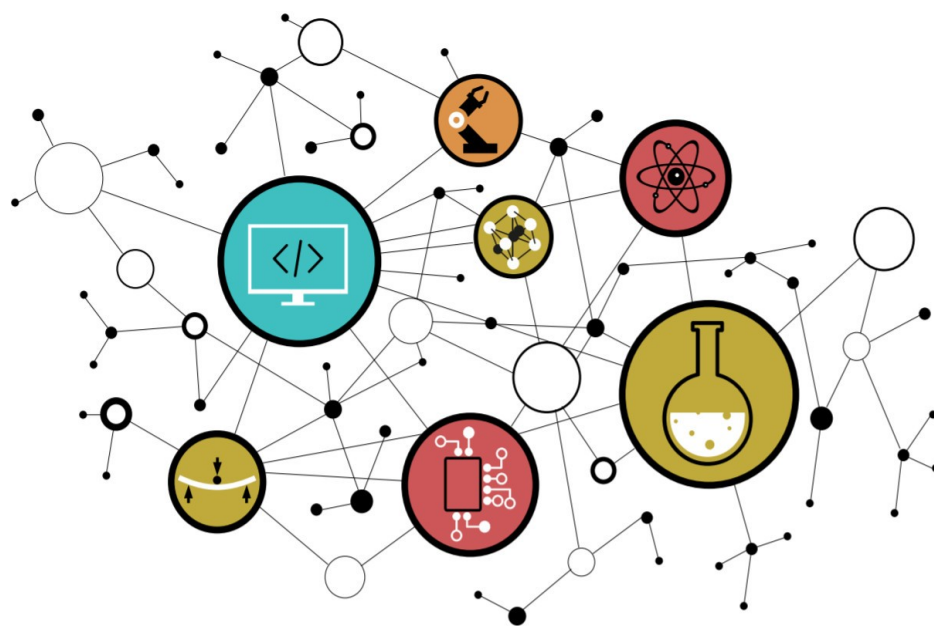
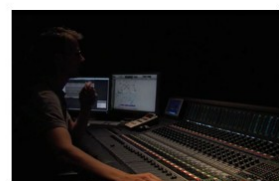
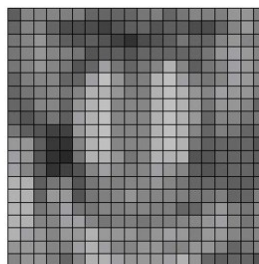
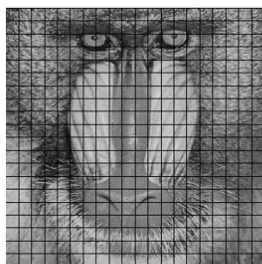
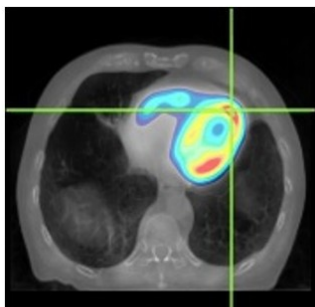


SYSTÈMES TEMPS RÉEL

COURS



CONTACTS



Équipe enseignante

hugo descoubes
hugo.descoubes@ensicaen.fr
+33 (0)2 31 45 27 61

Dimitri Boudier
dimitri.boudier@ensicaen.fr

ENSICAEN
6 boulevard Maréchal Juin
CS 45053
14050 CAEN cedex 04

RESSOURCES ET OUTILS DE
DEVELOPPEMENT

Les différentes ressources numériques sont accessibles sur la plateforme pédagogique de l'ENSICAEN. Télécharger l'archive complète de travail **rts.zip**

<https://foad.ensicaen.fr/course/view.php?id=118>

ÉVALUATION



L'enseignement comportera 2 évaluations distinctes. Une évaluation sur table et une évaluation pratique. Voici le détail des points sur lesquels vous serez évalués :

ÉVALUATION THEORIQUE

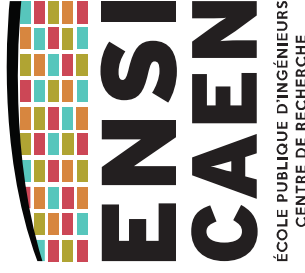
- **SAVOIR – 7pts** : Questions de culture générale pouvant traiter sur tout point abordé en séance de cours présentiel ou présent dans le support de travail. *Connaissances fondamentales et culture scientifique de l'ingénieur électronicien autour des systèmes temps réel*
- **ANALYSER – 13pts** : Exercice d'analyse d'une application simple portée sur une technologie de système temps réel non vu en enseignement. *Évaluation des capacités de l'élève ingénieur à adapter les concepts étudiés en enseignement sur de nouvelles technologies*

ÉVALUATION PRATIQUE

- **DEVELOPPER – 20pts** : Réalisation d'un projet simple imposant des contraintes temps réel sous FreeRTOS, technologie étudiée en enseignement

Systèmes Temps-Réel

2A Électronique Communicante et
Systèmes Embarqués



SYSTÈMES TEMPS-RÉEL

Objectifs de l'enseignement

Connaissances

- Comprendre les services fondamentaux proposés par un système d'exploitation
- Comprendre les contraintes liées au temps-réel
- Comprendre le rôle d'un ordonnanceur
- Comprendre les contraintes liées au développement d'un RTOS
- Comprendre et utiliser les services proposés par un RTOS

Savoir-faire

- Maîtriser les services et outils logiciels proposés par une solution du marché
- Représenter et comprendre des besoins avec des schémas représentant les outils du RTOS
- Concevoir une application logicielle embarquée portée sur RTOS



SYSTÈMES TEMPS-RÉEL

Plan de la matière



Cours (5h CM, D. Boudier)

- Introduction
- Mécanismes des Systèmes d'Exploitation Temps-Réel
- Programmation des RTOS : Application à FreeRTOS
- Tour d'horizon des algorithmes d'ordonnancement
- Choisir son Système d'Exploitation Temps-Réel
- Contenu bonus

TP (15h TP, D. Boudier & O. Assou)

- FreeRTOS en mode coopératif
- FreeRTOS en mode préemptif
- Outils de FreeRTOS

3

SYSTÈMES TEMPS-RÉEL

Évaluation



Examen écrit 1h30

- Questions générales pouvant porter sur n'importe quel aspect vu en cours/TP
- Analyse d'une solution technique (processeur et RTOS inconnu) → Voir exemples fournis
- Concevoir un modèle logiciel générique à partir d'un cahier des charges

Examen pratique 1h30

- Implémenter une solution logicielle à partir d'un cahier des charges
- Utilisation de FreeRTOS sur STM32

4

Le système d'exploitation temps-réel utilisé en TP (et en guise d'exemple sur les diapos de cours) est [FreeRTOS](#).

Il s'agit d'un RTOS très populaire, facilement modulable aux besoins, adaptés aux petits systèmes (le binaire du noyau fait entre 4 KB et 9 KB) et portable sur près de 40 architectures différentes.

Distribué sous licence MIT, il est donc libre et open-source.



Bêta-testeurs uniquement :

Nous porterons le RTOS sur un processeur du concepteur ARM issu de la famille Cortex-M.

Plus précisément, nous utiliserons un MCU STM32L073RZ conçu par STMicroelectronics, et se basant sur un cœur ARM Cortex-M0+.

Cette solution est disponible sur une carte d'évaluation de la gamme Nucleo-64.

Carte Nucleo: Nucleo-L073RZ

MCU: STM32L073RZT6U

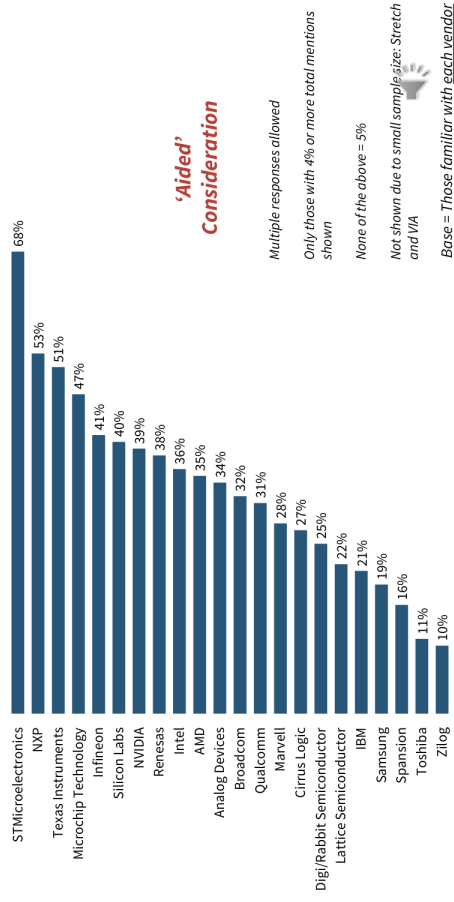
IDE: STM32CubeIDE



Future consideration of MPU/MCU vendors

STMicro, NXP, TI, and Microchip are the most efficient at converting familiarity into consideration for their processor solutions

The Current State of Embedded Development
May 2023 - Embedded survey, Aspencore



**'Aided'
Consideration**

Multiple responses allowed

Only those with 4% or more total mentions shown

None of the above = 5%

Not shown due to small sample size: Stretch and VIA

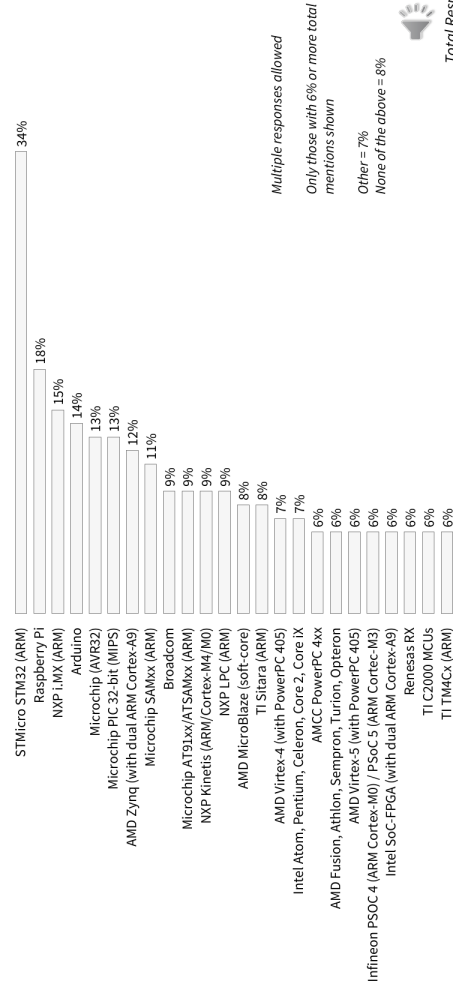
Base = Those familiar with each vendor



Future consideration of 32-bit processor families

STMicro's STM32 is most widely considered, followed by Raspberry Pi, NXP's i.MX, Arduino and Microchip's AVR32

The Current State of Embedded Development
May 2023 - Embedded survey, Aspencore



Multiple responses allowed

Only those with 6% or more total mentions shown

Other = 7%

None of the above = 8%



Total Respondents

Toutes les ressources se trouvent sur Moodle, en accès libre :

 <https://foad.ensicaen.fr/course/view.php?id=840>

Vous y trouverez :

- Le support de cours en PDF
- L'archive de TP (sujet, fichiers sources)
- Les outils à installer pour travailler sur votre ordinateur

Sources

- Introduction aux systèmes temps réel, C. Bonnet, I. Demeure, HERMES Sciences Publications, 1999. ISBN 2-7462-0016-3
- Systèmes d'exploitation 3ème ed., A. Tanenbaum, Edition Pearson Education. ISBN 978-2-7440-7299-4
- OSDev.org, http://wiki.osdev.org/Main_Page
- The Definitive Guide to the ARM Cortex-M0, J. Yiu, Newnes editions, 2011. ISBN 978-0-12-385477-3
- Systèmes d'exploitation temps réel, G. Frey, cours EnsiCaen 3A info/instru, 2013.
- Systèmes temps-réels, R. Demoment, NXP Semiconducteurs, 14460 Colombelles, 2010.
- An analysis and description of the inner workings of the FreeRTOS kernel, R. Goyette, Carleton University, 2007.
- Selecting an embedded Operating System, Colin Walls, Technical Marketing Manager, Mentor Embedded, webinars MentorGraphics, 2013.
- 2019 Embedded Markets Study, EETimes, embedded, AspenCore, 2019.
- Site de FreeRTOS, une mine d'or : <https://www.freertos.org/>

Un grand merci à Basile Dufay, Maître de Conférences à l'ESIX, pour le partage de ses sources de CM RTOS !

SYSTÈMES D'EXPLOITATION OPERATING SYSTEM (OS)



Définition
Historique
Marchés



SYSTÈMES D'EXPLOITATION / OPERATING SYSTEM (OS)



Définition

Un **système d'exploitation** ou **Operating System (OS)** est un logiciel qui pilote un système informatique en contrôlant ses ressources.

Cela inclut :

- Gestion des fichiers (si existence d'un *File System*) : organisation, implantation
- Gestion de la mémoire : par exemple, gestion de l'unité de contrôle de la mémoire (MMU)
- Gestion de la sécurité et des politiques d'accès : multi-utilisateurs, multi-tâches
- Gestion des processus : création, planification, coopération, dépendance, ...

