



Institut
Mines-Télécom

Introduction aux alimentations et à l'ultra- basse consommation

... ou « tu pousses le bouchon un peu
trop loin Maurice »

Alexis Polti



Licence de droits d'usage



Contexte académique } sans modification

Par le téléchargement ou la consultation de ce document, l'utilisateur accepte la licence d'utilisation qui y est attachée, telle que détaillée dans les dispositions suivantes, et s'engage à la respecter intégralement.

La licence confère à l'utilisateur un droit d'usage sur le document consulté ou téléchargé, totalement ou en partie, dans les conditions définies ci-après, et à l'exclusion de toute utilisation commerciale.

Le droit d'usage défini par la licence autorise un usage dans un cadre académique, par un utilisateur donnant des cours dans un établissement d'enseignement secondaire ou supérieur et à l'exclusion expresse des formations commerciales et notamment de formation continue. Ce droit comprend :

- le droit de reproduire tout ou partie du document sur support informatique ou papier,
- le droit de diffuser tout ou partie du document à destination des élèves ou étudiants.

Aucune modification du document dans son contenu, sa forme ou sa présentation n'est autorisé.

Les mentions relatives à la source du document et/ou à son auteur doivent être conservées dans leur intégralité.

Le droit d'usage défini par la licence est personnel, non exclusif et non transmissible.

Tout autre usage que ceux prévus par la licence est soumis à autorisation préalable et expresse de l'auteur :

alexis.polti@telecom-paristech.fr

tl;dr



● Ce qu'on va apprendre :

- Ce qu'est une alimentation, les grands types.
- Qu'une pile, c'est pas la joie.
- Que dormir, c'est bien.
- Plus généralement, un premier aperçu de comment faire un système embarqué « ultra basse consommation », d'un point de vue matériel et logiciel.



Low power, mythes et réalité

- **Règle absolue : ne jamais croire les pubs !**
 - Les batteries tiennent moins que ce que les constructeurs veulent faire croire.
 - Les protocoles radios « low energie » ne veulent rien dire.
- ⇒ Donc :
 - 1. Se documenter sérieusement.
 - 2. Réfléchir !

Définitions

● Alimentation en tension :

- Dispositif, qui à partir d'une source d'énergie, fournit une tension aussi indépendante que possible du courant débité:

- Elle doit avoir une impédance de sortie nulle : $V_s = V_o, \forall I$

- En pratique, $V_s = V_s(V_e, I)$, d'où $dV_s = \frac{\partial V_s}{\partial V_e} \cdot dV_e + \frac{\partial V_s}{\partial I} \cdot dI$

- Coefficient de stabilité : $\frac{\partial V_s}{\partial V_e}$

- Impédance de sortie : $\frac{\partial V_s}{\partial I}$

- Alimentation idéale : les deux sont nuls.

- Nous nous intéresserons uniquement aux alimentations les plus fréquemment utilisées dans les objets connectés : alimentations continues, non isolées, faible tension, faible puissance.

Définitions

- Efficacité : $\eta = \frac{P_o}{P_i} \quad 0 \leq \eta \leq 1$

- Line regulation : $\frac{1}{Vs} \cdot \frac{\partial Vs}{\partial Ve}$

- Variation de la tension de sortie en fonction des variations de la tension d'entrée.
 - Généralement en %.V⁻¹

- Load regulation : $\frac{1}{Vs} \cdot \frac{\partial Vs}{\partial I}$

- Variation de la tension de sortie en fonction des variations du courant de sortie.
 - Généralement en %.A⁻¹
 - Similaire à l'impédance de sortie.



Définitions

- Drop-out :
 - Tension minimum entre entrée et sortie pour que l'alimentation fonctionne.
 - Typiquement pour un régulateur linéaire : 0.15V – 3V
- Tension de bruit en sortie
 - Valeur efficace de la tension de bruit en sortie
- Ripple rejection ratio (RRR) $RRR_{dB} = 20 \cdot \log \frac{|\Delta V_{s_{max}}|}{|\Delta V_{e_{max}}|}$
 - Facteur de réjection d'une ondulation de faible amplitude en entrée
 - Exprimé en dB



Définitions

● Remarques générales :

- La tension d'alimentation d'un circuit intégré est souvent donnée à 5% près :
 - $V_{CC} = 3.3V$, précision = 165mV
 - $V_{CC} = 1.5V$, précision = 75mV
- Cette tension doit être maintenue, même lors de pics de consommation qui peuvent atteindre plusieurs ampères en quelques micro secondes (rafraîchissement de DRAM par exemple).
- Les alimentations sont souvent le point le plus critique d'un système embarqué.
 - Contraintes :
 - stabilité
 - précision
 - efficacité
 - coût
 - Impliquent des calculs souvent pénibles et compliqués, ainsi qu'une phase de test longue.

Plan

- 
- Définitions
 - Alimentations linéaires
 - Alimentations à découpage
 - Principe
 - Modélisation AC
 - Diagrammes de Bode
 - Fonctions de transfert
 - Systèmes bouclés
 - Compensation



Types

- **Deux types d'alimentations :**
 - Linéaires (dissipatives)
 - Simples.
 - Stabilité facile à obtenir.
 - Rendement entre mauvais et très mauvais.
 - À découpage
 - Complexes
 - Stabilité / performances à étudier.
 - Rendement élevé, typiquement >80%.



Alimentations linéaires

- **Principe**

- La conversion de tension est obtenue en dissipant une partie de la puissance d'entrée dans un élément chauffant.
- $V_s < V_e$

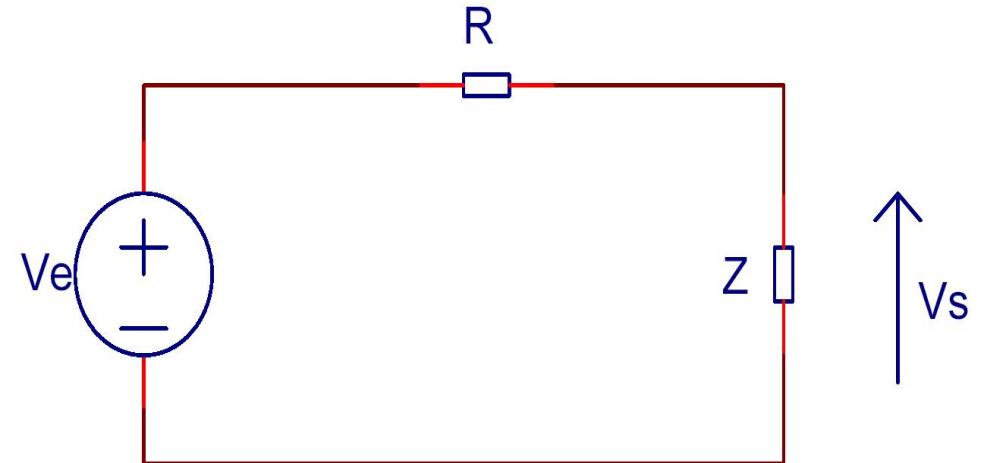
- **Plusieurs types**

- Résistance.
- Diode zener : référence de tension.
- À contre-réaction.

Alimentations linéaires : résistance

$$V_s = V_e \cdot \frac{Z}{Z+R}$$

$$\eta = \frac{Z}{Z+R} = \frac{V_s}{V_e}$$

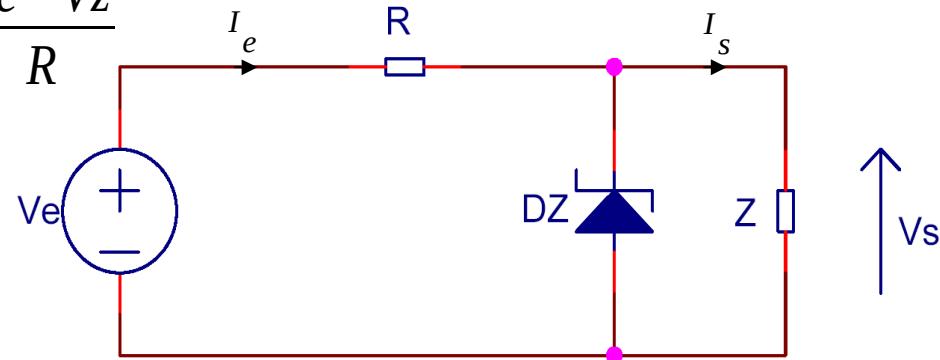


- L'impédance de sortie est élevée (R).
- Rendement mauvais.
- Est-ce vraiment une « alimentation » ?

Alimentations linéaires : diode zener

- DZ ne conduit que si $Z > \frac{V_Z}{V_e - V_Z} \cdot R \Leftrightarrow I_s < \frac{V_e - V_Z}{R}$

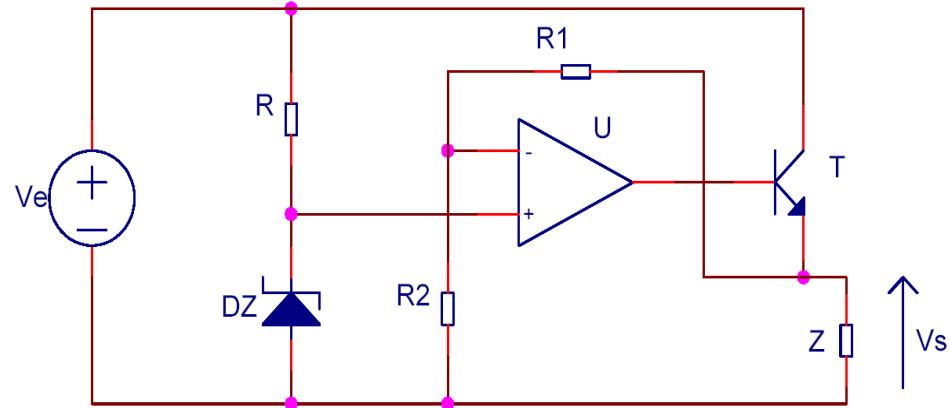
- Statique : $V_s = V_Z + R_Z \cdot (I_e - I_s)$
 $= \frac{R}{R + R_Z} \cdot V_Z + \frac{R_Z}{R + R_Z} \cdot V_e - \frac{R \cdot R_Z}{R + R_Z} \cdot I_s$



- Dynamique : $dV_s = \frac{R_Z}{R + R_Z} \cdot dV_e - \frac{R_Z \cdot R}{R_Z + R} \cdot dI_s$

- Plus stable, mais rendement pire que le précédent.
- Tension de sortie régulée pour les faibles courant.
- Nécessite un courant minimal dans DZ de l'ordre de quelques mA.
- Utilisé comme :
 - Protection contre les surtensions et les courts-circuits.
 - Référence de tension.

