

# Systèmes embarqués

## Architecture et familles de microcontrôleur



Pape Abdoulaye BARRO, PhD  
UFR des Sciences et technologies  
Département Informatique

5 décembre 2023



- 1 Caractérisation
- 2 Les exigences génériques
- 3 Composants d'un microcontrôleur
- 4 Structure de la mémoire : Architectures Von Neumann et Harvard
- 5 Architectures de microprocesseurs : CISC et RISC
- 6 Famille de microcontrôleurs
- 7 Résumé

## Objectifs

Cette section étudie la structure et les ressources que l'on trouve dans les microcontrôleurs typiques :

- Elle dégage les caractéristiques d'un micro-ordinateur et/ou d'un microprocesseur ;
- Donne les exigences génériques et quelques composants d'un microcontrôleur ;
- Présente les modèles génériques de la structure de la mémoire ainsi que les différents jeux d'instructions d'un microprocesseur ;
- Parcourt quelques exemples de familles de microcontrôleur.

- 1 Caractérisation
- 2 Les exigences génériques
- 3 Composants d'un microcontrôleur
- 4 Structure de la mémoire : Architectures Von Neumann et Harvard
- 5 Architectures de microprocesseurs : CISC et RISC
- 6 Famille de microcontrôleurs
- 7 Résumé

# Microprocesseurs et microcontrôleurs : Caractérisation 1

Un micro-ordinateur générique se compose de trois blocs fondamentaux :

- Unité Centrale de Traitement ou Central Processing Unit (CPU) ;
- Mémoire ou memory ;
- Système d'Entrée/Sortie (E/S) ou Input/Output (I/O) system.

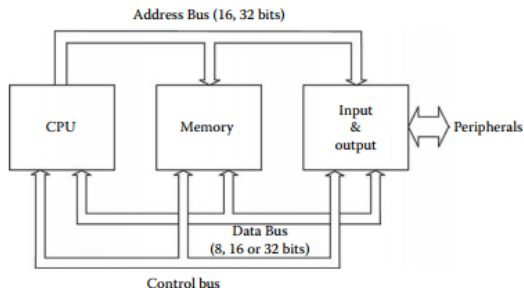


FIGURE – Schéma fonctionnel générique d'un micro-ordinateur.

## Le nom des bus

Ces blocs sont interconnectés par des groupes de lignes électriques appelés bus :

- Les bus qui transportent la mémoire ou les adresses d'E/S sont appelés bus d'adresses ou address buses ;
- Les bus qui transportent des données ou des instructions sont appelés bus de données ou data buses ;
- Les bus qui transportent des signaux de commande sont appelés bus de commande ou control buses.

Dans un micro-ordinateur, la CPU est son microprocesseur, qui est le circuit intégré qui effectue les opérations décrites ci-dessus :

- La CPU est le cerveau du micro-ordinateur, étant sous le contrôle du programme stocké en mémoire. Les tâches de la CPU consistent à récupérer les instructions stockées en mémoire, à interpréter ces instructions et à les exécuter.
- La CPU comprend également les circuits nécessaires pour effectuer des opérations arithmétiques et logiques avec des données binaires. Ce circuit spécial est appelé unité arithmétique et logique ou Arithmetic and Logic Unit (ALU).

Un microcontrôleur peut être considéré comme un micro-ordinateur construit sur un seul circuit intégré ou puce. Historiquement, les microcontrôleurs sont apparus après les microprocesseurs et ont suivi des chemins indépendants :

- Les microprocesseurs se trouvent principalement dans les ordinateurs personnels et les stations de travail, car ils nécessitent une forte puissance de calcul et la capacité de gérer de grands ensembles de données et d'instructions à grande vitesse.
- Un paramètre très important pour les microprocesseurs est la taille de leurs registres internes (8, 16, 32 ou 64 bits), car elle détermine le nombre de bits qui peuvent être traités simultanément.



- D'autre part, les microcontrôleurs sont utilisés dans une grande variété d'applications. On les trouve dans l'industrie automobile, les systèmes de communication, l'instrumentation électronique, les équipements hospitaliers, les équipements et applications industriels, les appareils ménagers, les jouets, etc. .
- Les microcontrôleurs ont été conçus pour être utilisés dans des applications où ils doivent effectuer un petit nombre de tâches au coût économique le plus bas possible. Ils le font en exécutant un programme stocké de façon permanente dans leur mémoire, tandis que les ports d'entrée/sortie du microcontrôleur servent à interagir avec le monde extérieur. Par conséquent, le microcontrôleur devient une partie de l'application ; c'est un contrôleur intégré au système.