En revanche, un OS n'est pas :

- Un logiciel applicatif (traitement de texte, compilateur, navigateur Web, ...)
- Une interface graphique (GUI, CLI)

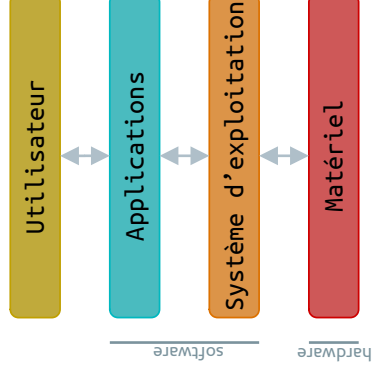
On peut considérer l'OS comme étant un intermédiaire entre les applications logicielles et les ressources matérielles de la machine sur laquelle il fonctionne.

Un OS peut être vu comme un gestionnaire de ressources :

Gestion des ressources matérielles (CPU, mémoire de masse ou de travail, périphériques, ...) pour les attribuer de manière optimale entre les différents processus qui les demandent.

Il peut aussi être vu comme une couche d'abstraction :

Il masque les mécanismes de fonctionnement de la machine dans le but de présenter une interface simple au développeur.



- Années 40 et 50 : pas d'OS, les systèmes sont mono-tâche et mono-utilisateur
- Années 60 : le MIT crée le premier OS, Multics. Il est multi-programmes, multi-utilisateurs
- Années 70 : UNIX développé par Thompson et Ritchie (Bell Labs), OS pour lequel le C est créé (Kernighan et Ritchie)



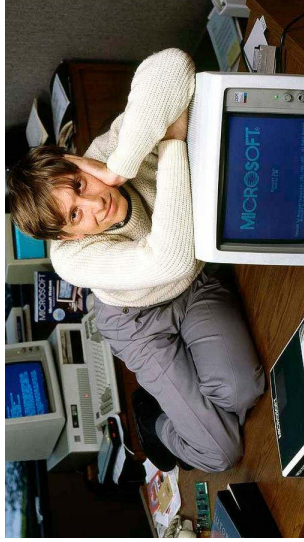
Ken Thompson et Dennis Ritchie.



Brian Kernighan,
Hommage à D. Ritchie en 2012 (Bell Labs).

Historique

- Années 80 : IBM et Microsoft fondent le MS-DOS
- En parallèle : Xerox et Steve Jobs développent Xerox Star, abandonné puis réadapté pour Macintosh



Bill Gates



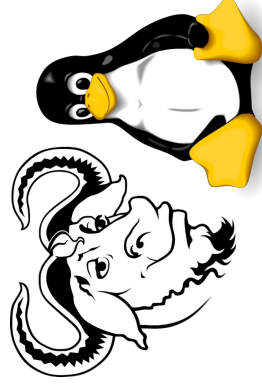
Steve Jobs

Historique

- 1983 : Stallman (MIT) crée GNU. 1^{er} sous licence libre (la GNU GPL) mais c'est un OS sans noyau
- 1991 : Torvalds développe le noyau Linux (licence GPL)
- 1994 : GNU et Linux s'associent pour donner naissance au premier OS 100 % libre : GNU/Linux



Richard Matthew Stallman

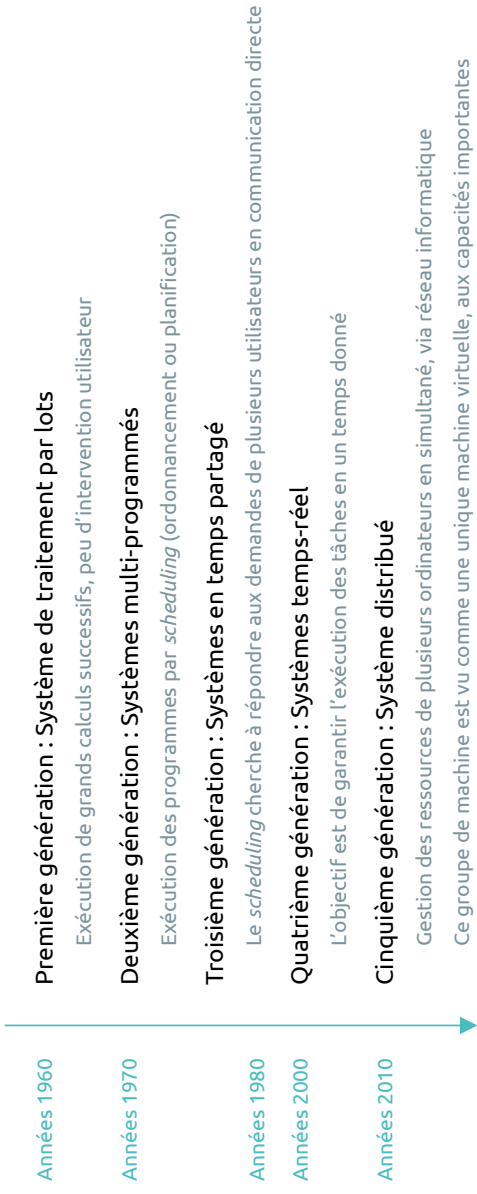


Logos GNU et Linux



Linus Torvalds

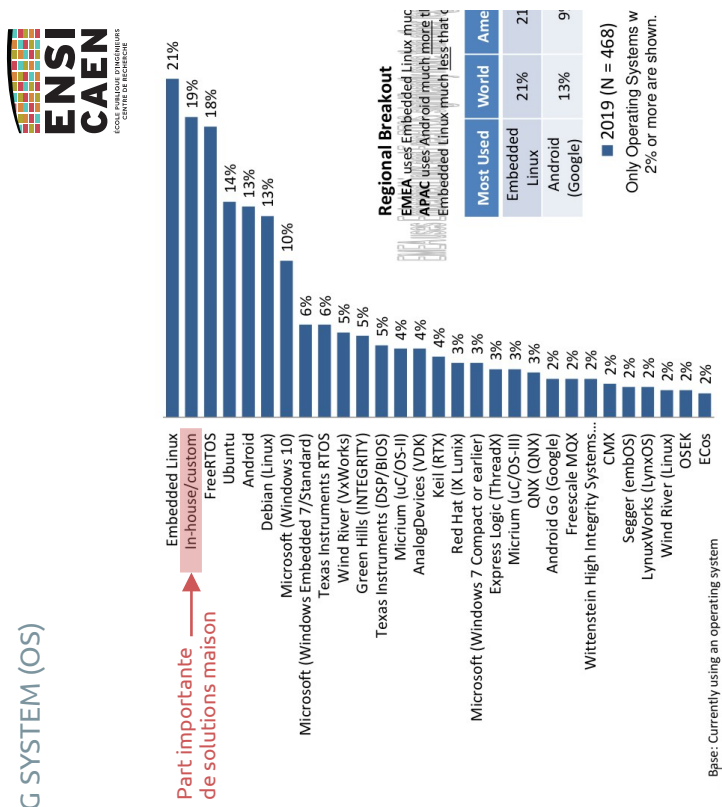
Évolutions technologiques



Part de marché des OS pour l'embarqué

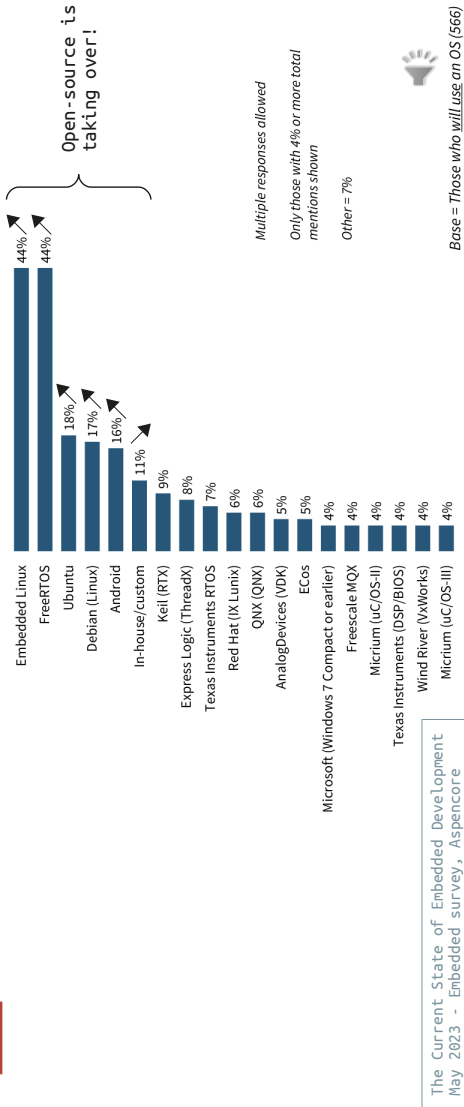
Source :
2019 Embedded Markets Study
*Integrating IoT and Advanced Technology Designs,
Application Development & Processing Environments
March 2019*

Presented by : EETimes, embedded
© 2019 AspenCore All Rights Reserved



Most popular embedded OSs – Embedded Linux, FreeRTOS and Ubuntu

Top 3 OSs are especially popular in APAC, while Embedded Linux is used more in the Americas

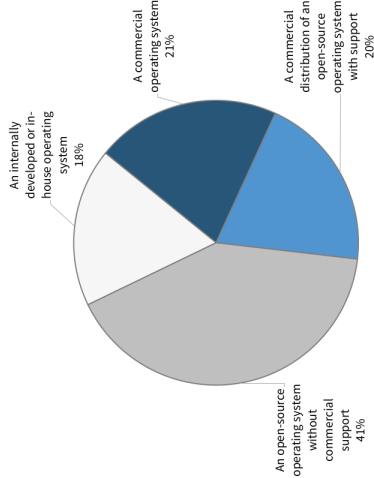


Most embedded projects utilize an operating system

Although open source is popular, four in ten use either commercial OS or open-source OS distributed commercially

74% use an OS in current embedded project

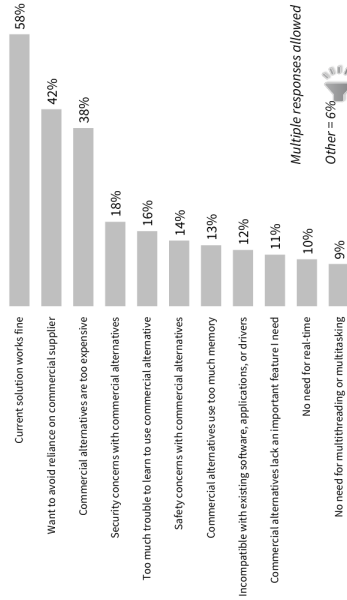
OS Used in Current Embedded Project



Total Respondents

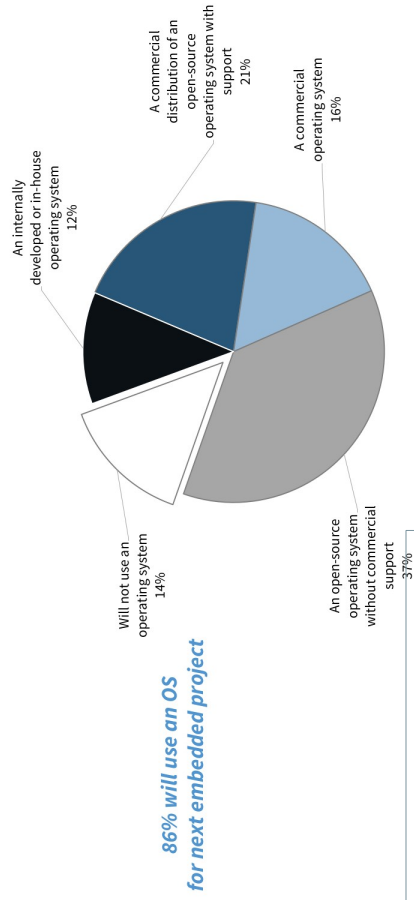
Base = Those not using commercial OS (284)

Reasons for not using commercial OS



OS use will increase, but open-source share will grow

Nearly 30% of those now using commercial OS are considering open-source alternatives



Total Respondents

The Current State of Embedded Development
May 2023 - Embedded survey, Aspencore

embedded
survey

33. My next embedded project will likely use:

ASPENCORE | 22

RÉALISER UN SYSTÈME MULTI-TÂCHES POUR L'EMBARQUÉ



RÉALISER UN SYSTÈME MULTI-TÂCHES POUR L'EMBARQUÉ

De l'utilité des tâches



Pourquoi ajouter un OS et complexifier une solution quand on peut programmer des micro-contrôleurs avec un simple programme ?

→ Certains systèmes doivent être capables de gérer plusieurs tâches simultanément

Ces systèmes sont nommés « **systèmes multi-tâches** ».

Dans un tel système, les tâches exécutées peuvent être **indépendantes**, **coopérantes** (échanges d'informations) ou aussi en **compétition** (besoin de synchronisation).

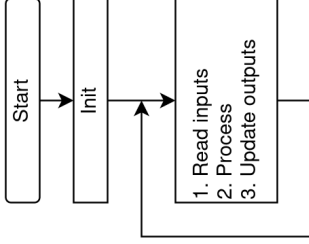
Ces tâches peuvent être créées **statiquement** (au démarrage du système) ou **dynamiquement** (création et destruction à la volée).

Toutes ces caractéristiques sont difficilement gérables avec un simple programme séquentiel.

Cas le plus simple : traitement séquentiel

Les entrées (ex : ADC) sont toujours à jour (valides).

→ Le programme sait quand il doit interroger les E/S



On complique un peu

Les entrées ne sont pas forcément à jour.

→ Comment le programme peut-il savoir quand démarrer un traitement ?

→ Le programme doit-il respecter des échéances ?

On complique encore plus

Plusieurs événements peuvent se produire indépendamment et n'importe quand

→ Comment partager le CPU entre les différents traitements liés à chaque événement ?

→ Analysons donc différentes stratégies de gestion des tâches.