Alimentations linéaires : régulateur linéaire



$$V_s = V_z \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right)$$

- Besoin d'un circuit de protection contre les courts-circuits.
- Possibilité de brancher R en sortie de l'alimentation pour s'affranchir de dV_e .
- Possibilité d'oscillations \Rightarrow nécessité d'une capacité en sortie pour stabilité.
 - Attention, certains régulateurs demandent un ESR minimum...

Où en est-on ?



• Les alimentations

- définitions
- régulateurs linéaires
- • régulateurs à découpage



Alimentations à découpage

• Principe

- On veut limiter les pertes : on n'utilise que des éléments non dissipatifs (en théorie)
 - Interrupteurs
 - Inductances, transformateurs
 - Capacités
- Stockage de la puissance d'entrée, puis restitution.
 - Processus en plusieurs phases : hachage.
 - V_s peut être supérieur à V_e , son signe peut être différent.
 - Circuit non linéaire : étude difficile.
- On se limitera à l'étude des convertisseurs continu-continu non isolés faible puissance.



Régime permanent

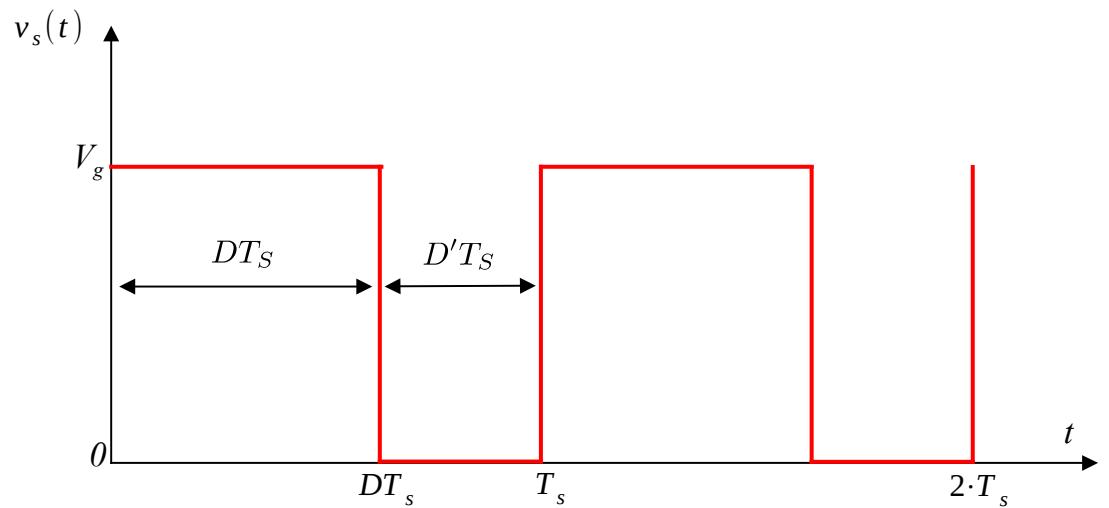
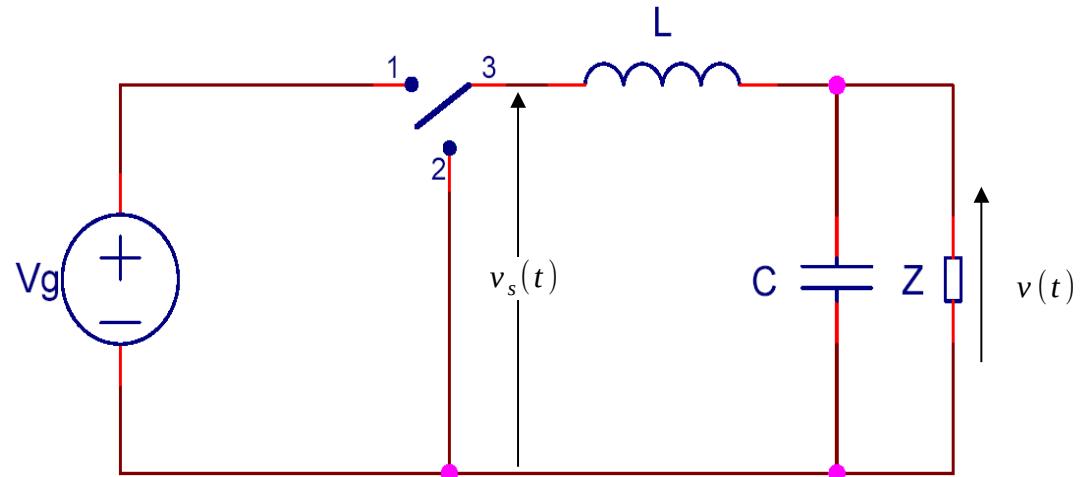
- Analyse basée sur des approximations.
- Technique simple, permettant de trouver rapidement une valeur approchée :
 - du point de fonctionnement,
 - des ondulations résiduelles.
- ...et de dimensionner L et C.

Régime permanent : définition

- Rapport cyclique

$$D = \frac{T_{on}}{T_S}, D' = \frac{T_{off}}{T_S}$$

$$0 \leq D \leq 1, D + D' = 1$$





Régime permanent

- Pour une inductance : $v_L(t) = L \frac{di_L}{dt}$
- Entre $t=0$ et $t=T_s$: $i_L(T_s) - i(0) = \frac{1}{L} \cdot \int_0^{T_s} v_L(t) dt$
- En régime permanent : $\forall n, i(n \cdot T_s) = cste$
- C'est à dire : $\langle v_L \rangle = \frac{1}{T_s} \cdot \int_0^{T_s} v_L(t) dt = 0$

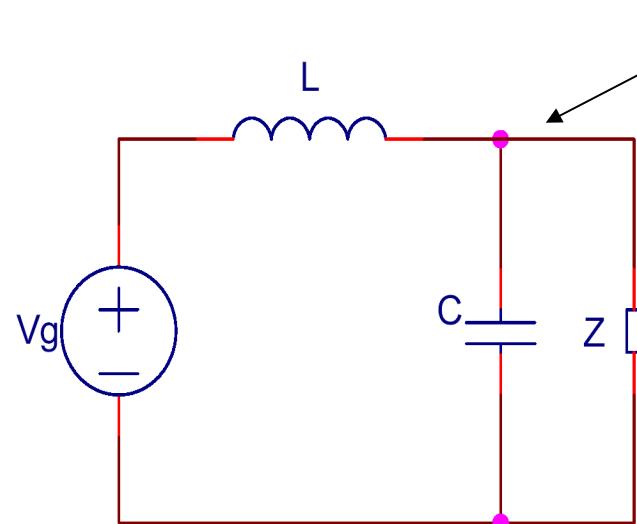
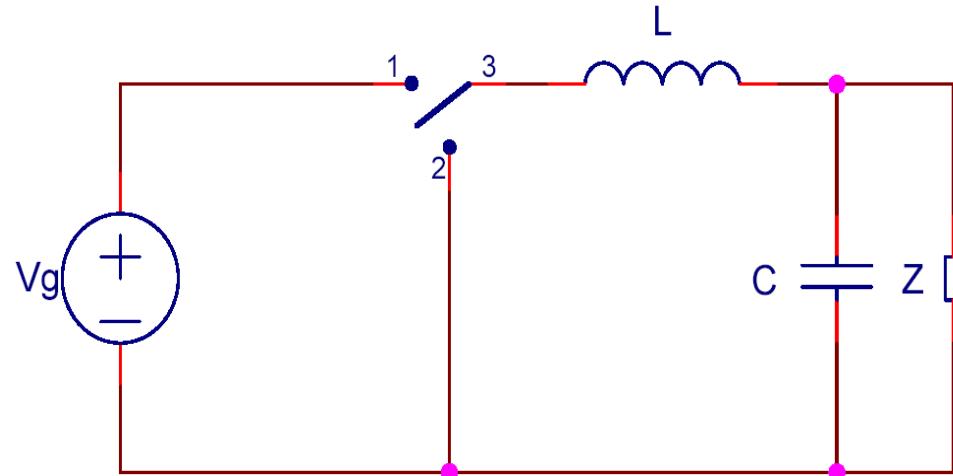