Les applications complexes peuvent utiliser plusieurs microcontrôleurs, chacun d'entre eux se concentrant sur un petit groupe de tâches.

- 1 Caractérisation
- 2 Les exigences génériques**
- 3 Composants d'un microcontrôleur
- 4 Structure de la mémoire : Architectures Von Neumann et Harvard
- 5 Architectures de microprocesseurs : CISC et RISC
- 6 Famille de microcontrôleurs
- 7 Résumé

# Microprocesseurs et microcontrôleurs : Les exigences génériques I

Les exigences génériques suivantes sont importantes pour les microcontrôleurs et les conceptions utilisant des microcontrôleurs :

## ① Ressources d'entrée/sortie

Contrairement aux microprocesseurs dans lesquels l'accent est mis sur la puissance de calcul, les microcontrôleurs mettent l'accent sur leurs ressources d'entrée/sortie, telles que la capacité à gérer les interruptions, les signaux analogiques, le nombre de lignes d'entrée et de sortie différentes, etc.

## ② Optimisation de l'espace

Il est important d'utiliser le plus petit encombrement possible à un coût raisonnable. Etant donné que le nombre de broches dans une puce dépend de son emballage, l'encombrement peut être optimisé en ayant une broche capable de remplir plusieurs fonctions différentes.

# Microprocesseurs et microcontrôleurs : Les exigences génériques II

## ③ Utiliser le microcontrôleur le plus approprié pour une application donnée

Les fabricants de microcontrôleurs ont développé des familles de périphériques avec le même jeu d'instructions mais des aspects matériels différents, tels que la taille de la mémoire, les périphériques d'entrée/sortie, etc. Cela permet au concepteur de sélectionner l'appareil le plus approprié dans une famille donnée.

## ④ Protection contre les pannes.

Il est essentiel pour la sécurité de garantir que le microcontrôleur exécute le programme correct. Si, pour une raison quelconque, le programme s'égare, la situation doit être immédiatement corrigée. Les microcontrôleurs ont une minuterie de surveillance ou watchdog timer (WDT) pour s'assurer que le programme s'est exécuté correctement. Les minuteries Watchdog n'existent pas sur les ordinateurs personnels.

# Microprocesseurs et microcontrôleurs : Les exigences génériques III

## 5 **Faible consommation d'énergie**

Comme les batteries alimentent de nombreuses applications utilisant des microcontrôleurs, il est important de veiller à la faible consommation d'énergie des microcontrôleurs. En outre, l'énergie utilisée lorsque le microcontrôleur ne fait rien, doit être réduite au minimum. Pour ce faire, le microcontrôleur est mis en état de veille jusqu'à ce qu'il reprenne l'exécution du programme.

## 6 **Protection des programmes contre les copies**

Le programme stocké en mémoire doit être protégé contre toute lecture non autorisée. Pour ce faire, les microcontrôleurs intègrent des mécanismes de protection contre la copie.

- 1 Caractérisation
- 2 Les exigences génériques
- 3 Composants d'un microcontrôleur**
- 4 Structure de la mémoire : Architectures Von Neumann et Harvard
- 5 Architectures de microprocesseurs : CISC et RISC
- 6 Famille de microcontrôleurs
- 7 Résumé

# Microprocesseurs et microcontrôleurs : Composants d'un microcontrôleur I

Les microcontrôleurs combinent les ressources fondamentales disponibles dans un micro-ordinateur telles que le processeur, la mémoire et les ressources d'E/S dans une seule puce.

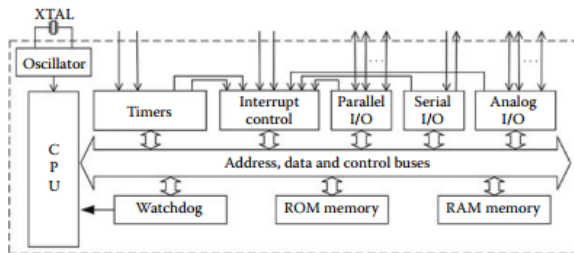


FIGURE – Schéma de principe d'un microcontrôleur

# Microprocesseurs et microcontrôleurs : Composants d'un microcontrôleur II

- **Oscillateur (Oscillator)** : Les microcontrôleurs ont un oscillateur (en cristal de quartz (XTAL)) pour générer le signal nécessaire à la synchronisation de toutes les opérations internes.