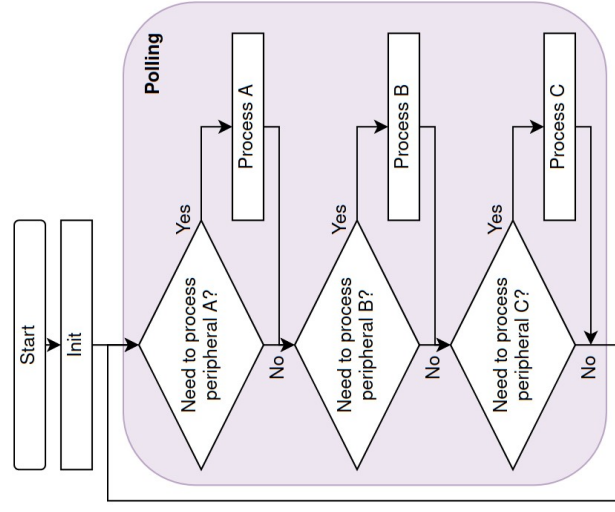
Scrutation cyclique (*polling*)

Avantages

- Simple à mettre en œuvre
- Temps de réaction facile à déterminer (temps au pire cas)

Inconvénients

- Beaucoup de périphériques = temps de réaction qui augmente et fréquence de scrutation qui diminue
- Scrutation effectuée par le CPU même si aucun traitement requis
- Peu évolutif



RÉALISER UN SYSTÈME MULTI-TÂCHES POUR L'EMBARQUÉ

Stratégies de gestion des événements

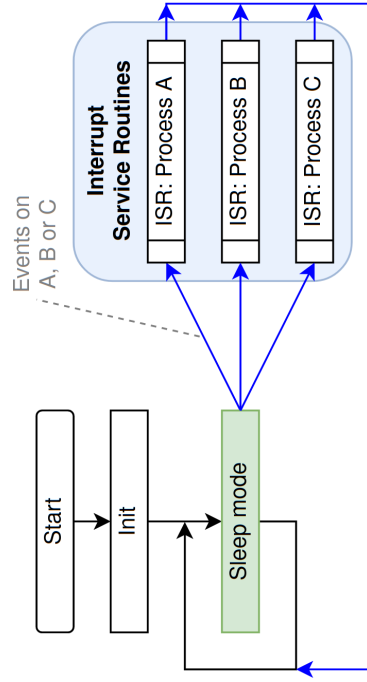
Gestion par interruptions

Avantages

- Temps de réaction réduit par rapport au *polling*
- CPU en *Sleep mode*

Inconvénients

- Beaucoup de périphériques
= temps passé dans les ISR qui augmente
= risque de manquer un événement
- Peu évolutif



29

RÉALISER UN SYSTÈME MULTI-TÂCHES POUR L'EMBARQUÉ

Stratégies de gestion des événements

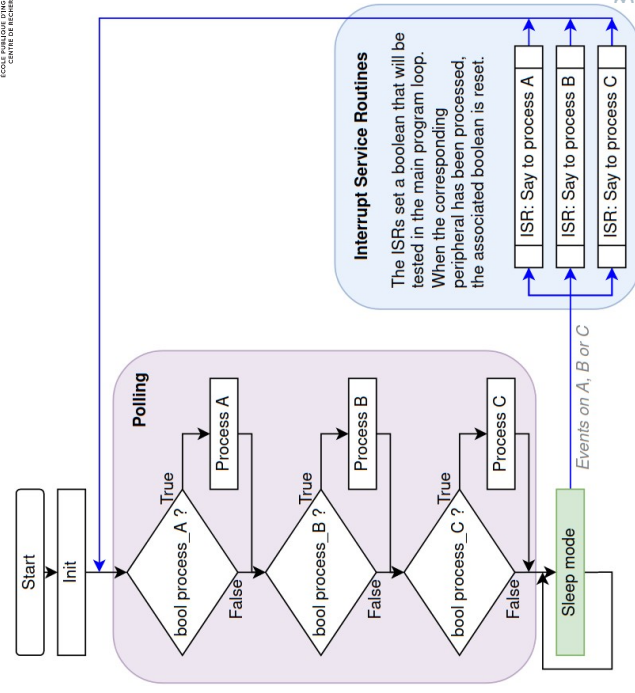
Combinaison *polling* + interruptions

Avantages

- Moins de temps dans les ISR → IRQ de faible priorité servies plus facilement
- CPU en *Sleep mode*

Inconvénients

- Beaucoup de périphériques
= temps de réaction qui augmente
= risque de traiter trop tard
- Très peu évolutif



30

RÉALISER UN SYSTÈME MULTI-TÂCHES POUR L'EMBARQUÉ

Stratégies de gestion des événements

Séquenceur (*Offline scheduler*)

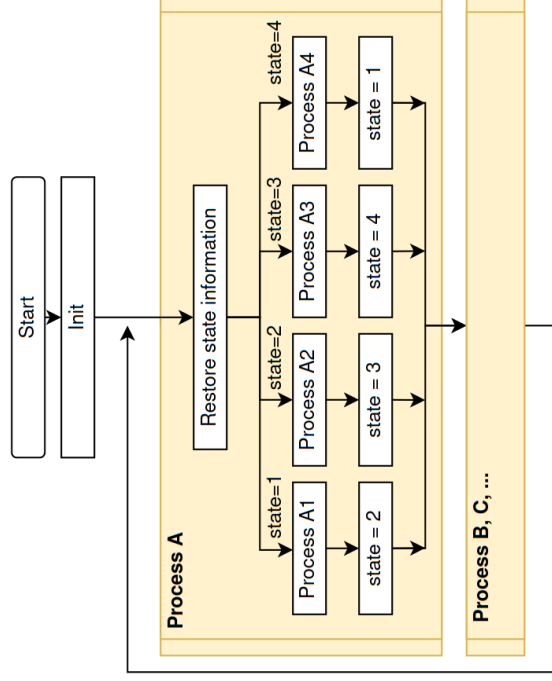
Aussi appelé *Round Robin*

Avantages

- Meilleure réactivité

Inconvénients

- Si application trop complexe, impossible de fragmenter les processus à la main
- Très peu évolutif (tout re-partitionner pour intégrer un nouveau périphérique ?)



31

RÉALISER UN SYSTÈME MULTI-TÂCHES POUR L'EMBARQUÉ

Stratégies de gestion des événements

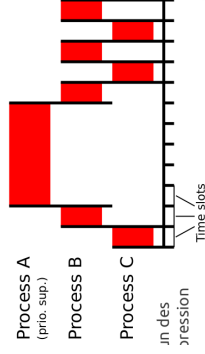
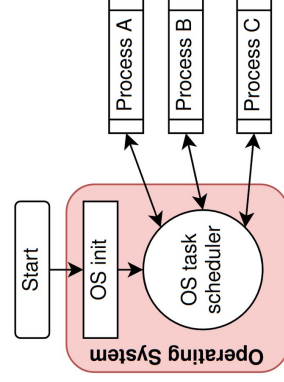
Système d'exploitation temps-réel

Avantages

- Programmation multi-tâches
- Simplicité d'utilisation
- Échéance garantie *a priori*

Inconvénients

- Surconsommation des ressources matérielles (CPU, mémoires données et programme)



Le temps CPU est découpé en tranches (*slots*) allouées à chacun des processus (en fonction de leur priorité éventuelle).

32

VOCABULAIRE



VOCABULAIRE

Système temps-réel = système déterministe

Définition : **temps-réel**

Les systèmes informatiques temps réel se différencient des autres systèmes informatiques par la prise en compte de **contraintes temporelles** dont le respect est aussi important que l'**exactitude du résultat**, autrement dit le système ne doit pas simplement délivrer des résultats exacts, il doit les délivrer dans des délais imposés.

« Système temps réel », Wikipedia

→ La spécificité d'un système temps-réel est donc de respecter des contraintes temporelles.

Définition : **déterminisme**

→ Le **déterminisme** est la caractéristique fondamentale des systèmes temps-réels.

Déterminisme logique : les mêmes données en entrée d'un même système produisent les mêmes résultats.

Déterminisme temporel : le systèmes doit respecter des contraintes temporelles (échéances).

Pour qualifier un système de « temps-réel », il faut prouver qu'il respecte toutes les contraintes.

VOCABULAIRE

Interaction des tâches

Définition : concurrence

Un système peut avoir à gérer des événements et/ou des activités simultanément. Ces événements et activités sont dites « en concurrence ».

Attention : on parle parfois de traitement parallèle, mais pour les RTOS il ne s'agit très généralement pas d'une réalité physique.

Définition : préemption

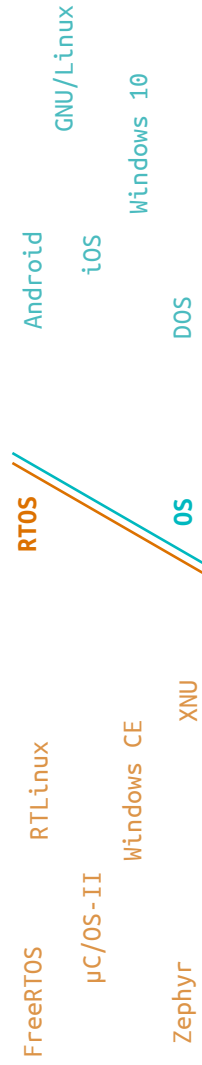
Il s'agit de la capacité du système d'interrompre une tâche en cours au profit d'une autre.

Ce concept est déjà connu dans les micro-contrôleurs sans OS : il s'agit du mécanisme d'interruption.

VOCABULAIRE

RTOS vs OS

Un système d'exploitation temps réel (*Real-Time Operating System*, RTOS) a pour objectif principal optimiser ses temps de réponse. Il doit permettre au développeur de prédire son comportement et ses temps de réponse, notamment en fournissant des outils adaptés.



Un système d'exploitation non temps-réel (OS grand public) a pour objectif principal de procurer un confort d'utilisation, par exemple en garantissant une certaine réactivité vis-à-vis de l'utilisateur ou en lui proposant un large catalogue de fonctionnalités.

VOCABULAIRE

À adapter selon le contexte !

Applications

Exemples : Automobile, médical, aéronautique, spatial, ...

Exemples : Lave-linge, machine à café, domotique, ...

→ La criticité des contraintes temporelles dépend de l'application visée !



Ces systèmes peuvent devoir gérer des événements et/ou des activités en **concurrence**.
De plus, certaines activités peuvent avoir une criticité plus grande que d'autres.
Certaines tâches seront donc prioritaires et feront en sorte que le système **préempte** l'exécution des tâches de plus faible priorité ;

VOCABULAIRE

Le temps-réel

Temps-réel strict

Un dépassement des contraintes temporelles (réponse trop tardive) est critique, voire catastrophique et entraîne la faute du système.

Ex. : Pilotage automatique d'avion, contrôle d'un réacteur de centrale nucléaire, EPS de voiture, ...

Temps-réel souple

Un dépassement des contraintes temporelles n'est pas critique, mais peut tout de même rendre le système inutilisable. Un dépassement exceptionnel est toléré et pourra être compensé à court terme.

Ex. : visioconférence, machine à café, ...

Temps-réel ferme

Souple pour les fonctionnalités non-critiques du système, dur sinon.

Ex. : dans une voiture, la commande d'injection est critique mais pas le guidage par GPS.

Strict, souple ou ferme ...

→ **Le système est catégorisé selon la tolérance accordée à la non-réponse, pas selon son temps de réponse !**

Autrement dit, la question à se poser n'est pas « répond-il à temps ? » mais « à quel point le retard est-il grave ? »

→ Un système peut contenir des sous-systèmes, chacun ayant ses propres contraintes temps-réel.

Attention aux amalgames !

~~— Système temps-réel = système rapide —~~

→ Le temps-réel garanti que le système est déterministe (répondra en un temps connu).

~~— Programmation temps-réel = assembleur —~~

→ La programmation se fait généralement en C (ou dérivés).

~~— Augmentation de la vitesse des processeurs = diminution des problèmes temps-réel —~~

→ Cf premier point, la vitesse ne garanti pas le déterminisme d'un système.

→ Si on prend un OS classique sous prétexte qu'on dispose d'un processeur plus performant, toutes les fonctionnalités non maîtrisées de l'OS rendent le système non-déterministe.

MÉCANISMES DES SYSTÈMES D'EXPLOITATION TEMPS-RÉEL

Caractéristiques des RTOS
Ordonnancement / *Scheduling*
Synchronisation et Communication
Mutex
Sémaphore
Queue de messages

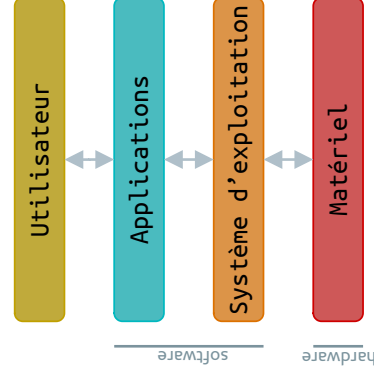


MÉCANISMES DES SYSTÈMES D'EXPLOITATION TEMPS-RÉEL

Caractéristiques des RTOS

Un RTOS doit fournir plusieurs services

- Garantie de performances temporelles
 - temps de réponse, temps de préemption, ...
 - Facilité d'accès aux ressources physiques
 - temps CPU, mémoire, périphériques, ...
 - Simplicité de développement
- ... malgré ses contraintes
- Capacités limitées
 - puissance de calcul, stockage mémoire, ...
 - Gestion de l'énergie
 - consommation/autonomie, échauffement
 - Portabilité
 - sur différents processeurs et/ou couches systèmes



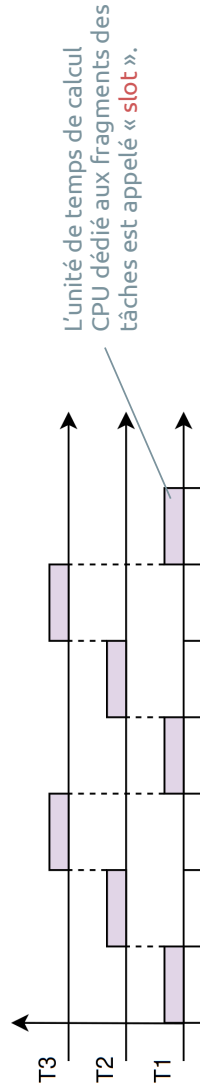
Les contraintes temps-réel doivent être maîtrisées

- Prédictibilité → choix de l'architecture hard+soft (cache ?, archi CPU ?, protocoles de comm. ?)
→ *aspect abordé à travers d'autres enseignements (SE, archi //, archi calcul, ...)*
- Respect des échéances → **ordonnancement**
- Compétition des tâches → **mécanismes de synchronisation** (synchrone, asynchrone)
- Coopération des tâches → **mécanismes de communication** (sémaphore, mutex, queue de messages)

43

Un OS multi-tâche doit permettre l'exécution de plusieurs tâches en simultané (en apparence tout du moins).