Régime permanent

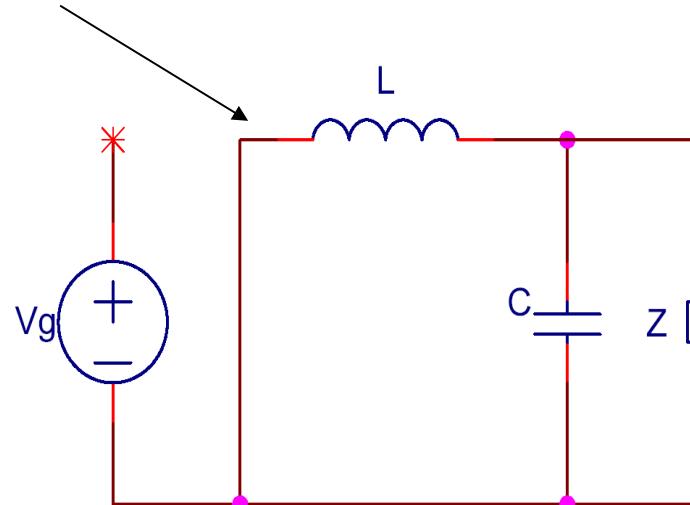
- En régime permanent, on a donc :

$$\begin{cases} \langle V_L \rangle = 0 \\ \langle i_C \rangle = 0 \end{cases}$$

Régime permanent : 2 étapes



interrupteur en position
1



interrupteur en
position 2

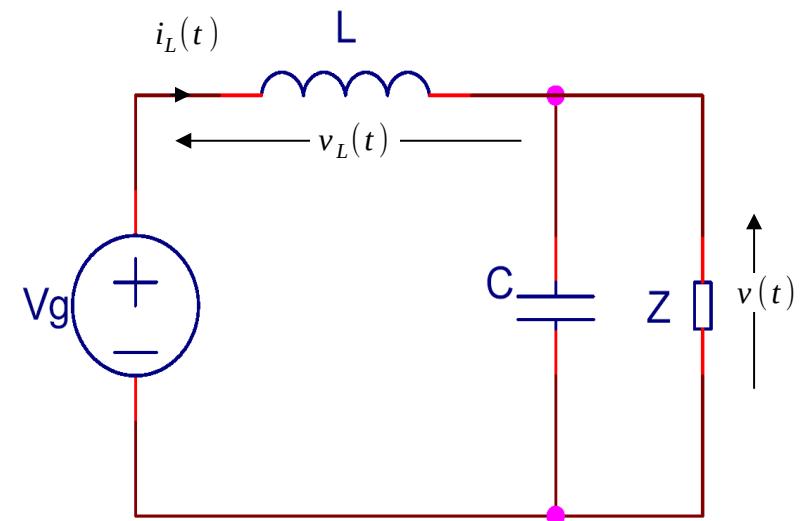
Régime permanent : étape 1

- Tension aux bornes de l'inductance :

$$v_L = V_g - v(t)$$

- Approximation : le convertisseur est calculé et contrôlé de façon à ce que la tension de sortie soit stable (régime permanent)

$$v_L = V_g - V$$



- Courant dans l'inductance : pente constante

$$L \cdot \frac{di_L}{dt} = V_g - V = \text{cste}$$

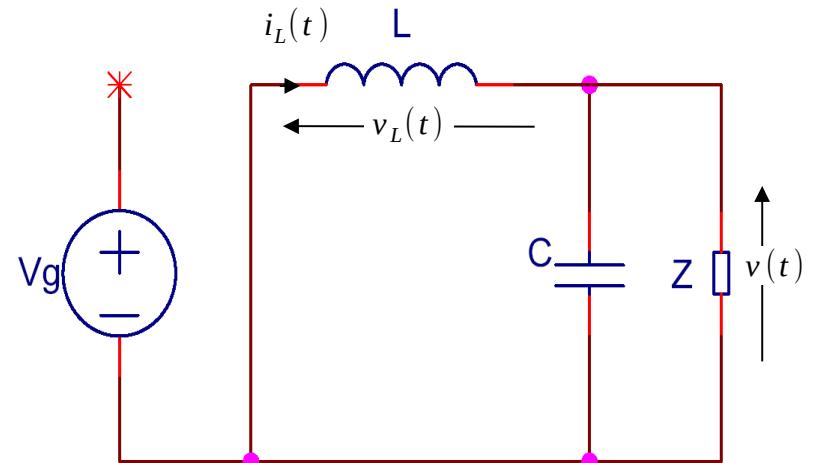
Régime permanent : étape 2

- Tension aux bornes de l'inductance :

$$v_L = -v(t)$$

- Approximation : le convertisseur est calculé et contrôlé de façon à ce que la tension de sortie soit stable (régime permanent)

$$v_L = -V$$



- Courant dans l'inductance : pente constante

$$L \cdot \frac{di_L}{dt} = -V = \text{cste}$$

Régime permanent : on rassemble.

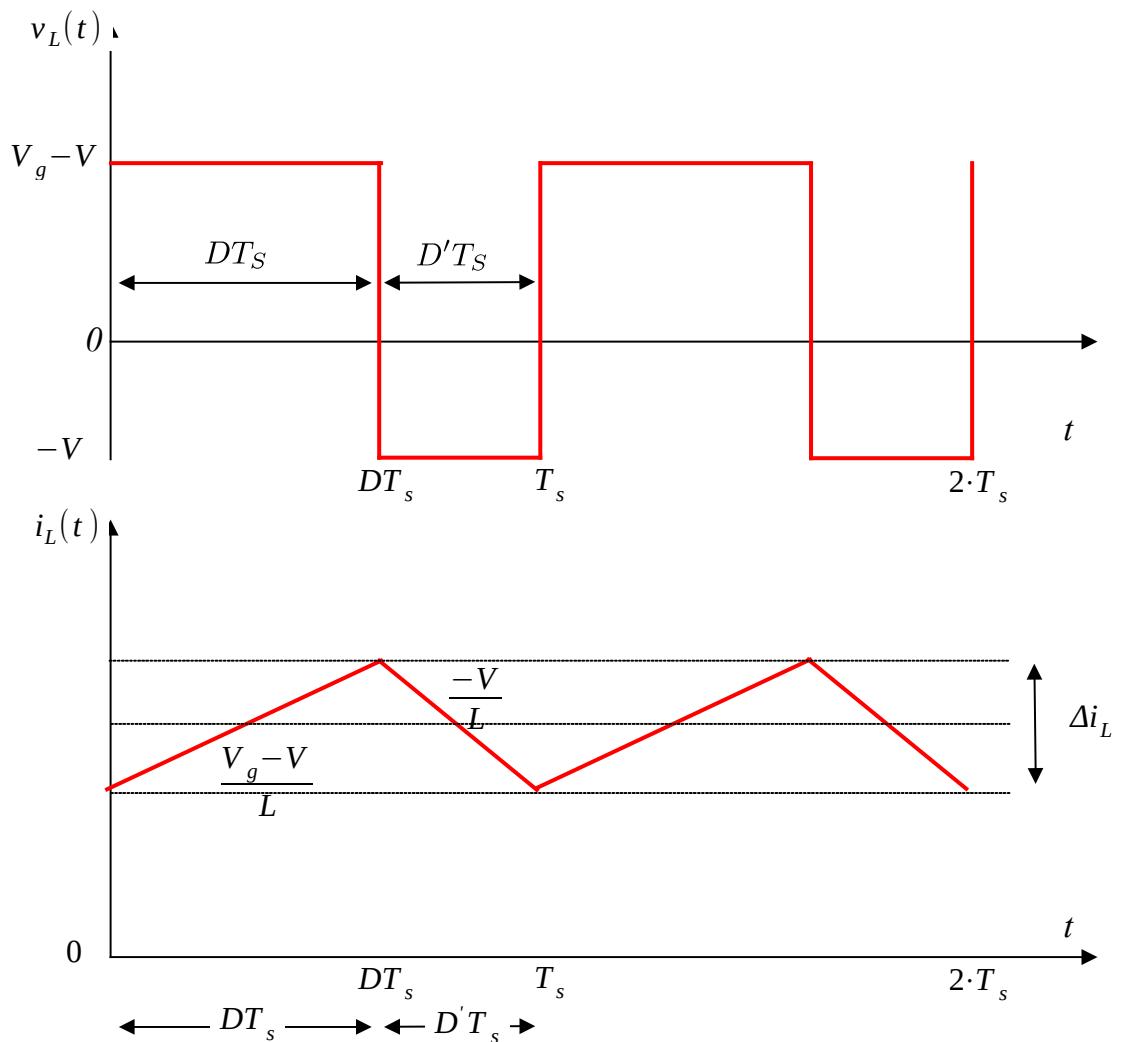
- Tension moyenne aux bornes de l'inductance :

$$\langle v_L \rangle = D \cdot (V_g - V) + D' \cdot (-V) = 0$$

$$V = D \cdot V_g$$

- Variation du courant dans l'inductance

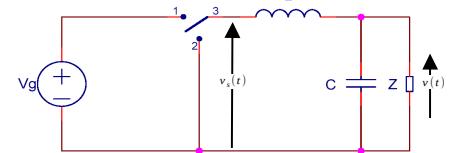
$$\Delta i_L = \frac{V_g - V}{L} \cdot D \cdot T_s = \frac{D \cdot (1 - D) \cdot V_g}{L \cdot f}$$



Régime permanent : bilan

● Remarques

- Définition : rapport de transformation $= M(D) = \frac{V}{V_g}$
 - Ne dépend que de D.
 - Pas de la valeur des composants, ni de Z, ni de la fréquence.
- Rendement théorique = 1 : aucun élément dissipatif.
- Il ne reste plus qu'à ajouter une boucle de contre-réaction contrôlant D en fonction de $V(t)$ pour stabiliser la tension de sortie.
 - \Rightarrow système bouclé : étude de la stabilité de la boucle impérative !





