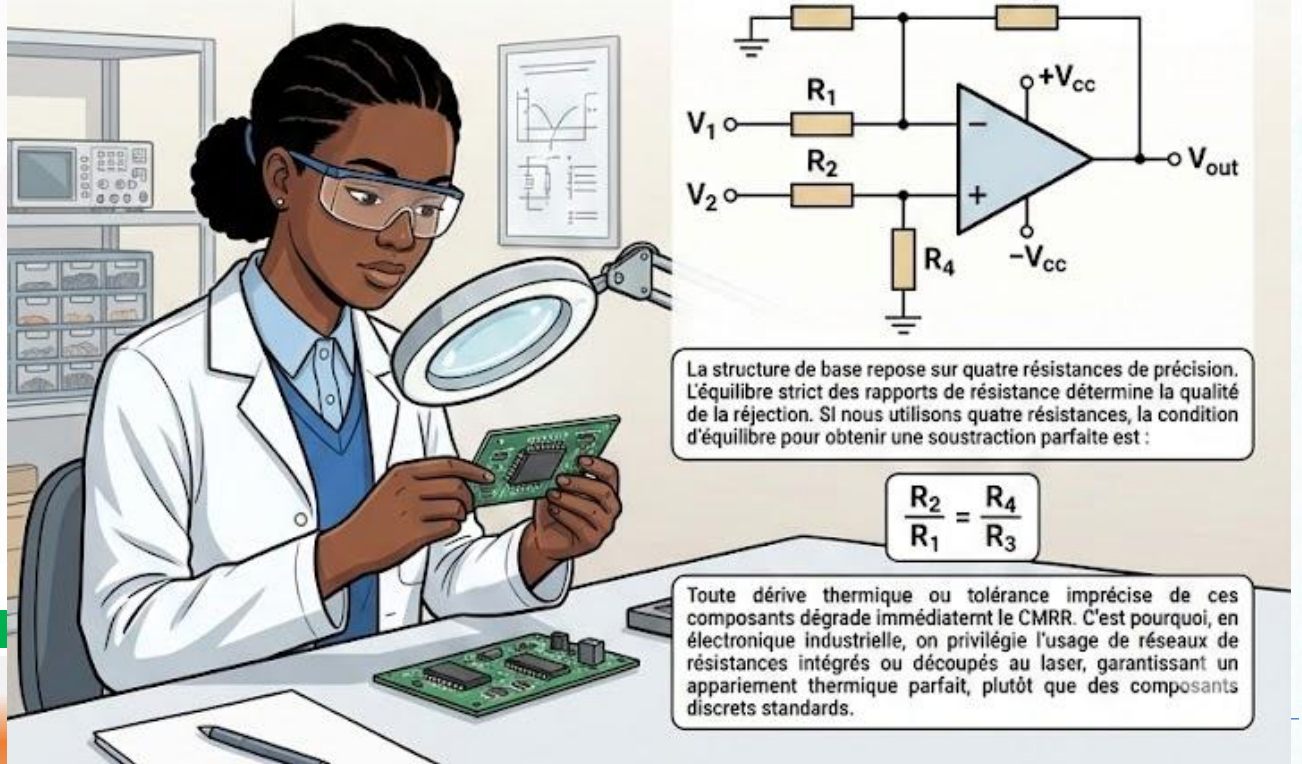
La performance d'un amplificateur différentiel se mesure par sa capacité à discriminer le signal utile du bruit de fond. Ce paramètre se nomme le **Taux de Réjection du Mode Commun (TRMC)** ou CMRR (Common Mode Rejection Ratio).



Pour une application industrielle fiable, une valeur de CMRR supérieure à 90 dB est impérative. Cela signifie que le bruit de mode commun est atténué d'un facteur 30 000 par rapport au signal utile.

Lors du choix d'un amplificateur opérationnel pour une carte de commande destinée à fonctionner à proximité des redresseurs de la SNEL, l'élève doit systématiquement vérifier cette valeur dans la datasheet du composant. Un CMRR insuffisant entraîne une instabilité des mesures et des déclenchements intempestifs des systèmes de sécurité.

1.1.3. Architecture interne et limitations



La structure de base repose sur quatre résistances de précision. L'équilibre strict des rapports de résistance détermine la qualité de la réjection. Si nous utilisons quatre résistances, la condition d'équilibre pour obtenir une soustraction parfaite est :

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}$$

Toute dérive thermique ou tolérance imprécise de ces composants dégrade immédiatemt le CMRR. C'est pourquoi, en électronique industrielle, on privilégie l'usage de réseaux de résistances intégrés ou découpés au laser, garantissant un appariement thermique parfait, plutôt que des composants discrets standards.