À l'échelle du processeur, les tâches sont exécutées par fragments temporels, de façon séquentielle :



L'OS est capable de basculer de l'exécution d'une tâche vers une autre. Mais quelle tâche choisir ?

→ Choisir la tâche à exécuter est le rôle de l'**ordonnanceur** (***scheduler***).

→ L'ordonnanceur est la partie fondamentale des OS multi-tâches.

44

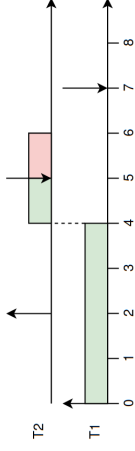
L'ordonnanceur se caractérise par sa politique d'ordonnancement, c-à-d sa méthode de construction de l'emploi du temps du CPU.

Exemple de tâches à gérer :

Tâche	Arrivée	Temps d'exéc.	Échéance
T1	0	4	7
T2	2	2	5

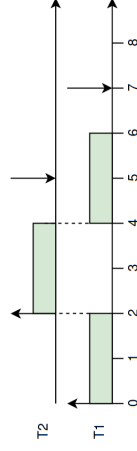
- Politique 1 :

Premier servi = premier arrivé, sans préemption



- Politique 2 :

Premier servi = le plus prioritaire, avec préemption



Remarque 1 : il s'agit ici clairement d'un problème d'ordonnancement. Changer le CPU ou optimiser le code ne servirait à rien.

Remarque 2 : si la somme des temps d'exécution est supérieure aux échéances, il s'agit alors d'un problème de ressources et non d'ordonnancement.

Suivant l'instant où l'emploi du temps CPU est décidé, un ordonnanceur peut être classifiée en deux groupes :

Offline

La séquence d'exécution est calculée (et programmée) avant l'exécution effective.

L'ordonnanceur est en réalité un simple séquenceur (ce n'est pas multi-tâches).

→ Pratique pour un faible nombre de tâches connues et périodiques.

Online

Les décisions d'ordonnancement sont prises pendant l'exécution.

→ besoin d'une politique d'ordonnancement (gérée par un algorithme).

Ces ordonnanceurs sont ensuite classifiés en deux groupes : **préemptif** et **non-préemptif**.

Exemple : ordonnanceur offline (séquenceur)

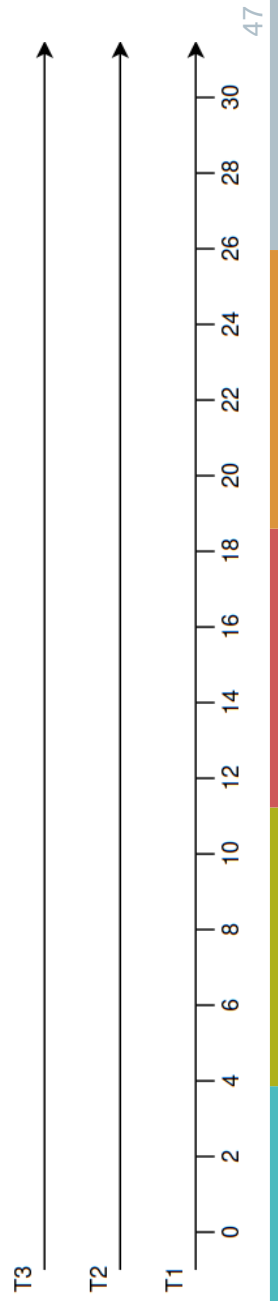
Tâche	Temps d'exécution	Périodicité
T1	2	10
T2	4	15
T3	2	6

L'unité de temps est le temps de cycle CPU.

→ *Time slot* : plus grand diviseur commun des temps d'exécution = ____

→ Cycle majeur : plus petit multiple commun des périodes = ____

Construisons le chronogramme :



Bilan : ordonnanceur offline (séquenceur)

Avantages :

Programmation simple

Ultra-déterministe (la séquence est programmée à la compilation, et non pas gérée à l'exécution=

Très adapté si peu de tâches

Inconvénients :

Il faut tout calculer à l'avance pour programmer correctement

Construction difficile pour tâches nombreuses

Peu évolutif (tout casser pour ajouter une tâche)

Ordonnancement **non-préemptif** (ou coopératif)

La tâche courante continue de s'exécuter **tant qu'elle ne rend pas la main explicitement** (via appel système).

Les interruptions ne peuvent pas modifier la configuration d'exécution des tâches !



- + Très simple à implémenter → permet le multi-tâches sur de petits MCU.
- Temps-réel mal maîtrisé ;
- Une tâche mal programmée risque de garder la main durant une longue période ;
- Les tâches ne peuvent pas être synchronisées avec les interruptions.

Ordonnancement **préemptif**

Le système a la possibilité d'**interrompre la tâche en cours** afin de forcer un ré-ordonnancement.

En général, un *timer* est démarré afin de forcer périodiquement un ré-ordonnancement (« **tick** »).



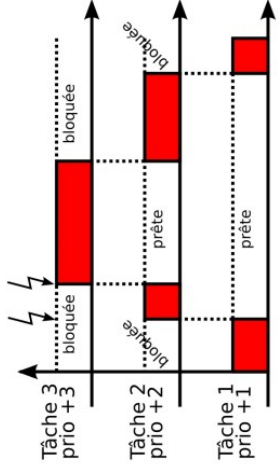
- + Respect des priorité des tâches ;
- + Aspects temps-réel mieux maîtrisés ;
- + Tâches implémentées sans ce souci du ré-ordonnancement.
- Plus complexes à implémenter.

Exemples de politiques d'ordonnancement

Par priorité, sans partage de temps

La priorité est le critère absolu de décision. Une tâche de priorité inférieure à la tâche active ne pourra être exécutée que lorsque cette dernière passera à l'état bloqué ou se terminera.

→ Problème : que se passe-t-il si deux tâches ont la même priorité ?

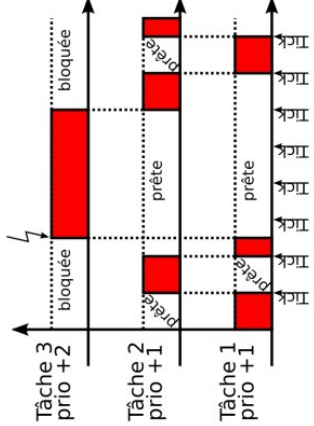


Par priorité, avec partage de temps

Partage de temps équitable entre les tâches de priorité égale : **Round Robin**.

→ Uniquement sur systèmes préemptifs.

→ C'est le plus rencontré sur les RTOS.



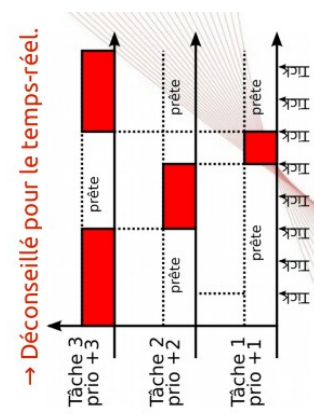
Ré-ordonnancement collaboratif

La priorité n'est plus un critère absolu. La majorité du temps CPU est donnée aux tâches les plus prioritaires, mais une petite partie est affectée aux autres tâches afin qu'elles continuent d'avancer.

→ Uniquement sur systèmes préemptifs.

→ Politiques d'ordonnancement complexes.

→ Déconseillé pour le temps-réel.



États d'une tâche

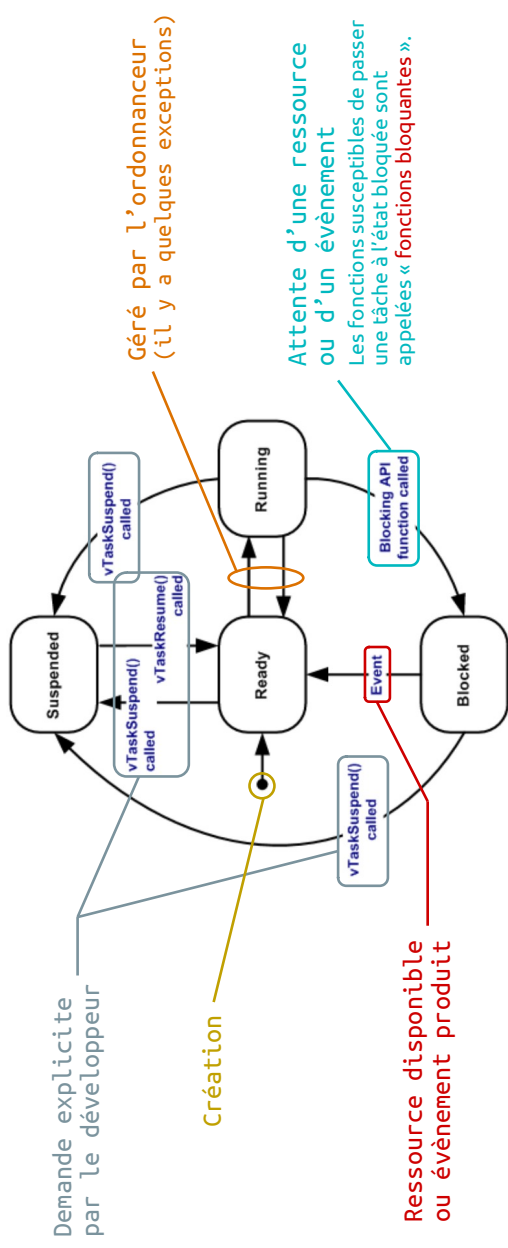
Afin d'optimiser le traitement des tâches, l'ordonnanceur va leur attribuer un **état**.

Ces états sont propres à chaque OS, même si certains états sont très communs.

Exemples avec FreeRTOS

- **Ready** : tâche prête à être exécutée
 - Quand il doit choisir quelle tâche exécuter, l'ordonnanceur choisit parmi les tâches à l'état **Ready**.
- **Running** : tâche en cours d'exécution par le CPU
 - Il y a autant de tâches à l'état **Running** qu'il y a de processeurs disponibles (généralement 1 en systèmes embarqués).
- **Blocked** : non exécutable car en attente d'une ressource externe (signal, données, message, synchro, ...)
 - L'ordonnanceur surveille ces tâches pour détecter le moment où elles repassent à l'état **Ready**.
 - Toute tâche qui n'a rien à faire doit être placée dans l'état **Blocked**.
- **Suspended** : la tâche n'est plus vue par l'ordonnanceur.

Transitions entre états avec FreeRTOS



<https://www.freertos.org/RTOS-task-states.html>

Besoins en synchronisation et communication

Le résultat des travaux d'une tâche peuvent être nécessaire pour l'exécution d'un autre tâche.

Ex. : Pour la décompression MPEG2, deux tâches distinctes décodent le son et l'image, une troisième joue le résultat synchronisé.

Des tâches peuvent se partager l'accès à des ressources (données en mémoire, accès matériels).

Ex. : Un navigateur et un client de visio ont tous les deux besoin d'accéder au périphérique réseau.

En communication

Besoin de satisfaire les contraintes d'échanges d'information entre les tâches.

En synchronisation

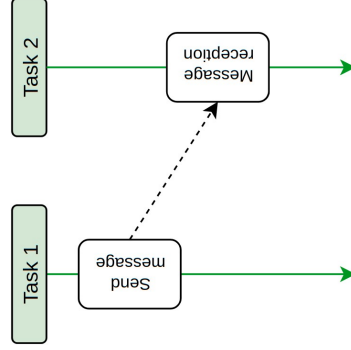
Besoin de satisfaire les contraintes sur l'entrelacement des actions de plusieurs tâches.

Besoin de résoudre les problèmes d'interférences (exclusion mutuelle → mutex)

Concepts
fortement liés

Communication : message asynchrone

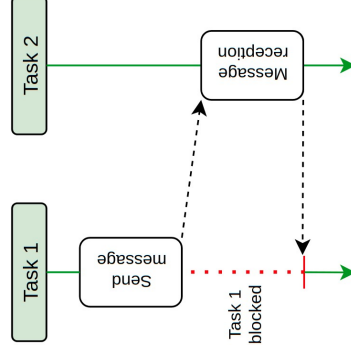
Une tâche peut poster des messages à destination d'une autre tâche, sans soucis de synchronisation.



→ Nécessite un *buffer* pour stocker les messages en attendant leur lecture.