Alimentations à découpage

- **Influence de la capacité de sortie**

- Lissage de l'ondulation du courant dans l'inductance

$$\Delta v_C = \frac{D \cdot D' \cdot V_g}{8 \cdot L \cdot C \cdot f^2}$$

- Variations de charge rapides (moins d'un cycle) :

- la boucle n'ayant pas le temps de réagir, c'est la résistance série parasite (ESR) de C qui détermine les variations de tension de sortie

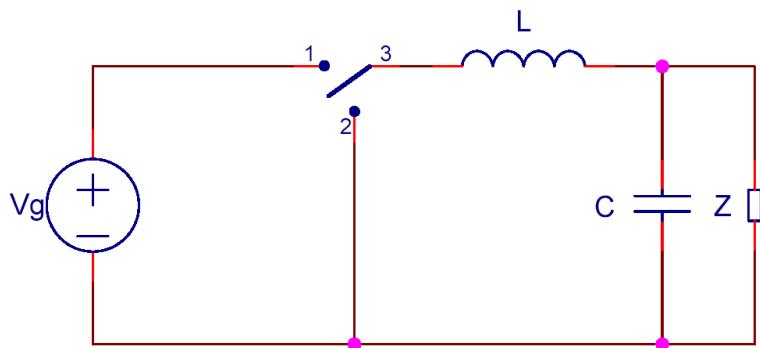
$$dv_C \text{ } ESR \approx R_{ESR} \cdot i_s \cdot dt$$

- En pratique :

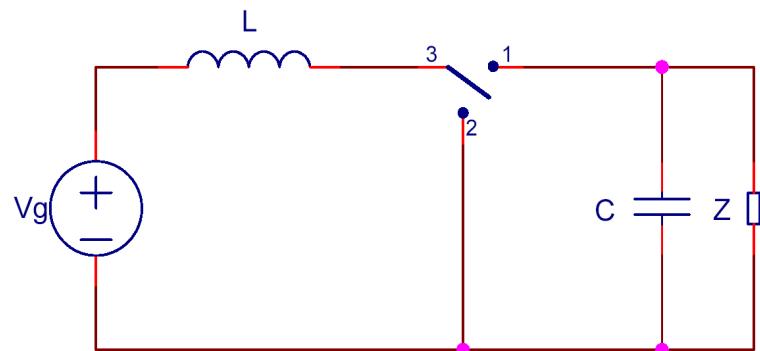
- L'ESR est totalement prédominante.
 - Choisir des capacités à très faible ESR (céramique).
 - Attention :
 - l'ESR influe sur la stabilité du régulateur (cf. l'année prochaine).
 - Vérifier que la capacité accepte bien une grosse variation de courant !

Trois topologies usuelles simples

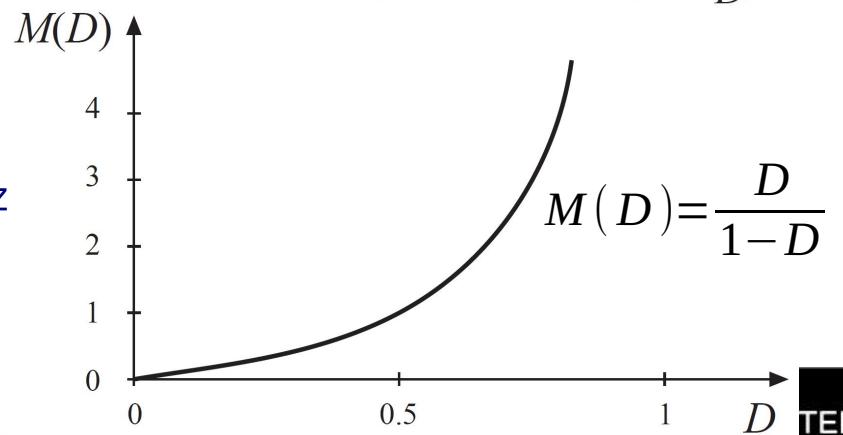
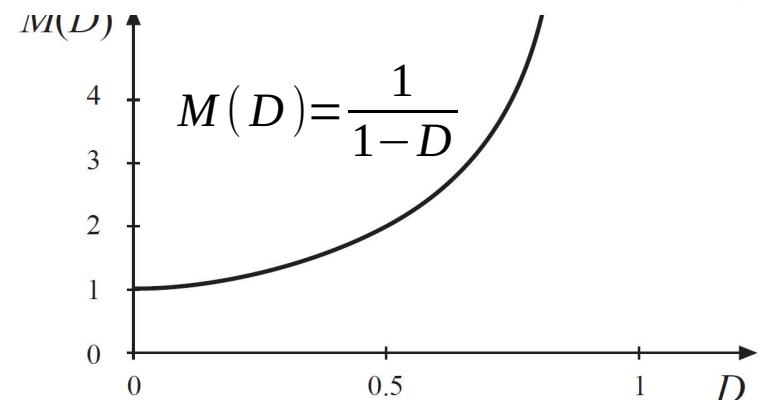
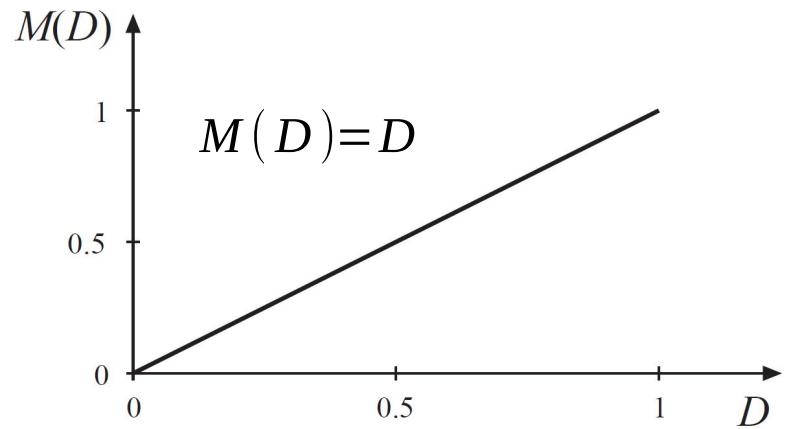
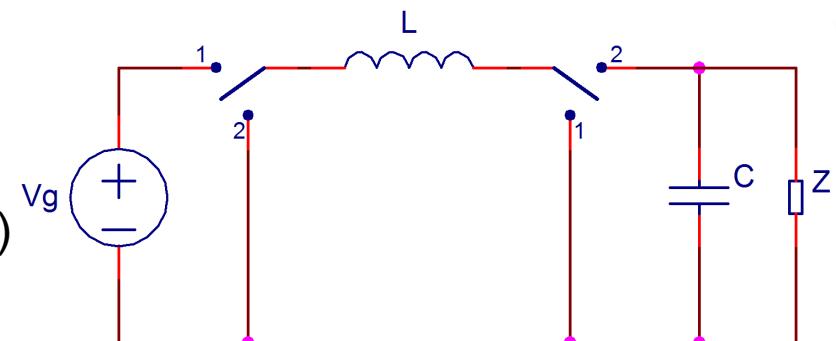
Buck



Boost



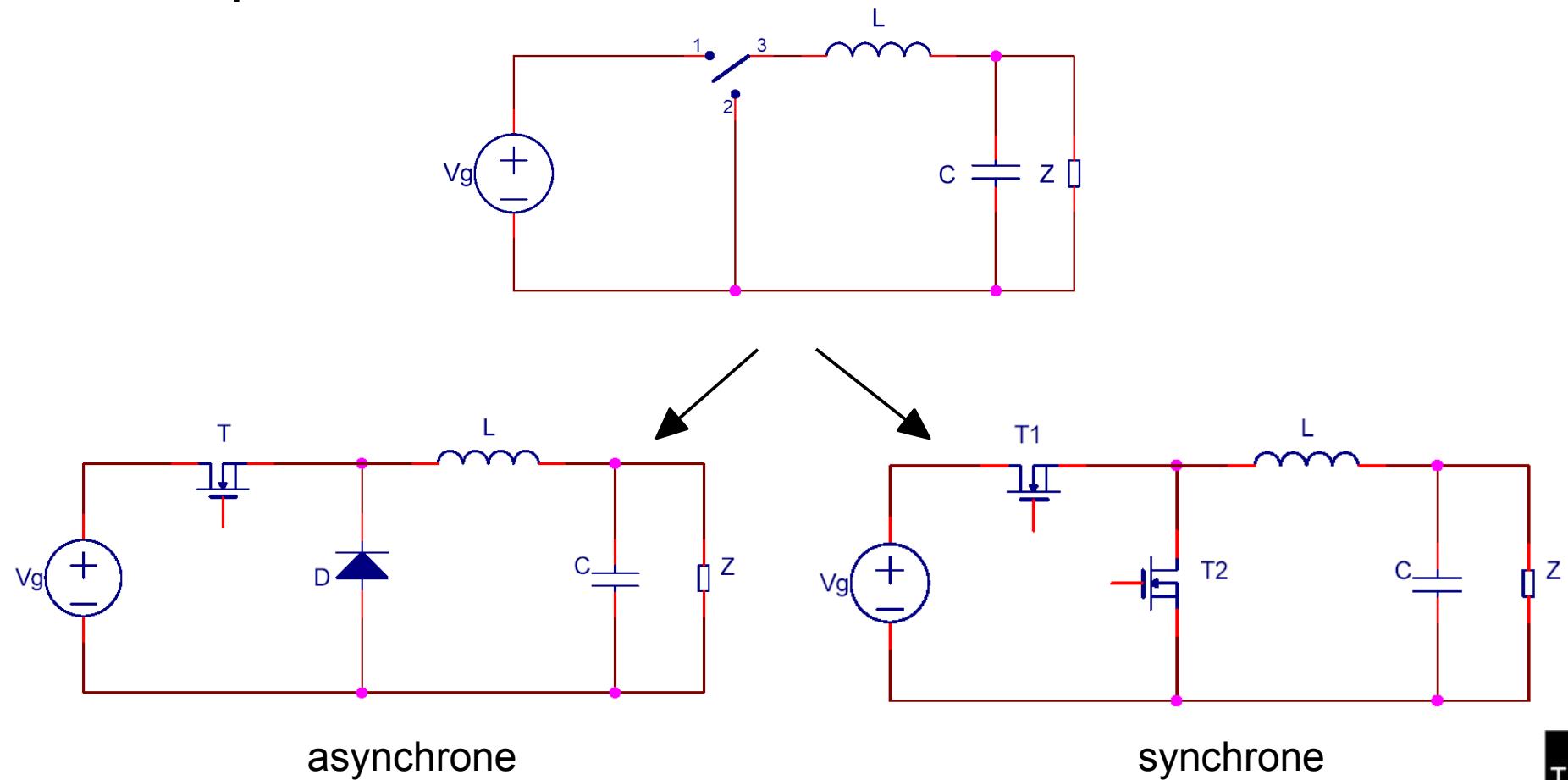
Buck-Boost
(non inverseur)