FIGURE – Oscillateur à cristal



# Microprocesseurs et microcontrôleurs : Composants d'un microcontrôleur III

- **CPU (Central Processing Unit)** : Semblable aux micro-ordinateurs, la CPU est le cerveau du microcontrôleur.



FIGURE –  
Microprocesseur  
ATMEGA32U4

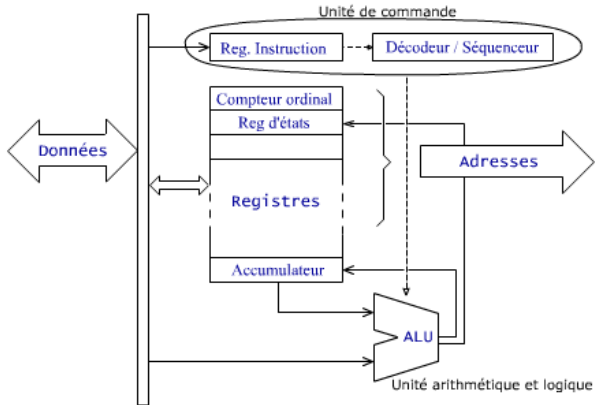


FIGURE – CPU (Central Processing Unit)

# Microprocesseurs et microcontrôleurs : Composants d'un microcontrôleur IV

Il est constitué essentiellement de trois parties :

- L'unité de commande : Qui cherche les instructions en mémoire, les décode et coordonne le reste du processeur pour les exécuter.
- L'Unité Arithmétique et Logique (ALU) : Qui exécute les instructions arithmétiques et logiques demandées par l'unité de commande.
- Les registres : Ils servent à stocker des variables, les résultats intermédiaires d'opérations (arithmétiques ou logiques) ou encore des informations de contrôle du processeur. Ils sont variés, certains sont destinés à un usage général, et d'autres ont un but spécifique. on distingue entre autres :
  - Le registre d'instruction ou Instruction Register (IR) qui contient le code de l'instruction qui est traitée par le décodeur/séquenceur ;
  - L'accumulateur ou accumulator (ACC) qui est principalement destiné à contenir les données qui doivent être traitées par l'ALU ;
  - Les registres généraux qui servent au stockage de résultats intermédiaires ;

# Microprocesseurs et microcontrôleurs : Composants d'un microcontrôleur V

- Le registre d'adresses de données ou Data Address Register (DAR) qui stocke les adresses de données de la mémoire ;
- Le compteur ordinal ou Program Counter (PC) qui contient l'adresse de la prochaine instruction à exécuter ;
- Le registre d'état ou status register (STATUS) qui contient les bits qui présentent différentes caractéristiques liées aux opérations effectuées par l'ALU.

# Microprocesseurs et microcontrôleurs : Composants d'un microcontrôleur VI

- **RAM/ROM** : La mémoire du microcontrôleur stocke à la fois les instructions de programme et les données. Tout microcontrôleur a deux types de mémoire : la mémoire vive ou Random-Access Memory (RAM) (peut être lue et écrite mais volatile) et la mémoire morte ou read-only memory (ROM) (ne peut être que lue et est non volatile). La RAM et la ROM sont des mémoires à «accès aléatoire» (différent de l'accès séquentiel), ce qui signifie que le temps d'accès à des données spécifiques ne dépend pas de leur emplacement stocké. Les différents types de technologies utilisées pour la ROM telles que :
  - **EPROM**(Erasable Programmable Read-Only Memory ou mémoire morte programmable effaçable) ;
  - **EEPROM**(Electrical Erasable Programmable Read-Only Memory ou mémoire morte programmable effaçable électrique) ;
  - **OTP**(One-Time Programmable ou programmable une fois) ;
  - **FLASH**