Communication : message synchrone

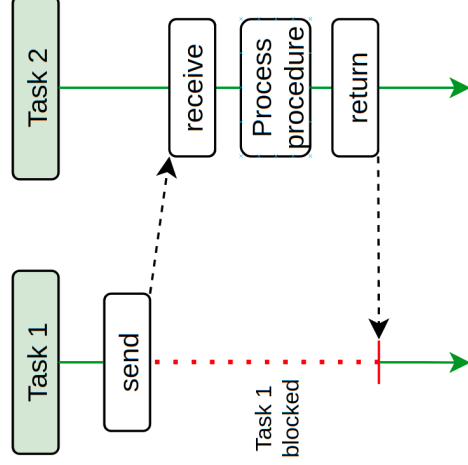
Une tâche poste des messages à destination d'une autre tâche de manière synchrone.



→ Pas besoin de *buffer*, la tâche émettrice attend que la tâche réceptrice ait reçu le message

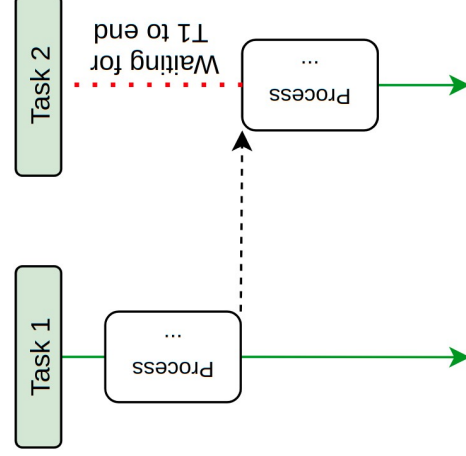
Communication : appel de procédure distant (*Remote Procedure Call, RPC*)

Une tâche appelle une autre tâche pour lui déléguer un traitement, généralement via un réseau.



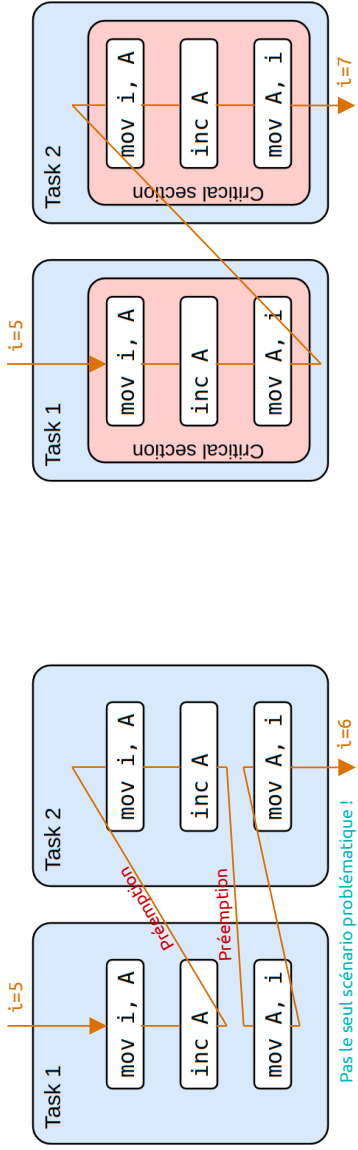
Synchronisation : attente conditionnelle

Une tâche doit attendre la fin d'une autre tâche pour exécuter son action.



Synchronisation : problème d'interférence (ressources partagées)

Ex. : deux tâches veulent incrémenter la même variable partagée i (en asm : *load, modify, store*).



→ Il faut garantir l'indivisibilité des séquences d'instructions pour les sections critiques

→ Mécanisme d'exclusion mutuelle

Synchronisation : problème d'interférence (ressources partagées)

Solution 1 : Algorithme de Peterson (1981)

```
// Task 1 main routine
while(1) {
    ...
    /* NON-CRITICAL SECTION */
    let_task1_in = true;
    task_to_exe = 2;
    while( (let_task2_in == true) && (task_to_exe == 2) ) ;
    /* START OF CRITICAL SECTION */
    ...
    /* END OF CRITICAL SECTION */
    let_task1_in = false;
    ...
}

// Task 2 main routine
while(1) {
    ...
    /* NON-CRITICAL SECTION */
    let_task2_in = true;
    task_to_exe = 1;
    while( (let_task1_in == true) && (task_to_exe == 1) ) ;
    /* START OF CRITICAL SECTION */
    ...
    /* END OF CRITICAL SECTION */
    let_task2_in = false;
    ...
}
```

En pratique, les variables `let_taskN_in` sont rassemblées sous un tableau de booléens (1 case par tâche concurrente).

Problème : Attente active, la tâche ne peut pas être bloquée !

Synchronisation : problème d'interférence (ressources partagées)

Solution 2 : instruction **atomique** test_and_set() $\Leftrightarrow$ if(b==0) {b=1 ; return 0;} else{ return 1; }

```
// Task 1 main routine
while(1) {
    ...
    /* NON-CRITICAL SECTION */
    while( test_and_set(flag) ) ;
    /* START OF CRITICAL SECTION */
    ...
    flag = 0 ;
    /* END OF CRITICAL SECTION */
    ...
}

// Task 2 main routine
while(1) {
    ...
    /* NON-CRITICAL SECTION */
    while( test_and_set(flag) ) ;
    /* START OF CRITICAL SECTION */
    ...
    flag = 0 ;
    /* END OF CRITICAL SECTION */
    ...
}
```

Instruction atomique = instruction indivisible, ne peut matériellement pas être interrompue.

→ chaque processeur a son propre lot d'instructions atomiques.

Problème : Attente active, la tâche ne peut pas être bloquée !

61

Synchronisation : problème d'interférence (ressources partagées)

Solution 3 : utiliser les outils proposés par les systèmes d'exploitation

- Queue de messages → Communication
- Sémaphore → Synchronisation
- Mutex binaire | → Partage de ressource
- Mutex à compteur

→ Permet de placer les tâches à l'état bloqué, éliminant ainsi le problème d'attente active.

62

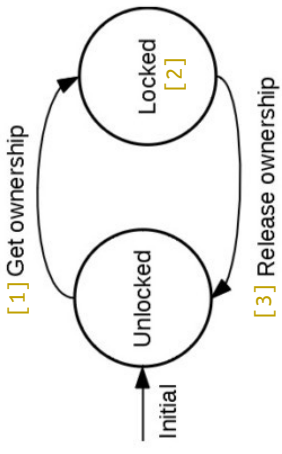
Mutex (*Mutal Exclusion*) : **mécanisme de verrouillage des ressources partagées**

Un mutex est un jeton (une clé) qui **contrôle l'accès à une ressource partagée**, ou à une section critique de code.

Avant de pouvoir accéder à la dite ressource partagée, une tâche doit d'abord obtenir ce jeton [1]. Une fois ce jeton en sa possession, elle empêche toute autre tâche d'accéder à la ressource protégée [2].

En ce sens, **la tâche devient propriétaire du mutex** : seule cette tâche peut décider de rendre le mutex [3] (et donc l'accès aux ressources partagées).

Une tâche peut se charger de créer/supprimer un mutex, peut demander à acquérir le mutex et peut le restituer.

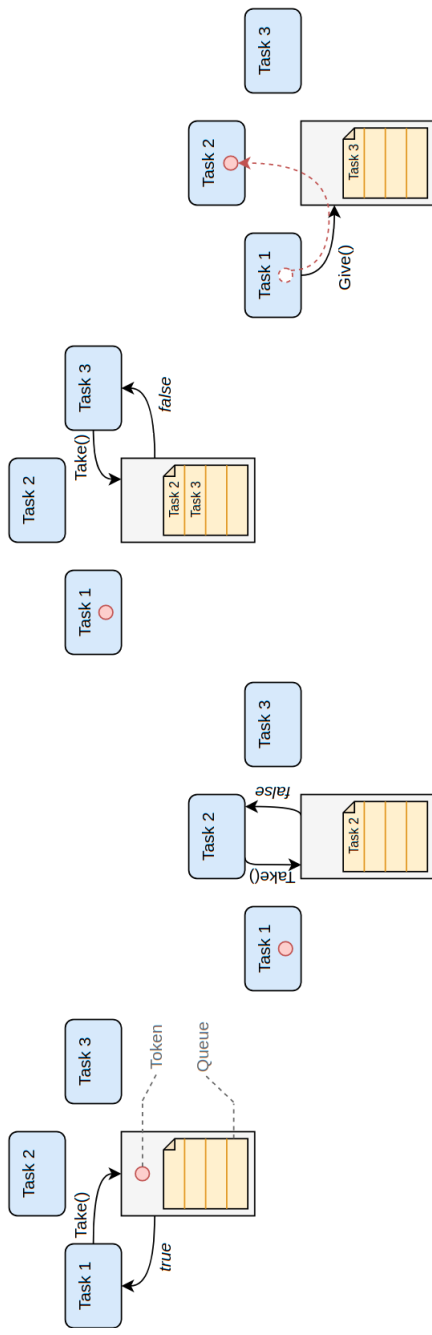


Ex. : Deux particuliers (deux tâches) veulent louer une voiture (ressource), le seul qui peut l'utiliser est celui qui a la clé (mutex). L'autre personne (tâche) doit attendre que la clé (mutex) soit remise à sa place, ce qui signifie que la voiture (la ressource) est libre.

63

Un mutex est implémenté par :

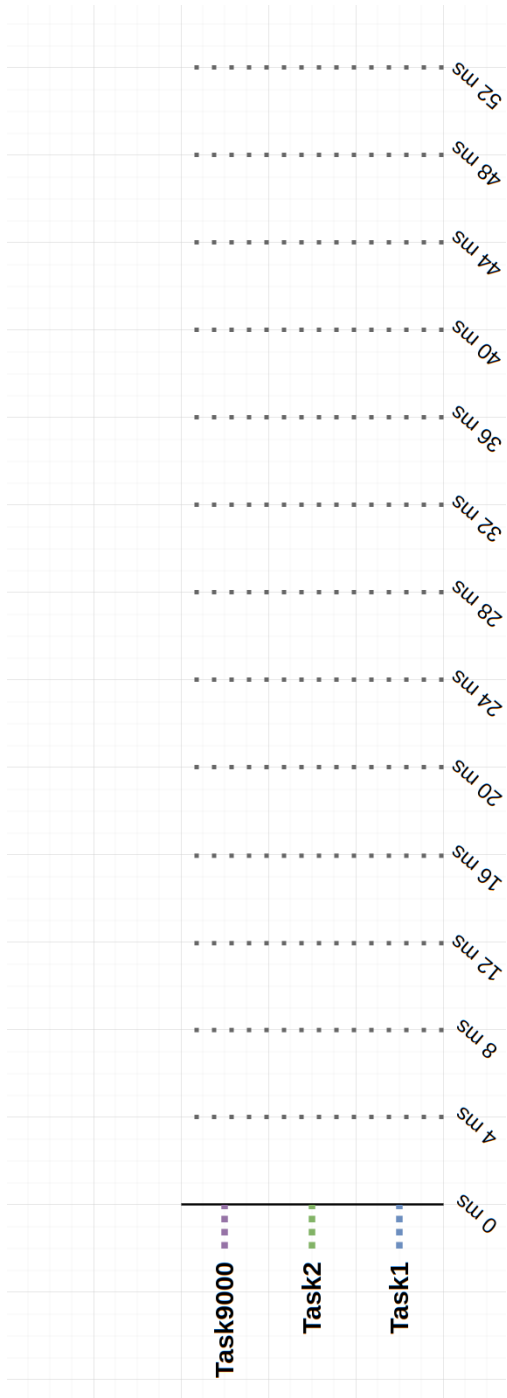
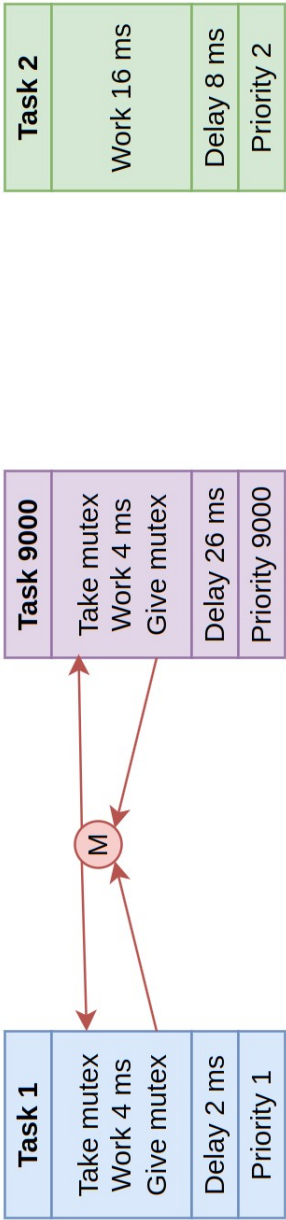
- une variable booléenne (qui indique si le mutex est libre ou non) ;
- une file d'attente : une tâche n'ayant pas obtenu l'accès au mutex se place dans le file d'attente et passe en **attente passive**.



64

Soit une application utilisant trois tâches, chacune de priorité différente. Un mutex est utilisé par deux de ces tâches.

Tracez le chronogramme en indiquant l'état des tâches à chaque instant, ainsi que les opérations de Prise et Relâche de mutex.



Phénomène d'**inversion de priorité** : une tâche prioritaire est bloquée par des tâches moins prioritaires.

Problème : inversion de priorité

Si une tâche de faible priorité est propriétaire d'un mutex et qu'une tâche de priorité haute demande ce mutex, alors la tâche de priorité haute sera bloquée tant que la tâche de priorité basse n'aura pas rendu le mutex.

Cette situation s'appelle **inversion de priorité**, puisque la tâche devient artificiellement prioritaire par rapport à l'autre.

Situation encore pire : un tâche de priorité intermédiaire peut bloquer l'exécution de la tâche de priorité faible, qui mettra encore plus de temps à rendre le mutex pour permettre l'exécution de la tâche de priorité haute.

C'est l'illustration de la diapo précédente :

Task9000 attend le mutex pris par Task1, cette dernière étant bloquée par Task2.