1.2. L'amplificateur d'instrumentation

1.2.1. Insuffisances du montage différentiel simple

Le montage soustracteur simple présente une limitation majeure pour la mesure de précision : ses impédances d'entrée sont finies et asymétriques. L'impédance vue par la source connectée à l'entrée inverseuse est relativement faible, ce qui provoque un effet de charge inacceptable sur des capteurs à haute impédance comme les sondes pH ou les jauges de contrainte piézoélectriques. Le prélèvement de courant par l'amplificateur fausse la mesure avant même son amplification.

1.2.2. Architecture à trois amplificateurs opérationnels

L'amplificateur d'instrumentation résout ce problème en plaçant deux amplificateurs suiveurs (buffers) non-inverseurs en amont de l'étage différentiel. Cette configuration offre une impédance d'entrée théoriquement infinie (de l'ordre du Giga-Ohm) sur les deux entrées, garantissant l'intégrité du signal issu du capteur.

[Image of instrumentation amplifier schematic with 3 op-amps]

Le schéma standard comprend deux étages :

1. **L'étage d'entrée (Gain ajustable) :** Composé de deux AOP, il amplifie la différence de tension tout en laissant passer le mode commun avec un gain unitaire. Le gain de cet étage est réglé par une résistance unique externe, notée R_g.

2. **L'étage de sortie (Différentiel) :** Il supprime la composante de mode commun et fournit la sortie référencée à la masse.

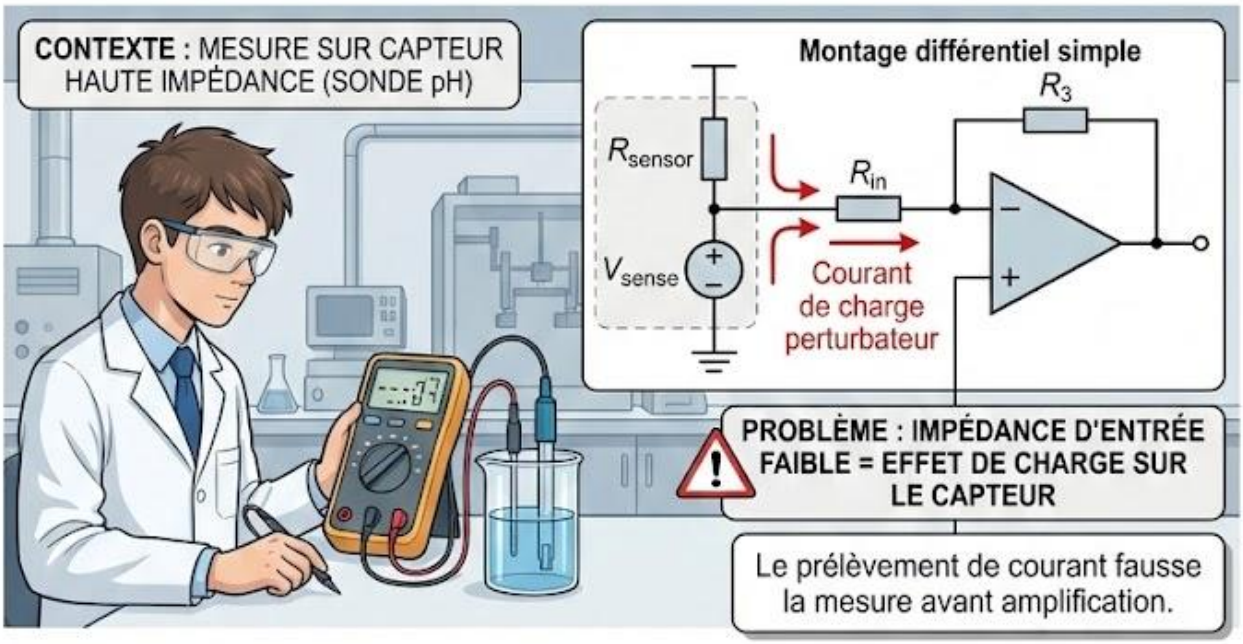
La fonction de transfert globale devient :