Alimentations à découpage

• Interrupteurs

- Selon les cas, deux possibilités : diode ou transistor.
- Exemple : buck





Alimentations à découpage

- **Synchrone**

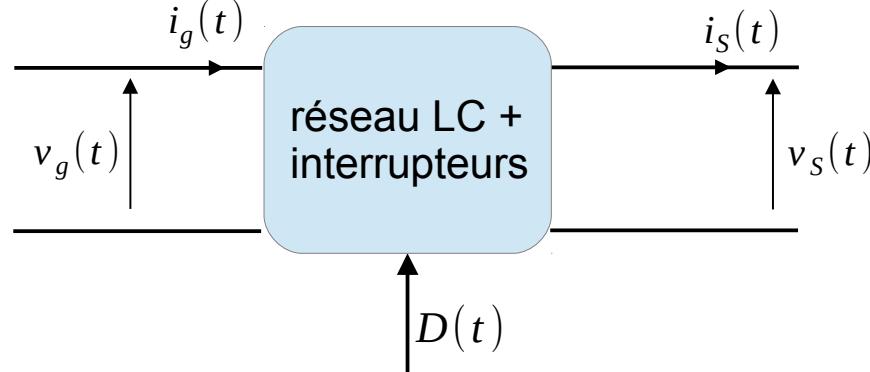
- plus cher,
- un seul mode de fonctionnement en 2 phases (CCM),
- rendement souvent meilleur.

- **Asynchrone**

- moins cher,
- fonctionnement radicalement différent :
 - parfois 3 phases au lieu de 2
 - → 2 modes : CCM et DCM
- rendement souvent moins bon que synchrone.

Contrôle des alimentations à découpage

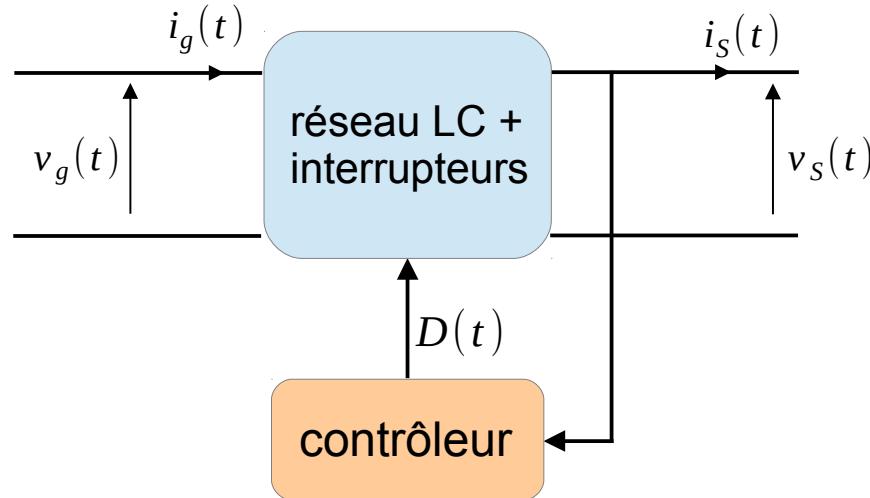
• Contrôle



- Dans les modèles vus, le rapport de transformation $M(D)$ ne dépend que de D , le rapport cyclique, pas de
 - la charge,
 - la fréquence de découpage,
 - la tension d'entrée,
 - la valeur des composants.
- En pratique (régime non permanent), on veut contrôler D de façon à rendre la tension de sortie V_s indépendante :
 - des variations de la tension d'entrée V_g ,
 - des variations du courant de sortie I_s ,
 - des variations de température, etc.

Contrôle des alimentations à découpage

• Contrôle



- Étude du système bouclé :
 - il faut connaître les caractéristiques dynamiques du convertisseur (AC),
 - étudier la réponse du système en boucle ouverte,
 - le modifier de façon à ce qu'en boucle fermée il soit stable.

Contrôle des alimentations à découpage

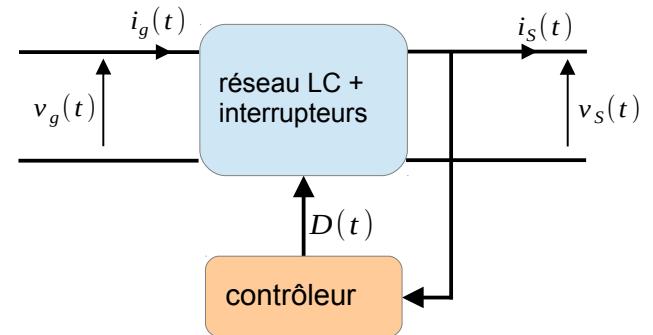
• Deux stratégies principales

• VCM (Voltage Control Mode)

- On compare à chaque cycle la tension de sortie V_s à une tension de référence interne précise, et on ajuste D en conséquence.
- Simple.
- « Difficile » à rendre stable.

• CCM (Current Control Mode)

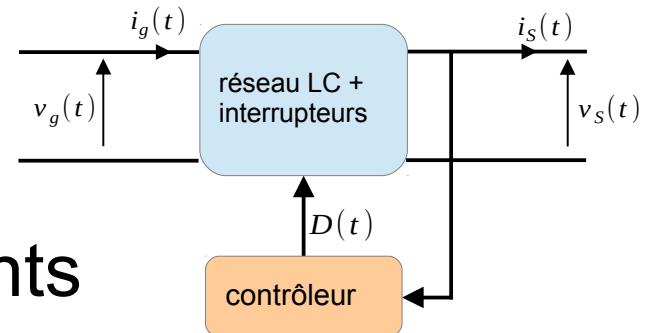
- On a deux boucle imbriquées : une interne rapide qui contrôle le courant dans l'inductance, et une externe plus lente similaire à celle du VCM.
- Plus complexe.
- Plus facile à stabiliser !



Contrôle des alimentations à découpage

- **Dans les deux cas :**

- La boucle de contre-réaction doit être stabilisé par ajout de composants externes, appelés « compensation ».
- La valeur de ces composants doit être calculée en fonction des paramètres de votre application.
 - → Ne jamais prendre les valeurs par défaut mises dans les datasheets !
 - Toujours faire des simulations et des tests.
- L'étude de la boucle et de sa compensation sera vue en détail en SE302.



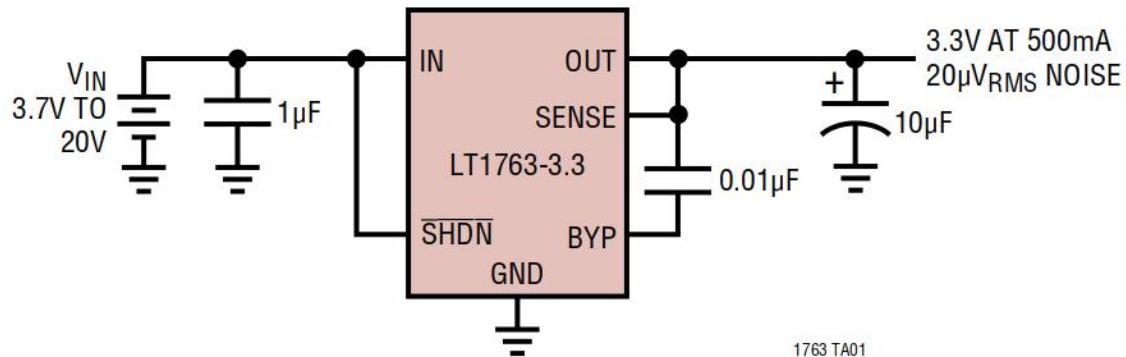
Conclusion

- Ce sont des régulateurs à très haut rendement, très pratiques pour l'ultra-basse consommation.
- Complexes à mettre en œuvre proprement mais le jeu en vaut la chandelle.
- Bien lire les datasheets pour :
 - le choix de l'inductance,
 - le choix des capacités,
 - le choix des composants pour la compensation,
 - les consignes de placement-routage.
- Simuler, tester.