Solutions

Des protections internes au RTOS (plus précisément au kernel) permettent généralement d'élever temporairement la priorité de la tâche détenant le mutex, afin qu'elle le libère le plus rapidement possible.

Mécanisme d'héritage de priorité (PIP) : la tâche détenant le mutex est automatiquement mise à une priorité égale ou supérieure à n'importe quelle autre tâche demandant le même mutex. (*)

Mécanisme de plafond de priorité (PCP) : chaque tâche est créée avec une priorité et une priorité maximale atteignable. Chaque tâche qui acquiert un mutex passe à sa valeur de priorité maximale. (*)

Note : l'inversion de priorité est un phénomène indésirable.

Note : l'héritage de priorité et le plafond de priorité sont deux mécanismes pour contrer l'inversion de priorité.

(*) Ces mécanismes sont détaillés dans les diapos empruntés à *Basile Dufay, ESIX*.

Sémaphore

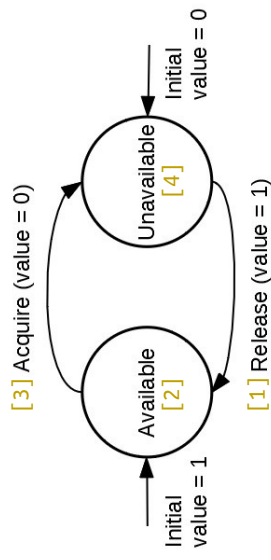
Sémaphore binaire

Mécanisme de signalisation ($\approx flag$), généralement utilisé pour la synchronisation de tâches.

En passant le sémaphore à '1' [1], une tâche indique qu'elle est arrivée au lieu de rendez-vous (ou qu'un résultat est disponible) [2].

Une autre tâche acquittera le rendez-vous en passant la valeur du sémaphore à '0' [3].

Le sémaphore est alors dans un état indique qu'aucune tâche n'est arrivé au rendez-vous (ou qu'aucun résultat n'est disponible) [4].



Contrairement au mutex, **aucune tâche n'est propriétaire d'un sémaphore** : n'importe quelle tâche peut signaler sa présence (ou la présence de résultat) [1] et n'importe quelle tâche peut accepter le rendez-vous ou récupérer le résultat [3].

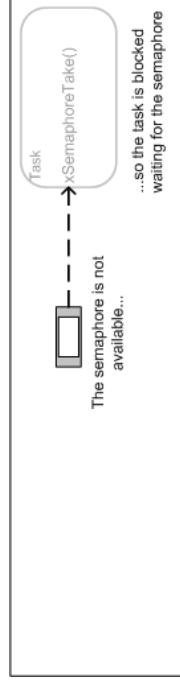
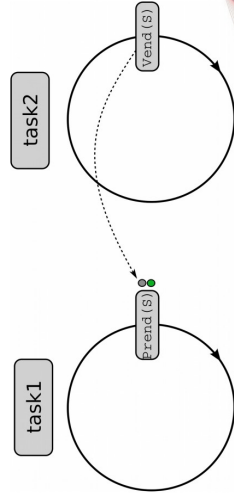
71

Sémaphore

Sémaphore binaire

Le sémaphore binaire est implémenté par :

- une variable booléenne (qui indique si le sémaphore est libre ou non) ;
- une file d'attente : une tâche n'ayant pas obtenu l'accès au sémaphore se range dans la file d'attente et passe en **attente passive**.



Ex. : La tâche 1 attend le résultat de l'ADC pour l'afficher sur un écran. La tâche 2 (ISR de l'ADC) mettra le sémaphore à '1' quand le résultat sera acquis. La tâche 1 d'affichage patiente (bloquée, en attente passive) tant que le sémaphore n'est pas mis à '1' par la tâche 2, puis reprendra son traitement et repassera le sémaphore à '0' pour indiquer que le résultat a été récupéré.

72

Sémaphore binaire vs. Mutex

Ces deux mécanismes sont *a priori* très semblables, mais attention à ne pas les confondre.

Sémaphore binaire

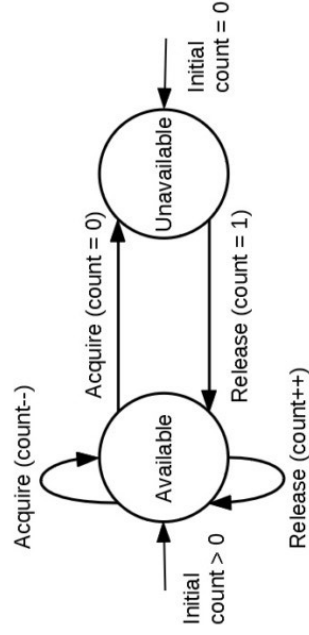
Mutex

- | | |
|--|--|
| <p>- Rôle : synchronisation de tâches.</p> <p>- Pas de propriétaire : les actions de prise et de restitution du sémaphore ne sont pas effectuées par la même tâche.</p> <p>- Inversion de priorité : l'utilisation de sémaphore ne crée pas de situation d'inversion de priorité.</p> <p>- ISR : très utilisé dans les ISR pour passer le moins de temps possible dans ces routines, tout en signalant qu'un évènement s'est produit.</p> | <p>- Rôle : protection de ressources partagées.</p> <p>- Tâche propriétaire : un tâche détient le mutex et seule celle-ci peut le restituer.</p> <p>- Inversion de priorité : le RTOS possède un mécanisme de protection pour minimiser les effets de cette situation.</p> <p>- ISR : fortement déconseillé car risque de bloquer une tâche dans une ISR (comportement fortement non temps-réel).</p> |
|--|--|

Sémaphore à compteur

Comportement analogue au sémaphore binaire : la file d'attente est conservée, mais la variable booléenne est remplacée par une variable entière.

Peut permettre de compter un nombre d'occurrences d'un évènement (en incrémentant le compteur) et le nombre de fois où l'évènement a été traité (en décrémentant le compteur).



Exercice

Une application nécessite que ses trois tâches soient exécutées dans l'ordre : T3, T1, T2, T3, T1, T2, T3, ...
Q1. Proposez une solution permettant de faire cela en utilisant 3 sémaphores binaires (S1, S2, S3).

On précise que T1 doit obtenir S1 pour s'exécuter, T2 doit obtenir S2, ...

On appellera **Give(Sx)** et **Take(Sx)** les fonctions permettant respectivement de donner ou prendre le sémaphore Sx.

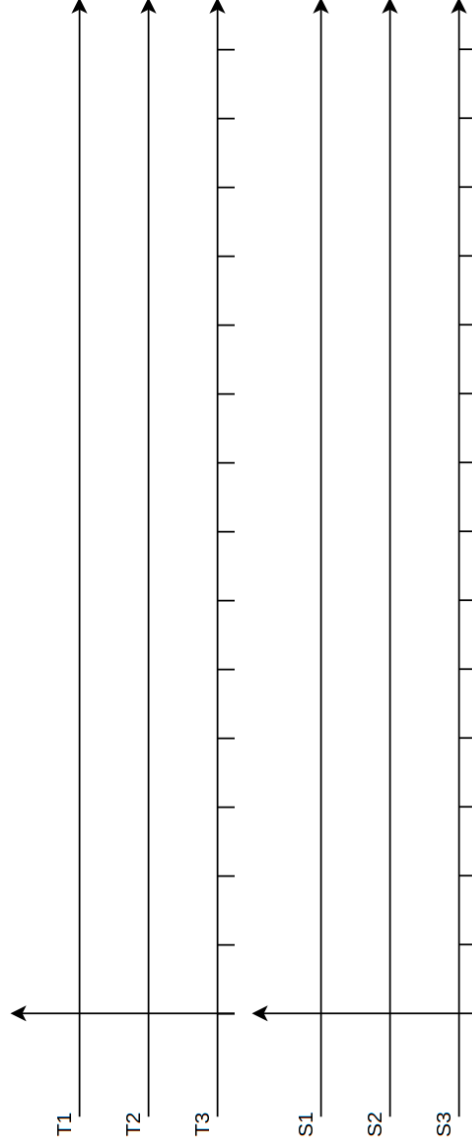
```
void Task1(void *pvParam) {
    while (1) {
        ...
        ...
        ...
    }
}
```

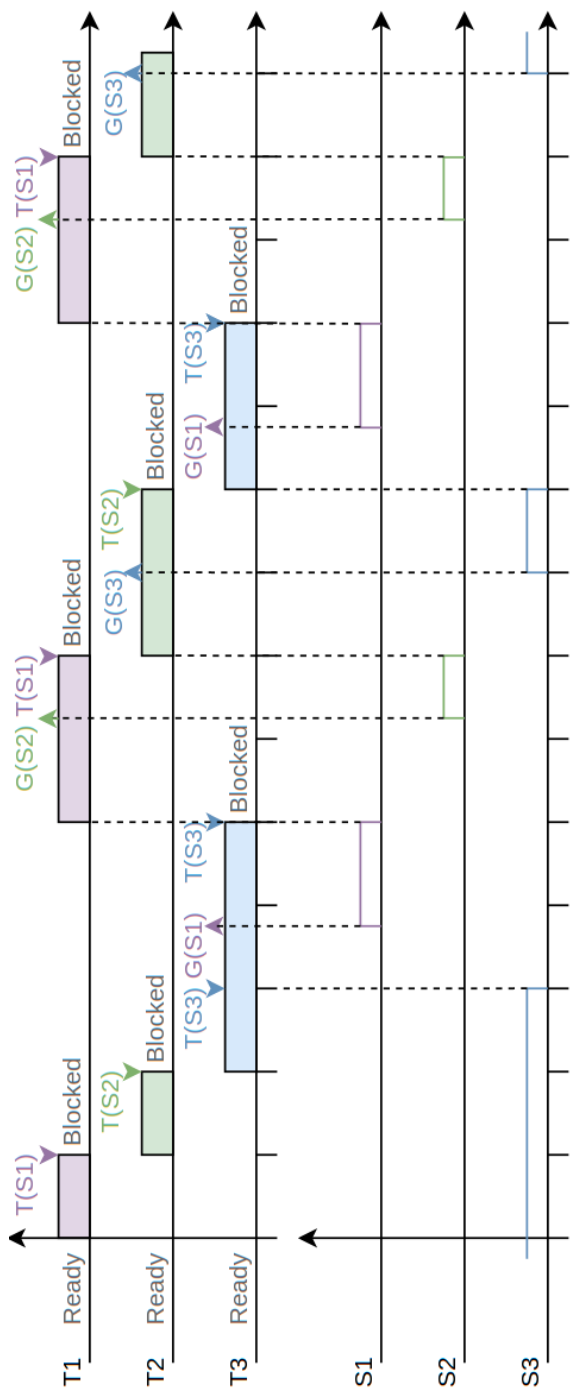
```
void Task2(void *pvParam) {
    while (1) {
        ...
        ...
        ...
    }
}
```

```
void Task3(void *pvParam) {
    while (1) {
        ...
        ...
        ...
    }
}
```

Exercice

Q2. Complétez le chronogramme page suivante en indiquant la totalité des mouvements de sémaphores (prise et restitution) et l'état de chaque tâche (Ready, Running, Blocked).





Queue de messages (message queues)

Permet l'échange de données (communication) entre tâches. Construit avec deux files d'attente.

File d'attente des données

Contient un nombre fini d'éléments. Le nombre d'éléments et leur taille sont configurables.

File généralement gérée comme une pile FIFO (First In = First Out), mais pas seulement.

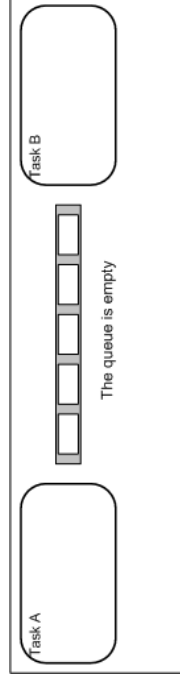
File d'attente des tâches

Les tâches qui demandent la lecture d'un message alors que la queue est vide viennent dans cette file et se bloquent (attente passive).

La file peut classer les tâches par priorité ou les ranger dans une FIFO.

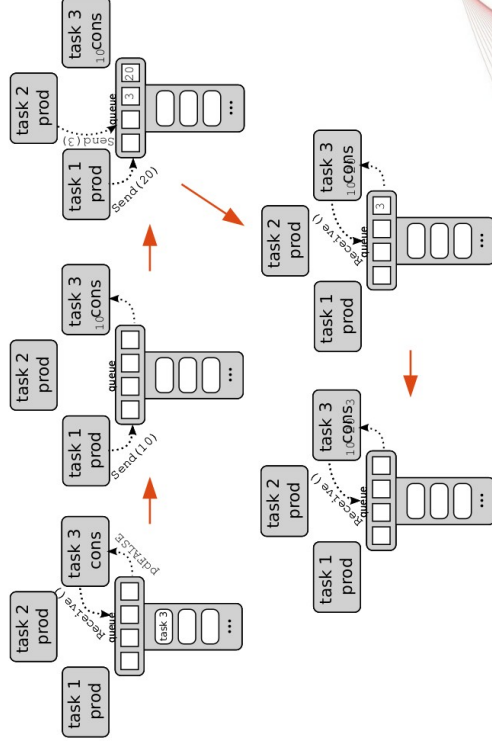
Exemple

Cas avec de un **producteur** unique et un **consommateur** unique.



Exemple

Cas avec de multiples **producteurs** et un **consommateur** unique.



Exercice

Soit une application possédant deux tâches productrices de priorité 1 et une tâche consommatrice de priorité 2, et fonctionnant avec un *kernel* en mode préemptif.