# Microprocesseurs et microcontrôleurs : Composants d'un microcontrôleur VII

- **I/O ou E/S** : Les ressources E/S se composent des ports série et parallèle, des temporisateurs et des gestionnaires d'interruption. Certains microcontrôleurs intègrent également des lignes d'entrée et de sortie analogiques associées à des convertisseurs analogique-numérique ou analog-to-digital (A/D) et numérique-analogique ou digital-to-analog (D/A). Les ressources nécessaires pour assurer le fonctionnement régulier des microcontrôleurs tels que le chien de garde ou **watchdog** sont également considérées comme faisant partie des ressources d'entrée/sortie.
  - Les ports série peuvent être de différentes technologies telles que RS-232C (Recommended Standard 232, Revision C), I2C (inter-integrated circuit), USB (universal serial bus) et Ethernet.
  - En général, un microcontrôleur disposera du plus grand nombre possible de ressources d'entrée/sortie pour le nombre de broches disponibles dans son boîtier de circuit intégré.

# Microprocesseurs et microcontrôleurs : Composants d'un microcontrôleur VIII

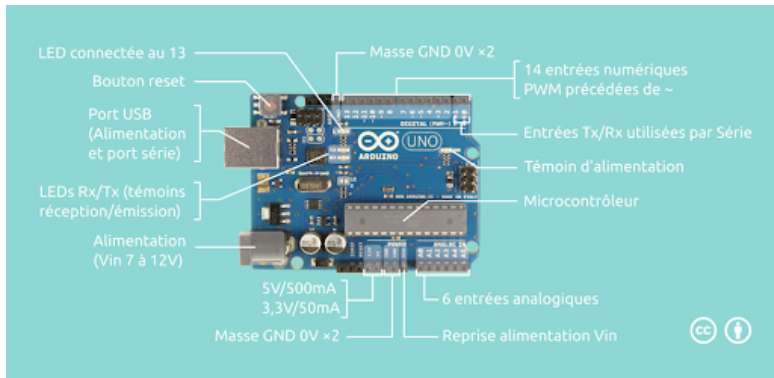


FIGURE – Les composants de la carte arduino uno

- 1 Caractérisation
- 2 Les exigences génériques
- 3 Composants d'un microcontrôleur
- 4 Structure de la mémoire : Architectures Von Neumann et Harvard**
- 5 Architectures de microprocesseurs : CISC et RISC
- 6 Famille de microcontrôleurs
- 7 Résumé

# Microprocesseurs et microcontrôleurs : Von Neumann et Harvard I

La façon dont la mémoire est organisée et dont elle communique avec le CPU détermine les performances de l'appareil. Les deux modèles génériques de matériel pour la structure de la mémoire sont appelés architectures Von Neumann et Harvard.

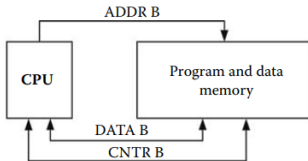


FIGURE – Architecture Von Neumann

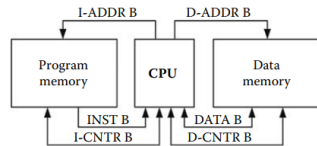


FIGURE – Architecture Harvard



# Microprocesseurs et microcontrôleurs : Von Neumann et Harvard II

- L'architecture Von Neumann a été proposée par le mathématicien John von Neumann lorsqu'il a conçu l'Intégrateur et calculateur numérique électronique ou Electronic Numerical Integrator and Calculator (ENIAC) à l'Université de Pennsylvanie pendant la Seconde Guerre mondiale. Il a eu l'idée originale de développer un ordinateur à programmes stockés. L'architecture von Neumann utilise moins de lignes que l'architecture Harvard, ce qui rend la connexion entre le processeur et la mémoire beaucoup plus simple. Toutefois, cette structure ne permet pas le traitement simultané de données et d'instructions car il n'y a qu'un seul bus.

# Microprocesseurs et microcontrôleurs : Von Neumann et Harvard III

- L'architecture Harvard a été proposée par Howard Aiken lorsqu'il a développé les ordinateurs connus sous le nom de Mark I, II, III et IV à l'université de Harvard. Ce furent les premiers ordinateurs à utiliser des mémoires différentes pour stocker séparément les données et les instructions, ce qui constitue une approche très différente de l'ordinateur à programme stocké. L'architecture de Harvard utilise différentes mémoires pour stocker les instructions et les données. La mémoire de programme possède son propre bus d'adresse (bus d'adresse d'instruction), son propre bus de données (plus correctement appelé bus d'instruction) et son propre bus de contrôle. La mémoire de données possède son propre bus d'adresse, son propre bus de données et son propre bus de commande, indépendamment des bus d'instruction.