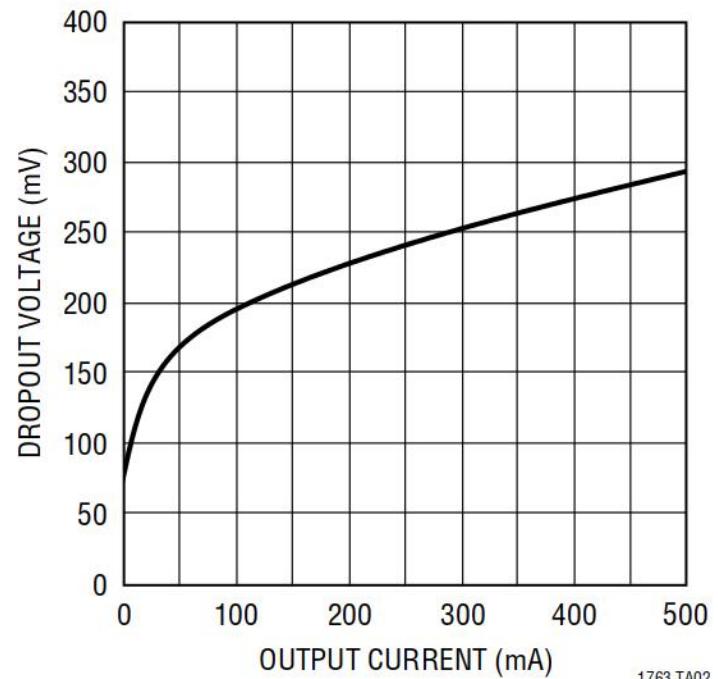
Exemples d'alimentations

Exemple : linéaire low-dropout (LT1763)

3.3V Low Noise Regulator

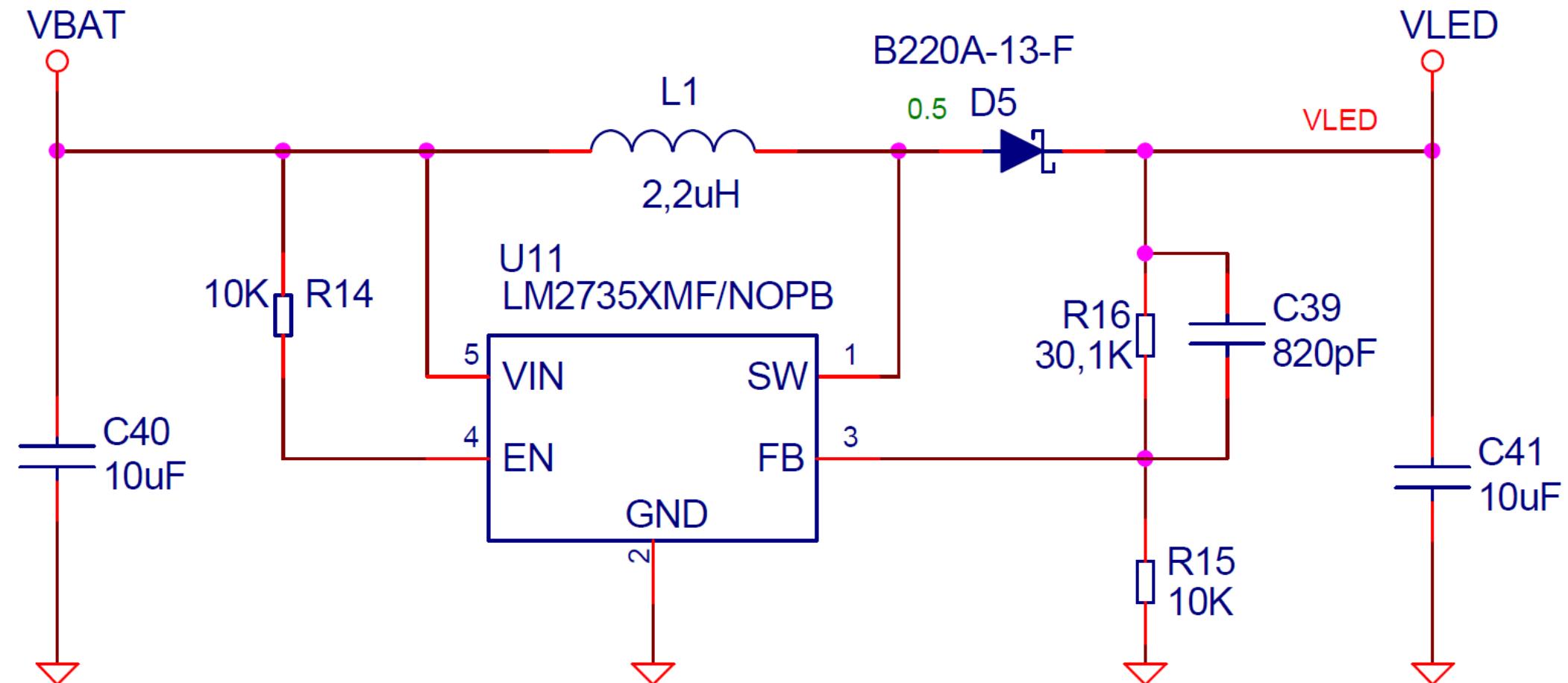


Dropout Voltage



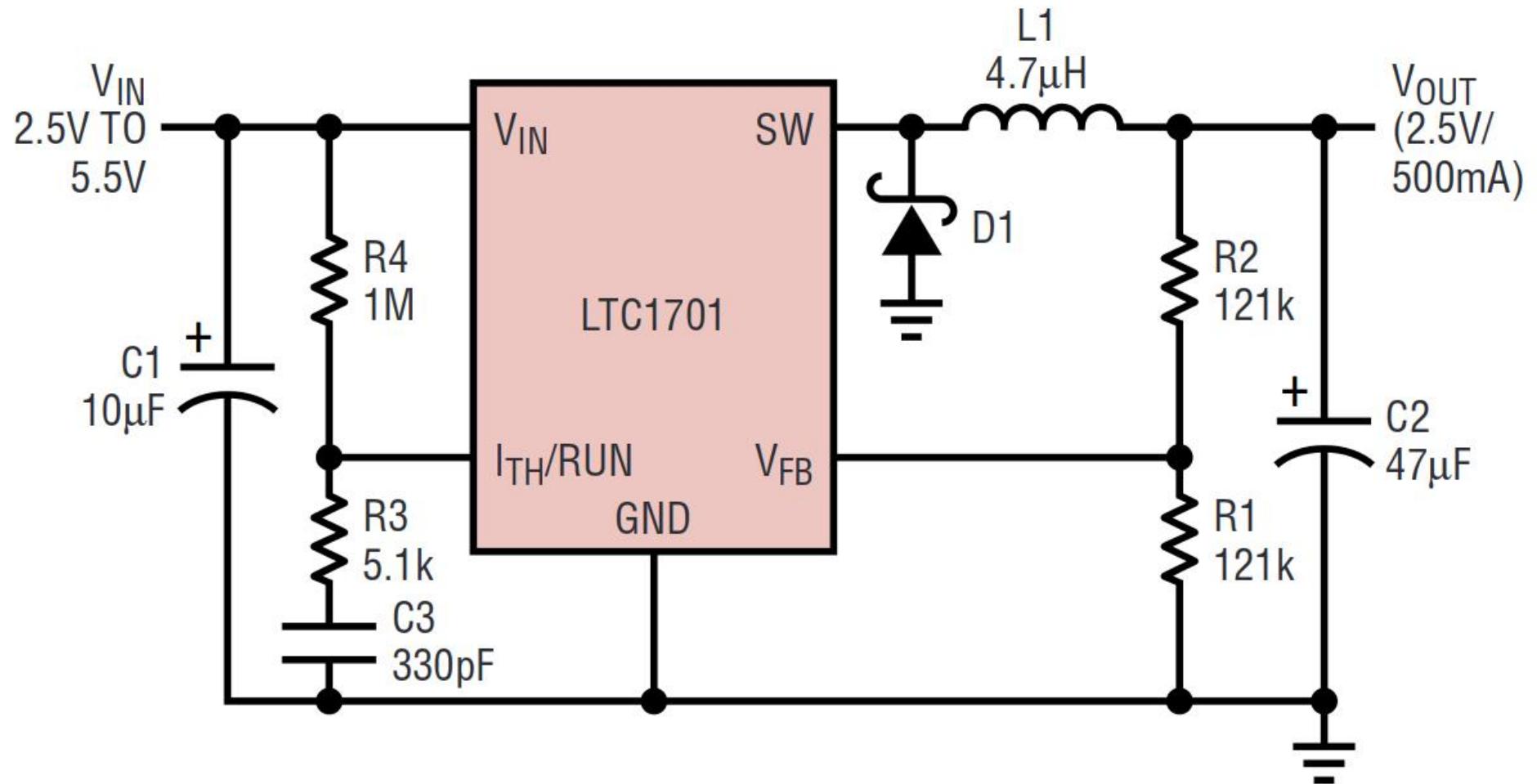
Exemples d'alimentations

- Exemple : boost (LM2735)