$$V_{out} = \left(1 + \frac{2R}{R_g}\right)(V_+ - V_-)$$

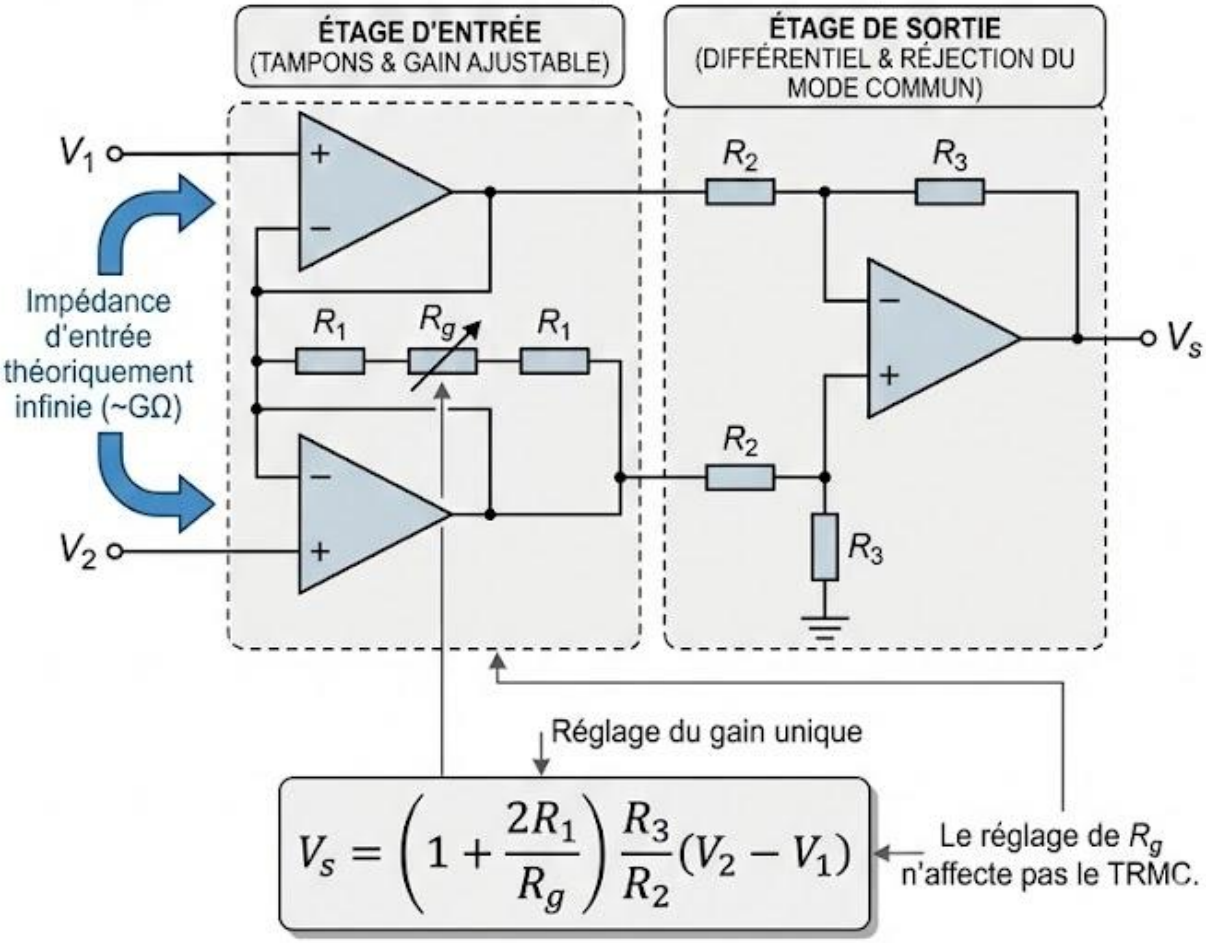
Cette formule démontre que le réglage du gain s'effectue par la seule variation de R_g, sans déséquilibrer le pont de résistances responsable du TRMC.

1.2. L'amplificateur d'instrumentation

1.2.1. Insuffisances du montage différentiel simple

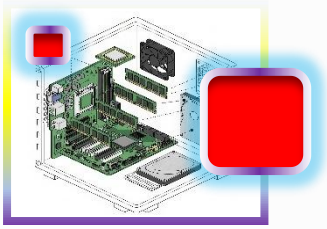


1.2.2. Architecture à trois amplificateurs opérationnels



1.2.3. Application aux ponts de jauges

Dans les installations minières, le pesage des minerais sur les convoyeurs s'effectue via des cellules de charge montées en pont de Wheatstone. La variation de tension aux bornes du pont est infime, souvent de l'ordre de quelques millivolts, superposée à une tension continue de mode commun (la moitié de la tension d'alimentation du pont). L'amplificateur d'instrumentation (tel que l'AD620 ou l'INA128) est le composant standard pour extraire ce signal. Il assure simultanément la haute impédance nécessaire pour ne pas effondrer la tension du pont, l'amplification massive du signal différentiel et l'élimination de la tension d'alimentation commune.



Saut de page pour image