- 1 Caractérisation
- 2 Les exigences génériques
- 3 Composants d'un microcontrôleur
- 4 Structure de la mémoire : Architectures Von Neumann et Harvard
- 5 Architectures de microprocesseurs : CISC et RISC**
- 6 Famille de microcontrôleurs
- 7 Résumé

# Microprocesseurs et microcontrôleurs : CISC et RISC I

L'ordinateur à jeu d'instructions complexes ou Complex Instruction Set Computer (CISC) et l'ordinateur à jeu d'instructions réduit ou Reduced Instruction Set Computer (RISC) sont des architectures de microprocesseurs développées pour permettre une compilation efficace des programmes.

- **RISC** : Il fonctionne avec un minimum de jeu d'instructions hautement optimisé, au lieu du jeu d'instructions plus spécialisé que l'on trouve dans d'autres types d'architectures. Cela signifie que le microprocesseur aura moins de cycles par instruction. Il contient des instructions relativement simples et basiques à partir desquelles des instructions plus complexes peuvent être produites.

## Quelques avantages des processeurs RISC :

- Il permet aux compilateurs de langage de haut niveau de produire un code plus efficace ;
- RISC maximise l'efficacité en minimisant le temps d'exécution ;
- Comme il est relativement simple, très peu d'instructions et quelques modes d'adressage sont nécessaires ;
- ... .

## Inconvénients des processeurs RISC :

- La performance des processeurs RISC dépend du compilateur ou du programmeur car les instructions suivantes peuvent dépendre de l'instruction précédente pour compléter leur exécution ;
- Les processeurs RISC nécessitent des systèmes de mémoire très rapides pour alimenter les différentes instructions.

- **CISC** : Il est constitué d'instructions uniques pouvant exécuter plusieurs opérations de bas niveau, par exemple, "charger de la mémoire une opération arithmétique, et un stockage en mémoire). Les processeurs CISC sont également capables d'exécuter des opérations multi-étages.

C'est un type de microprocesseur qui contient des instructions spécialisées simples/complexes.

Les processeurs du CISC ont permis de simplifier le code et de le rendre plus court afin de réduire les besoins en mémoire.

Dans les processeurs CISC, chaque instruction comporte plusieurs opérations de bas niveau. Cela rend les instructions CISC courtes, mais complexes.

## Quelques avantages des processeurs CISC :

- Les exigences en matière de mémoire sont réduites au minimum ;
- L'exécution d'une seule instruction permet de réaliser plusieurs tâches de bas niveau ;
- L'accès à la mémoire est plus souple en raison du schéma d'adressage complexe ;
- Les emplacements mémoire peuvent être directement accessibles par les instructions CISC ;
- ... .

## Inconvénients des processeurs CISC :

- Bien que la taille du code soit réduite au minimum, le code nécessite plusieurs cycles d'horloge pour exécuter une seule instruction. Cela réduit l'efficacité du système ;
- CISC a été conçu pour réduire au minimum les besoins en mémoire lorsque la mémoire est plus petite et plus coûteuse . Aujourd'hui, la mémoire est peu coûteuse et la majorité des nouveaux systèmes informatiques disposent d'une grande quantité de mémoire.

- 1 Caractérisation
- 2 Les exigences génériques
- 3 Composants d'un microcontrôleur
- 4 Structure de la mémoire : Architectures Von Neumann et Harvard
- 5 Architectures de microprocesseurs : CISC et RISC
- 6 Famille de microcontrôleurs**
- 7 Résumé



## Famille de microcontrôleurs

Les différents microcontrôleurs qui ont le même noyau, c'est-à-dire qui partagent le même processeur et exécutent le même jeu d'instructions, sont appelés une famille de microcontrôleurs. Les différents périphériques d'une même famille ont le même noyau, mais ils diffèrent par leurs capacités d'entrée/sortie et la taille de leur mémoire.

**Exemple :** Tous les microcontrôleurs de la famille 8051 (MCS51) ont une unité centrale similaire et exécutent le même jeu d'instructions. Cependant, les différents membres de la famille ont des nombres et des types de ports d'entrée/sortie différents ainsi que des types et des tailles de mémoire différents.