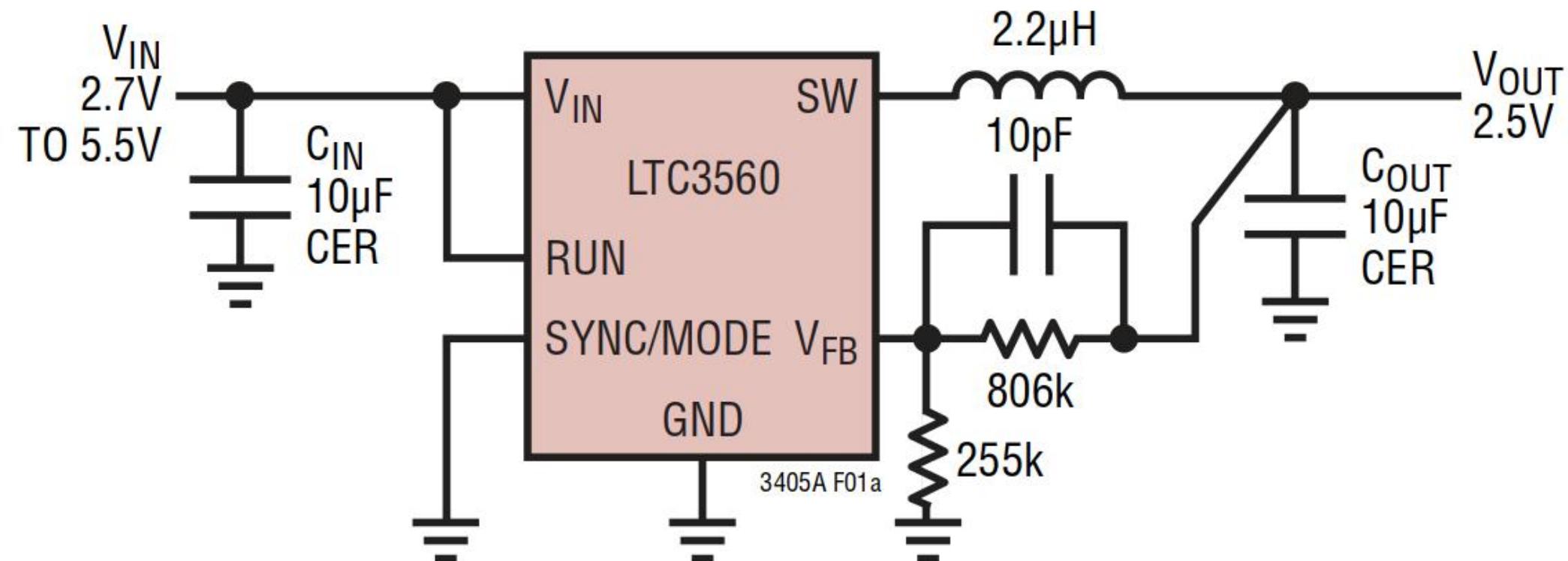
Exemples d'alimentations

- Exemple : buck asynchrone (LTC1701)



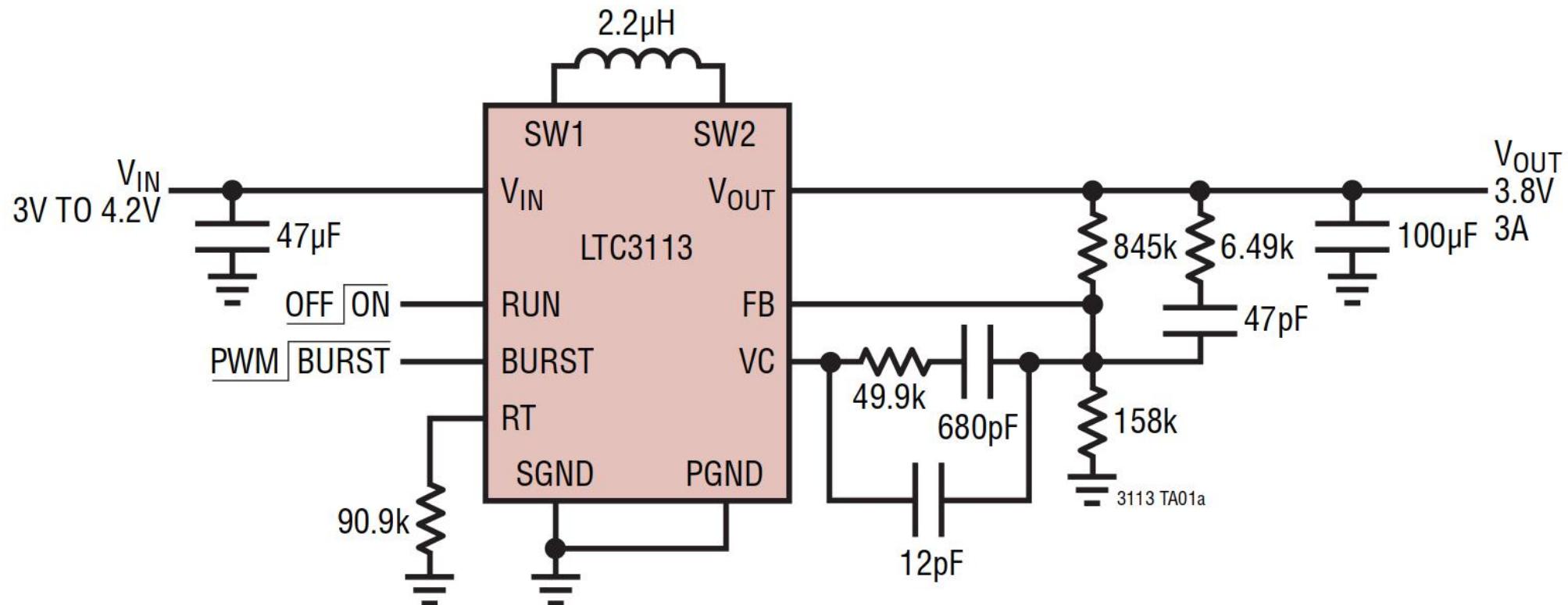
Exemples d'alimentations

- Exemple : buck synchrone (LTC3560)



Exemples d'alimentations

- Exemple : buck-boost (LTC3113)



Où en est-on ?



- **Les alimentations**
- **Ultra basse consommation**
 - « Typical numbers »
 - Capacité des batteries / IR
 - Optimisations matérielles
 - Optimisations mixtes
 - Optimisation logicielles

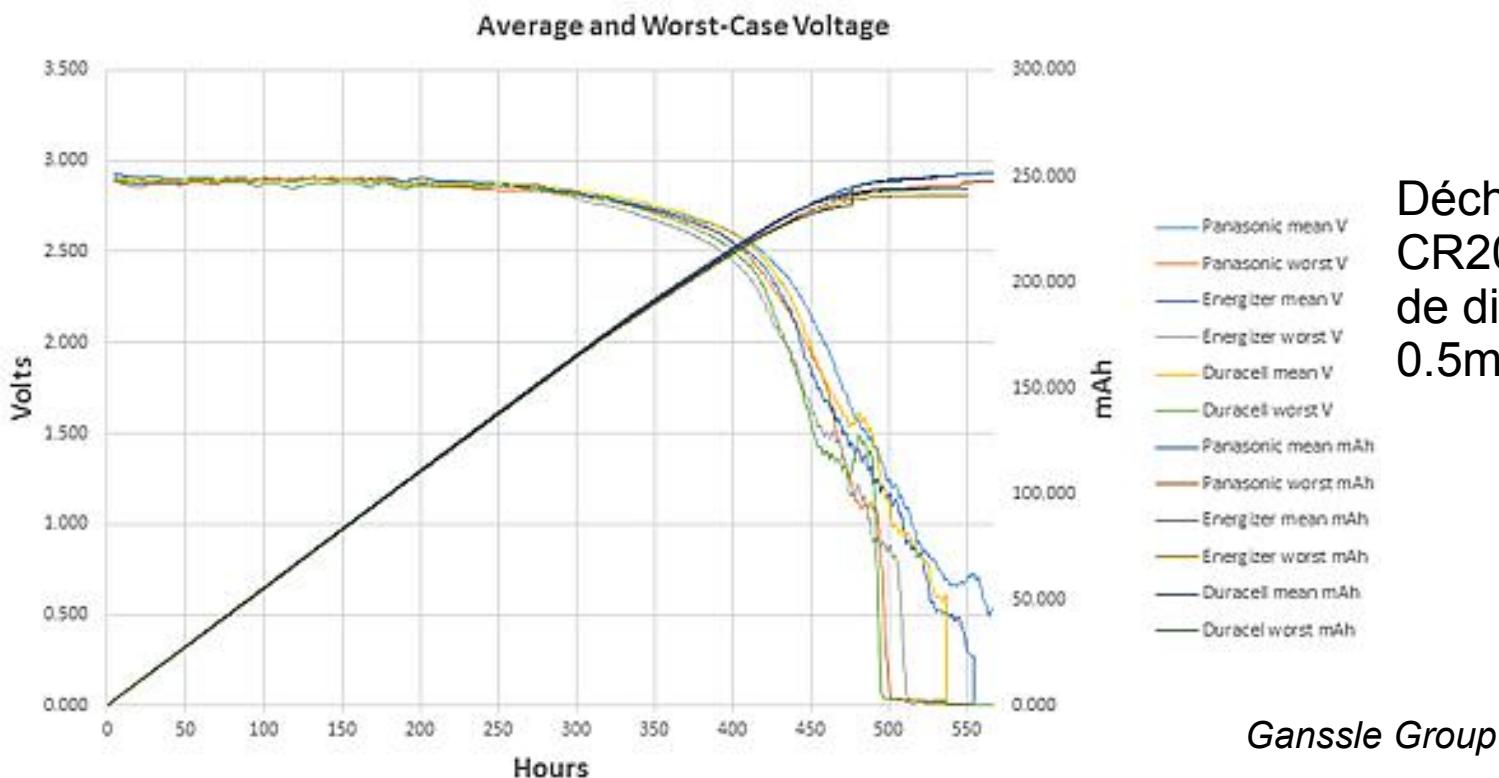
• Introduction

- Ère des objets connectés
 - Batteries : recharges les moins fréquentes possibles.
 - Piles : changements les moins fréquents possibles.
- Évolution :
 - Les microcontrôleurs consomment de moins en moins.
 - Les progrès sur les piles / batteries ne suivent pas.
 - Energy-harvesting
- Comment faire pour qu'un système consomme le moins possible ?