Le code des trois tâches est donné ici.

```
void prodTask1(void *pvParam) {
    uint32_t y=1;
    while(1) {
        osMessagePut(msgBox, Y, 0);
        y+=2;
        osDelay(10);
    }
}
```

```
void prodTask2(void *pvParam) {
    uint32_t y=2;
    while(1) {
        osMessagePut(msgBox, Y, 0);
        y+=2;
        osDelay(10);
    }
}
```

```
void consTask(void *pvParam) {
    uint32_t z;
    uint8_t sBuffer[20];
    while(1) {
        osMessageGet(msgBox, &z, osWaitForever);
        sprintf(sBuffer, "%d\r\n", z);
        uartSendString(sBuffer);
    }
}
```

Exercice

Q1. Donnez le chronogramme représentant la séquence d'exécution à partir du démarrage de l'application. Faites bien apparaître les instants clés, en indiquant les appels de fonctions associées et l'état des tâches.

Exercice

Q2. Qu'observerait-on au niveau d'un terminal UART branché au système ?

PROGRAMMATION DES RTOS, APPLICATION À FREERTOS



Task Control Block (TCB)

Gestion de la mémoire

Gestion des interruptions



PROGRAMMATION DES RTOS, APPLICATION À FREERTOS Task Control Block (TCB)



Pour organiser le planning d'exécution des tâches, l'ordonnanceur doit disposer de nombreuses informations. Pour cela, chaque tâche possède son jeu personnel d'attributs, stockés dans le **Task Control Block (TCB)**.

Ces attributs sont propres à chaque OS, voyons les plus communs ici :

- **Adresse de début de code** : adresse du début du fil de code à exécuter. Généralement passé sous forme de pointeur de fonction.
- **Adresse de début et taille de la pile** : chaque tâche possède sa propre pile (*stack*) où sont stockées ses données (variables dynamiques, paramètres de la fonction, adresse de retour).
- **Priorité de la tâche** : permet à l'ordonnanceur d'effectuer son choix lorsque plusieurs tâches sont « ready ».
- **État de la tâche (*)** : état courant de la tâche (prête, exécutée, bloquée, ...)
- **Ressources bloquantes (*)** : si la tâche est à l'état bloquée, indique la raison du blocage (sémaphore, *timer*, ...). Permet à l'ordonnanceur de déterminer quelle tâche débloquent lors de la restitution d'une ressource.

(*) → Dans FreeRTOS, ces paramètres ne sont pas stockés dans le TCB de la tâche. À la place FreeRTOS possède ses propres tables contenant la liste des tâches, de leur état et de leur(s) ressource(s) bloquante(s).

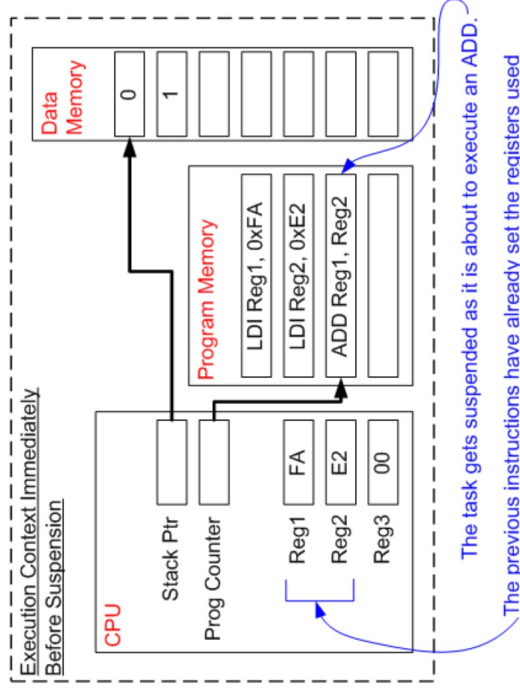
PROGRAMMATION DES RTOS, APPLICATION À FREERTOS

Task Control Block (TCB)

Il faut garder à l'esprit que l'ordonnanceur peut à tout moment **préempter une tâche en cours d'exécution**, sans prévenir !

Lors de la préemption de la tâche, il faut **sauvegarder tout son contexte d'exécution** (registres CPU, instruction en cours, état de la *stack*, ...).

<https://www.freertos.org/implementation/a00006.html>



The previous instructions have already set the registers used by the ADD. When the task is resumed the ADD instruction will be the first instruction to execute. The task will not know if a different task modified Reg1 or Reg2 in the interim.

87

PROGRAMMATION DES RTOS, APPLICATION À FREERTOS

Task Control Block (TCB)

Pour faciliter la sauvegarde du contexte, **certaines attributs du TCB sont associés au contexte d'exécution**.

Une fois encore, **ces attributs sont propres à chaque OS**. Voici quelques attributs génériques :

- Adresse courante de code :

nécessaire pour reprendre la tâche à l'endroit où elle a été interrompue. Cela consiste à sauvegarder la valeur du registre *Program Counter (PC)* du CPU au moment où la tâche est préemptée.

- Adresse courante de la pile :

nécessaire pour remplacer le pointeur de pile à l'endroit où il était au moment où la tâche a été interrompue. Cela consiste à sauvegarder la valeur du registre *Stack Pointer (SP)* au moment où la tâche est préemptée.

- Registres du CPU :

l'exécution d'un fil de code utilise des registres du processeur. Lorsqu'une tâche est préemptée, il est nécessaire de sauvegarder la valeur de ces registres puis de les restaurer lorsque la tâche repasse à l'état actif.

Dans FreeRTOS, ces paramètres ne sont pas stockés dans le TCB de la tâche, mais sur la pile de la tâche.

88

Rappels sur l'allocation mémoire en C

```
char global_var = 5;           // Variable globale
void foo(char arg1, char arg2) {
    static char static_var = 0; // Variable statique locale
    char local_var = 0;         // Variable locale
    return;
}
void main() {
    foo( '1' , '0' );
    char* p = malloc( 15*sizeof(char) ); // malloc() et free()
}
```

→ allocation statique
→ allocation statique
→ allocation automatique (sur la pile)
→ allocation automatique (sur la pile)
→ allocation automatique (sur la pile)
→ allocation dynamique (sur le tas)

Attention : La gestion de la mémoire requiert une très grande rigueur de programmation !

Note : l'allocation dynamique peut ne pas être supportée par l'OS ou par le processeur (si absence de MMU).

Allocation automatique

Chaque tâche possède sa propre pile (*stack*)

Problème : le pointeur de pile (SP) est initialisé lors du *startup* puis, au cours de l'exécution, il est géré automatiquement par le matériel (appel de fonction, ISR, etc.) et par la *toolchain* (allocation, push, pop, etc.).

Solution : FreeRTOS « trompe » les mécanismes automatiques en modifiant la valeur du SP lors de la restauration d'une tâche : SP = TopStackTaskToSpawn (valeur sauvegardée lorsque la tâche a été préemptée).

La taille de pile d'une tâche est définie lors de sa création

Problème : attention aux débordements de piles (*stackOverflow*) !

Solution ? : FreeRTOS ne propose que des mécanismes ultra-rudimentaires de protection de la mémoire. En comparaison, les autres systèmes vont utiliser une MMU (ex : Linux et la fameuse « *segmentation fault* »).

<https://freertos.org/Stacks-and-stack-overflow-checking.html> (Kernel > Developer Docs > Stack Overflow Protection)

Allocation dynamique

Quand une tâche (ou sémaphore, mailbox, ...) est créée, FreeRTOS doit allouer dynamiquement de la mémoire.

Problèmes :

- `malloc()` et `free()` possiblement non implémentés sur le système (si absence de MMU)
- utilise une grande quantité de mémoire
- un thread peut accéder à la zone allouée par/pour un autre thread
- code non déterministe

Solution :

FreeRTOS implémente ses propres méthodes de gestion du tas : `pvPortMalloc()` et `vpPortFree()`

91

Allocation dynamique

FreeRTOS propose plusieurs stratégies de gestion du tas (*heap*).

Le développeur choisit la stratégie qui lui convient en incluant le fichier source correspondant dans son projet :

- `heap_1.c` – the very simplest, does not permit memory to be freed. → *Couvrir la plupart des applis avec FreeRTOS.*
- `heap_2.c` – permits memory to be freed, but does not coalesce adjacent free blocks.
- `heap_3.c` – simply wraps the standard `malloc()` and `free()` for thread safety.
- `heap_4.c` – coalescences adjacent free blocks to avoid fragmentation. Includes absolute address placement option.
- `heap_5.c` – as per `heap_4.c`, with the ability to span the heap across multiple non-adjacent memory areas

NB : FreeRTOS implémente certaines fonctions en deux versions : pour un usage en statique ou en dynamique.

Ex. : `xTaskCreate()` et `xTaskCreateStatic()` ; `xSemaphoreCreateBinary()` et `xSemaphoreCreateBinaryStatic()` ; ...

<https://freertos.org/a00111.html> (Kernel > Developer Docs > Heap Memory Management)

https://freertos.org/Static_Vs_Dynamic_Memory_Allocation.html (Kernel > Developer Docs > Static Vs Dynamic Memory)

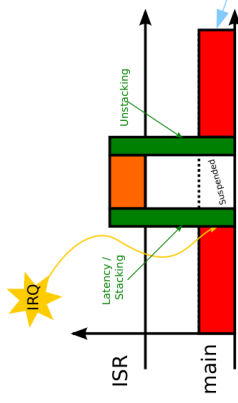
92

Rappels sur les interruptions

Lorsqu'un événement externe (généralement asynchrone) se produit, il peut nécessiter un traitement dédié.

Le périphérique chargé de capter l'évènement demande une interruption au CPU (IRQ, *Interrupt Request*).

Si le CPU est sensible aux IRQ en général et celle-ci en particulier, alors il interrompt son fil pour exécuter la routine d'interruption correspondante (ISR, *Interrupt Service Routine*).



C'est une manière rudimentaire de transformer un programme mono-tâche en programme multi-tâche sans nécessité d'implémenter un OS !

Attention : il s'agit d'un **mécanisme purement matériel**, qui ne peut pas directement être géré par FreeRTOS !

Interruptions différées (*deferred interrupt processing*)

Problème : Une ISR est une routine exécutée par le processeur, hors de contrôle du noyau de l'OS

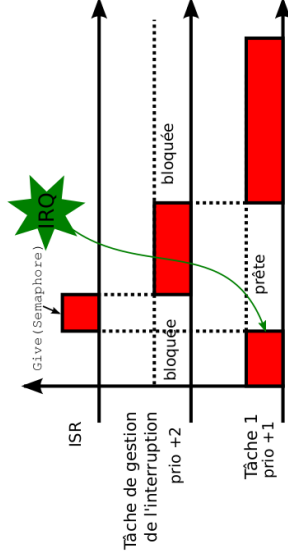
→ comportement inattendu du noyau ;

→ **temps-réel non garanti**

Solution : Réduire au maximum le temps d'exécution des ISR

→ utilisation des services fournis par l'OS (sémaphore, mailbox) pour que l'ISR signale le besoin de traitement

puis traitement effectif de l'évènement dans une simple tâche



Avec ce système, peu de temps passé dans l'ISR, puisque le traitement de l'interruption est différé.

FreeRTOS laisse au développeur le choix de sa stratégie de gestion des interruptions :

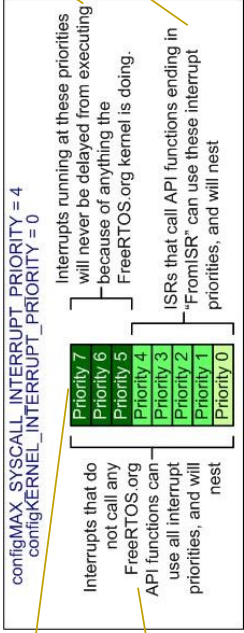
- ISR matérielles (classiques) : mais **besoin d'une grande rigueur pour le temps d'exécution des ISR**
- ISR différées via les outils de l'OS

Cette stratégie est ajustable avec deux constantes prédéfinies du fichier FreeRTOSConfig.h

- `configKERNEL_INTERRUPT_PRIORITY` : niveau de priorité du *kernel* (tick de l'OS)
- `configMAX_SYSCALL_INTERRUPT_PRIORITY` : niveau max de priorité pour lequel une ISR peut utiliser les fonctions de l'API FreeRTOS

Le nombre de niveau de priorité dépend de l'architecture sur laquelle FreeRTOS est déployé.

Une ISR qui n'utilise pas les fonctions de l'API peut avoir n'importe quel niveau de priorité.



Une ISR de plus haute priorité ne sera pas perturbée par l'OS mais ne peut pas utiliser les fonctions de l'API.

Une ISR qui utilise les fonctions de l'API doit être au niveau de priorité ≤ configMAX_SYSCALL_INTERRUPT_PRIORITY si cette constante est implémentée, ou de niveau de priorité = configKERNEL_INTERRUPT_PRIORITY sinon.

https://freertos.org/a00110.html#kernel_priority

TOUR D'HORIZON DES ALGORITHMES D'ORDONNANCEMENT



TOUT D'HORIZON DES ALGORITHMES D'ORDONNANCEMENT



/* Section en cours de construction */

En attendant, merci à Basile Dufay (Maître de Conférence à l'ESIX de Caen) pour ces diapositives généreusement rendues disponibles pour l'ENSI !

basile.dufay@unicaen.fr

CHOISIR SON SYSTÈME D'EXPLOITATION

Critères de sélection
Origine de l'OS



CHOISIR SON SYSTÈME D'EXPLOITATION

Critères de sélection

Application temps réel ?

- RTOS
- Extensions RT de Linux (LinuxRT, RTAI, ...) parfois suffisantes

Mémoire limitée ?

- OS léger

Ressources CPU limitées ?

- RTOS à privilégier par rapport aux OS

Ressources énergétiques limitées ?