# Microprocesseurs et microcontrôleurs : Quelques exemples de familles I

- **La famille Atmel AVR :**

AVR est une famille de microcontrôleurs développée depuis 1996 par Atmel, acquise par Microchip Technology en 2016.

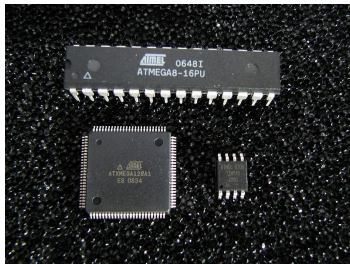


FIGURE – Atmel AVR

- Architecture processeur :  
Harvard (modifiée) ;
- Jeu d'instructions : RISC (8 bits).

# Microprocesseurs et microcontrôleurs : Quelques exemples de familles II

- **La famille ARM Cortex-M :**

Cortex-M est une famille de processeur développée par ARM Ltd, servant à la fois de microprocesseur et de microcontrôleur à destination de l'embarqué.

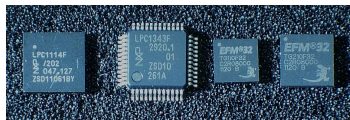


FIGURE – ARM Cortex-M

- Architecture processeur : ARM (propriétaire) ;
- Jeu d'instructions : RISC (32 bits).

Une distinction est également faite entre la famille Cortex-A destinée au marché des smartphones et des tablettes tactiles et la famille Cortex-R destinée au temps réel.

# Microprocesseurs et microcontrôleurs : Quelques exemples de familles III

- **La famille PIC :**

PICmicro est une famille de microcontrôleurs de la société Microchip.

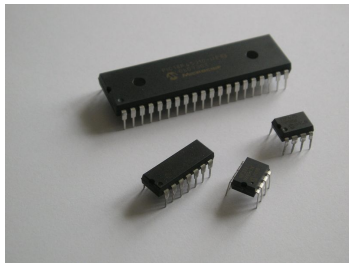


FIGURE – Microcontrôleur PIC

- Architecture processeur :  
Harvard ;
- Jeu d'instructions : RISC (8, 16 et 32 bits).

- 1 Caractérisation
- 2 Les exigences génériques
- 3 Composants d'un microcontrôleur
- 4 Structure de la mémoire : Architectures Von Neumann et Harvard
- 5 Architectures de microprocesseurs : CISC et RISC
- 6 Famille de microcontrôleurs
- 7 Résumé**

# Microprocesseurs et microcontrôleurs : Résumé

- Un micro-ordinateur se compose essentiellement de trois blocs de base, à savoir le bloc CPU, le bloc mémoire et le bloc d'entrée/sortie ;
- Les microcontrôleurs ont essentiellement un processeur, une mémoire et des ressources d'entrée/sortie dans une seule puce ;
- Il existe deux modèles principaux pour la structure de la mémoire : Von Neumann et Harvard ;
- Il existe également deux architectures fondamentales de microprocesseurs développées pour permettre une compilation efficace des programmes : RISC et CISC ;
- Les microcontrôleurs d'une même famille ont le même noyau, mais les capacités d'entrée/sortie et la taille de leur mémoire peuvent être différentes.

# Thanks



## 1. Un microprocesseur :

---

- (a) nécessite du carburant, de l'eau et de l'électricité.
- (b) est abrégé en  $\mu\text{c}$ .
- (c) est souvent encapsulé dans du plastique.



## 2. Un système doit comprendre :

---

- (a) une entrée, une sortie et un processus.
- (b) quelque chose à voir avec une forme de transport.
- (c) un microprocesseur.
- (d) carburant, eau et électricité.

## 3. Tous les systèmes génèrent :

- (a) un mouvement.
- (b) des puces.
- (c) chaleur perdue.
- (d) les gaz résiduaire.

## 4. Les circuits intégrés ne sont pas :

- (a) appelés chips.
- (b) utilisé pour construire un système basé sur un microprocesseur.
- (c) circuits à semi-conducteurs.
- (d) une partie essentielle d'un moteur.

## Réponses :

---

1 c)

2 a)

3 c)

4 d)

# Systèmes embarqués

## Architecture et familles de microcontrôleur



Pape Abdoulaye BARRO, PhD  
UFR des Sciences et technologies  
Département Informatique

5 décembre 2023