- Si conso mémoire/CPU important, revoir les points précédents
- un OS est plus enclin à posséder un outil de *power management*

MMU disponible ?

- Oui = OS possible, de nombreux RTOS savent gérer une MMU
- Non = prendre un « petit » OS, les RTOS gèrent généralement bien ça

Périphériques maisons
ou de niche ?

- Quel OS est compatible ? S'il y en a un ...
- Linux possède une compatibilité extrêmement large
Ou avoir un développeur de driver Linux à portée de main

Sécurité ?

- Vérifier la protection des tâches / *thread protected mode* / *process model*

Certification ?

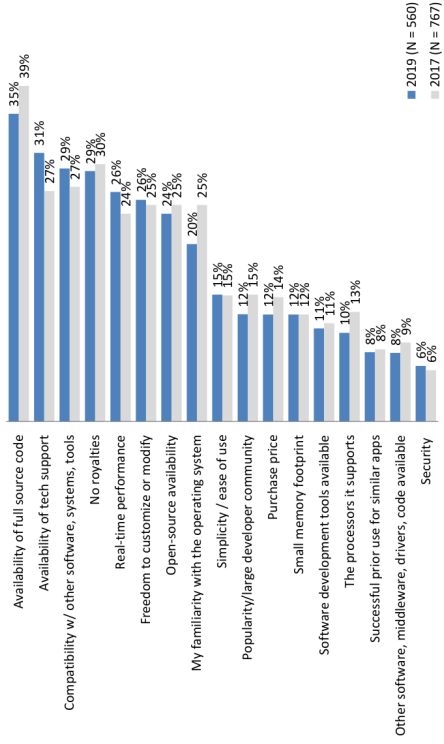
- Coût : généralement lié à la taille du code
- Code source requis

CHOISIR SON SYSTÈME D'EXPLOITATION

Critères de sélection

Critères vus par les pros

What are the most important factors in choosing
an operating system?



Base: Currently using an operating system

EEI Times Embedded

2019 Embedded Markets Study

© 2019 Copyright by AspenCore. All rights reserved.

103

CHOISIR SON SYSTÈME D'EXPLOITATION

Critères de sélection

Why did you use the same operating system?

Critères
subjectifs !



Base = Those who are using the same operating system as in previous project

EEI Times Embedded

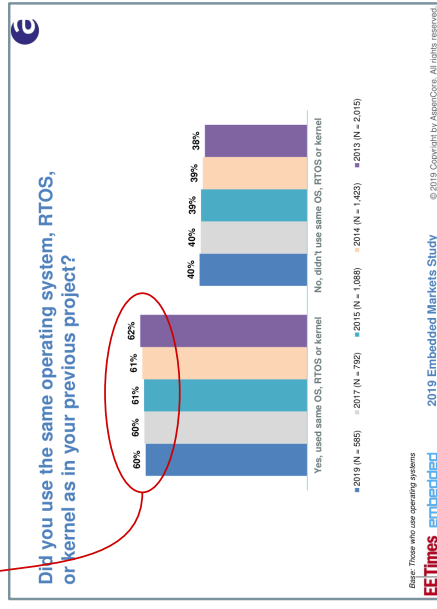
2019 Embedded Markets Study

© 2019 Copyright by AspenCore. All rights reserved.

104



Comme pour tout, c'est aussi
une histoire d'habitude !



Base: Those who use operating systems

EEI Times Embedded

2019 Embedded Markets Study

© 2019 Copyright by AspenCore. All rights reserved.

CHOISIR SON SYSTÈME D'EXPLOITATION

Origine de l'OS

Solution propriétaire (commerciale)

Avantages

- Le coût implique *normalement* des contre-parties
 - maturité
 - support
 - engagement sur le long terme (portabilité, nouvelles architectures)
 - documentation (vérifier ! Code source dispo ? Lisible ?)
 - RTOS compatible avec outils de debug (outils de trace)
 - Drivers hardware

Inconvénients

- Coût de la licence
- Coûts cachés
 - Modules optionnels ? (payer le strict nécessaire)
 - Modules réglables ? Adaptables à la volée ?
- Pas de visibilité sur le fonctionnement interne
 - est-ce nécessaire ?
- Vérifier l'utilisation des standards (POSIX)

CHOISIR SON SYSTÈME D'EXPLOITATION

Origine de l'OS

Solution libre

Avantages

- Coût de la licence
- Accès au code source
 - utile pour documentation
 - portabilité
 - peut aider à la certification
- Support de la communauté
 - Vérifier si communauté active
 - Vérifier sur quelle(s) version(s)
 - Vérifier sur quelle(s) architecture(s)

Inconvénients

- Problème de licence
 - restrictions des licences open source (GPL, LGPL, ...)
- Support à long terme pas forcément garanti
 - Juger selon l'activité de la communauté
- Trop d'implémentations
 - Une contribution = une nouvelle version
- Drivers moins fournis
 - Vérifier disponibilité middleware, BSP, ...

CHOISIR SON SYSTÈME D'EXPLOITATION

Origine de l'OS

Solution maison

Avantages

- Pas de coût de licence
→ impose de garder le savoir-faire
- Maîtrise technique
→ ou limité par les compétences de l'équipe ...
- Sur mesure

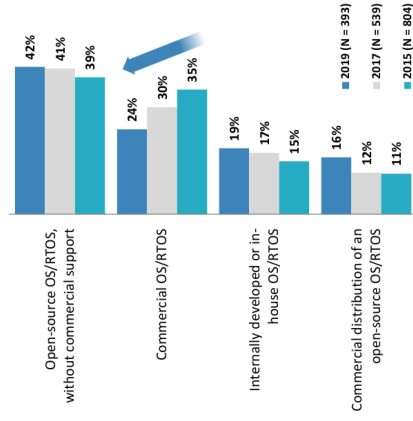
Inconvénients

- Coût de développement
- Compétences en développement *kernel* nécessaires
- Support à long terme pas forcément garanti
→ Garder ses employés, faire la doc
- Portabilité
→ Compatibilité avec une nouvelle archi (asm, ISR, ...)?
- Drivers, middleware, ...
→ Augmente encore les coûts de développement

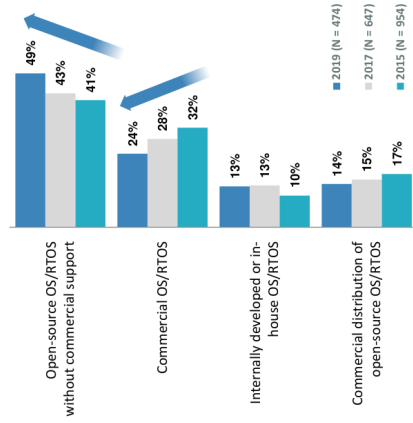
CHOISIR SON SYSTÈME D'EXPLOITATION

Origine de l'OS

My current embedded project uses:

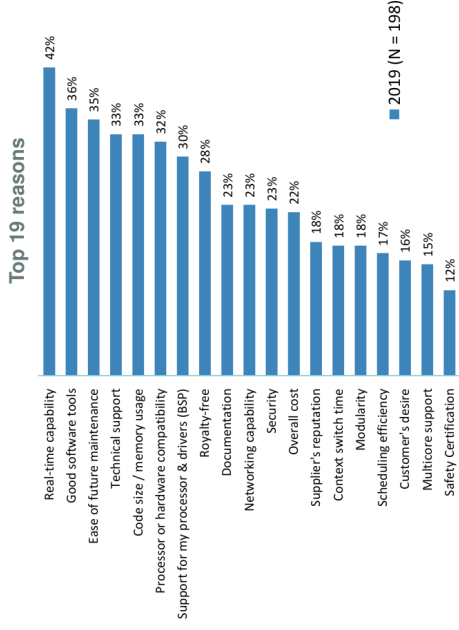


My next embedded project will likely use:





Which factors most influenced your decision to use a commercial operating system?



Base = Those who currently use a "Commercial" OS/RTOS

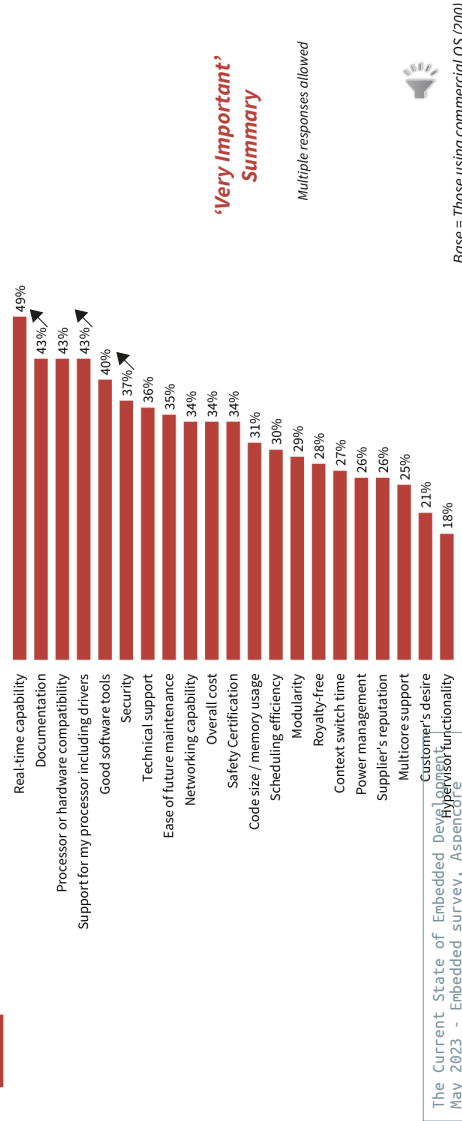
EETimes embedded

2019 Embedded Markets Study

© 2019 Copyright by AspenCore. All rights reserved.

Those using a commercial OS look for documentation, hardware compatibility and support to complement real-time capabilities

Large OEMs and APAC developers put particular emphasis on most commercial OS capabilities



'Very Important'
Summary

Multiple responses allowed



Base = Those Using commercial OS (200)

The Current State of Embedded Development
May 2023 - Embedded survey, AspenCore

embedded
survey

32. How important are the following factors regarding your decision to use a commercial operating system, RTOS, kernel, etc.?

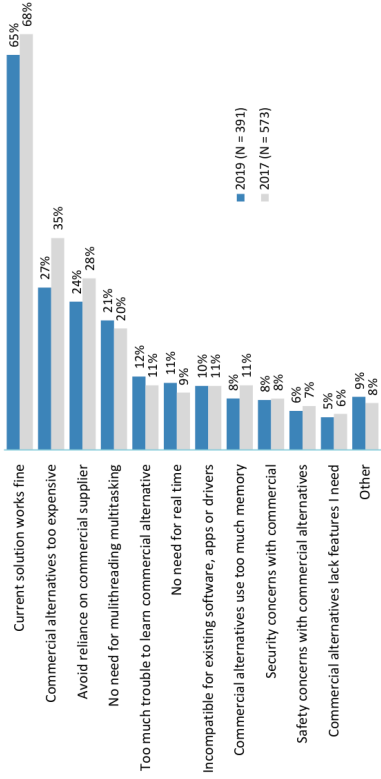
ASPENCORE | 24

CHOISIR SON SYSTÈME D'EXPLOITATION

Origine de l'OS



What are your reasons for not using a commercial operating system?



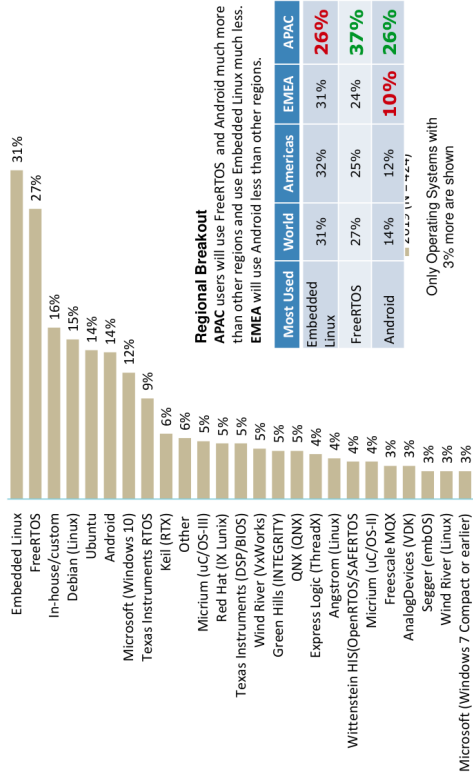
Base = Those who do not currently use a "Commercial" OS/RTOS

CHOISIR SON SYSTÈME D'EXPLOITATION

Origine de l'OS



Please select ALL of the operating systems you are considering using in the next 12 months.



Base: Those who are considering an operating system in any project in the next 12 months

BONUS



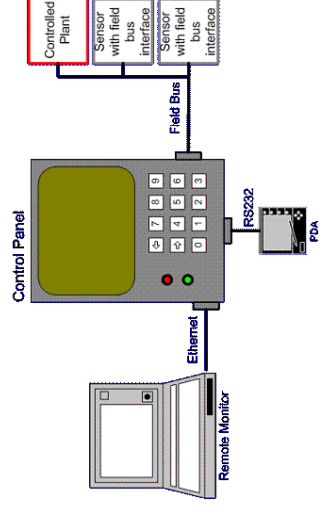
BONUS

S'entraîner à concevoir une solution RTOS

Cas d'étude comparant 4 solutions pour répondre à un cahier des charges.

Disponible sur le site de FreeRTOS : <https://www.freertos.org/tutorial/index.html>

Applicable à n'importe quel RTOS.



115

- Hugo Descoubes (PRAG ENSICAEN)
- Basile Dufay (MCF ESIX/UniCaen)

