Piles CR2032

• Caractéristiques

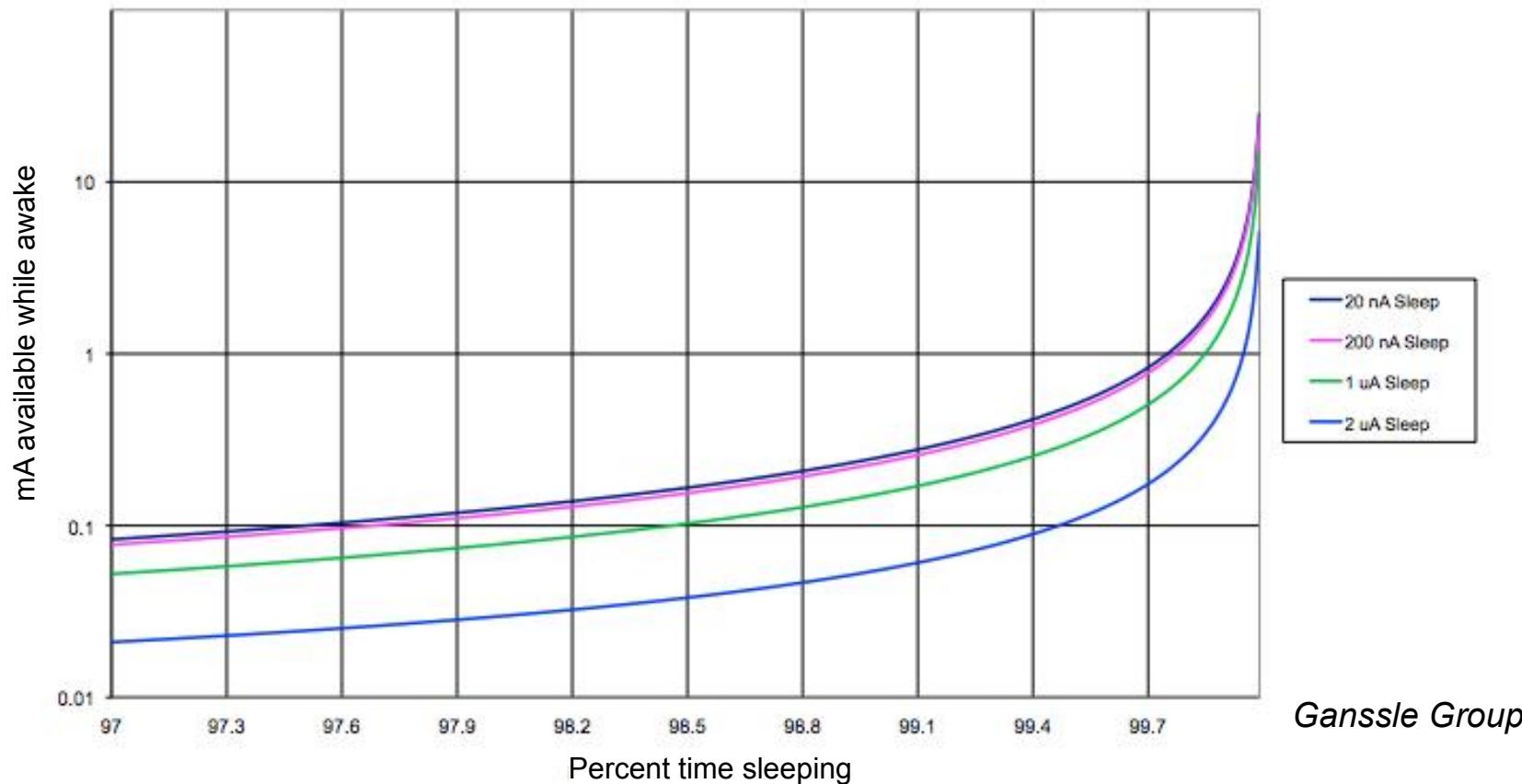
- Capacité d'environ 225mAh (à prendre avec des pincettes).
- Tension nominale : 3V.
- Tension de fin de vie : 2V.



Décharge de 42 piles CR2032 de différents lots de différents constructeurs à 0.5mA.

Piles CR2032

- 225mAh \Rightarrow pour durer 10 ans, un système ne doit pas consommer en moyenne plus de $2.5\mu\text{A}$.
 - Il passera donc la majorité de son temps en veille !
 - Quelle est l'influence du courant de veille sur le courant disponible pour faire un travail utile ?

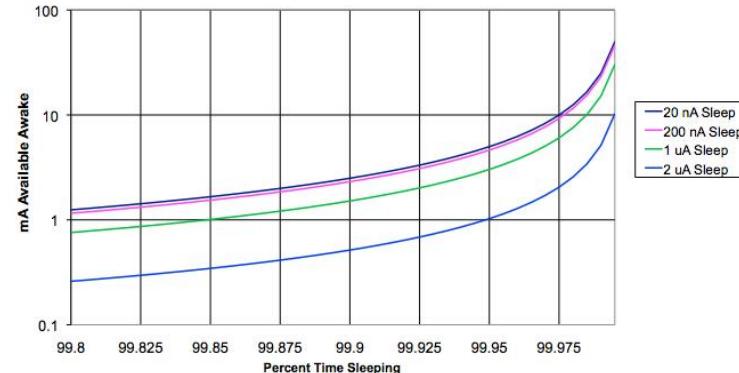


Ganssle Group

Piles CR2032

• Analyse :

- Le courant de veille est tellement faible, qu'entre deux systèmes consommant 20nA et 200nA en veille, la quantité de courant disponible pour faire du travail utile est quasiment la même tant qu'on dort au moins 95% du temps.
- Entre un système à 20nA et 1 μ A de veille, la différence est plus notable, mais moins qu'un facteur 5.



• Conclusion :

- Le courant de veille a une influence négligeable du moment qu'un système est en veille la plupart du temps.
- On s'attachera à ne jamais dépasser 2.5 μ A de courant de veille pour approcher le plus possible les 10 ans de vie.



Courant de veille

- Datasheets :

- Listent des valeurs typiques, minimales et maximale, le tout à différentes température.
- Que veulent dire ces nombres, lesquels prendre ?

- Exemples :

- Kinetis K60, Very-low-power stop mode current at 3.0 V
 - -40°C à 25°C : typical = 93µA, max = 435µA
 - 70°C : typical = 520µA, max = 2000µA
 - 105°C : typical = 1350µA, max = 4000µA
- Gecko EFM32ZG108, input leakage current :
 - typical = 0.1nA, max = 100nA
- STM32L151, current consumption in Stop mode
 - -40°C à 25°C : typical = 0.5µA, max = 2.2µA
 - 55°C : typical = 1.9µA, max = 5µA
 - 85°C : typical = 3.5µA, max = 8µA
 - 105°C : typical = 8.9µA, max = 20µA



Courant de veille

- Analyse :

- Entre le meilleur et le pire cas, on trouve souvent un facteur de 200 !
- La plupart des paramètres ne donnent pas de valeur maximale, juste des valeurs typiques.

- Que veut dire « typique » ?

- ST : *Unless otherwise specified, typical data are based on $TA = 25^{\circ}\text{C}$, $VDD = 3.6\text{ V}$ (for the $1.65\text{ V} \leq VDD \leq 3.6\text{ V}$ voltage range). They are given only as design guidelines and are not tested.*
- Kinetis : *Typical values are provided as design guidelines and are neither tested nor guaranteed.*
- Gecko : *The typical data are based on $\text{TAMB}=25^{\circ}\text{C}$ and $\text{VDD}=3.0\text{V}$, as defined in Table 3.2(p.8), by simulation and/or technology characterisation unless otherwise specified.*

Courant de veille

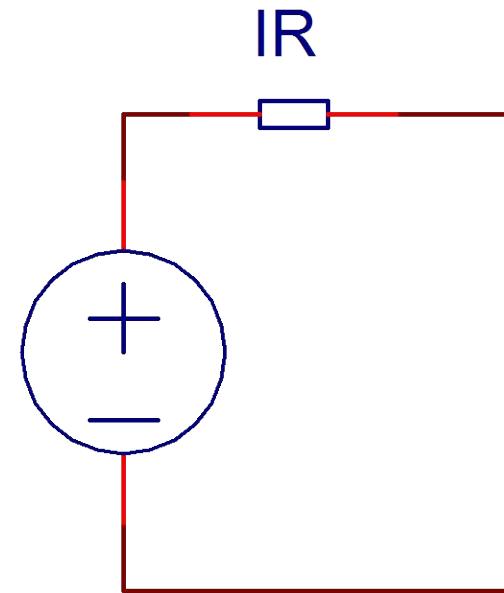
• Que veut dire « maximal » ?

- ST : Unless otherwise specified the minimum and maximum values are guaranteed in the worst conditions of ambient temperature, supply voltage and frequencies by tests in production on 100% of the devices with an ambient temperature at $TA = 25^{\circ}\text{C}$ and $TA = \text{TMax}$ (given by the selected temperature range).
Data based on characterization results, design simulation and/or technology characteristics are indicated in the table footnotes and are not tested in production. Based on characterization, the minimum and maximum values refer to sample tests and represent the mean value plus or minus three times the standard deviation ($\text{mean} \pm 3\sigma$).
- Gecko : The minimum and maximum values represent the worst conditions of ambient temperature, supply voltage and frequencies, as defined in Table 3.2 (p.8), by simulation and/or technology characterisation unless otherwise specified.
- Kinetis : The maximum values stated in the following table represent characterized results equivalent to the mean plus three times the standard deviation (mean + 3 sigma).

- Conclusion :
 - Valeurs typiques : ne veulent **RIEN** dire !
 - Seules les valeurs minimales et maximales sont des garanties, et encore... lire les restrictions à la fin des datasheets !
- Alors comment faire ?
 - Insister auprès des fournisseurs pour avoir des chiffres précis.
 - Mesurer plusieurs lots achetés chez des fournisseurs différents.

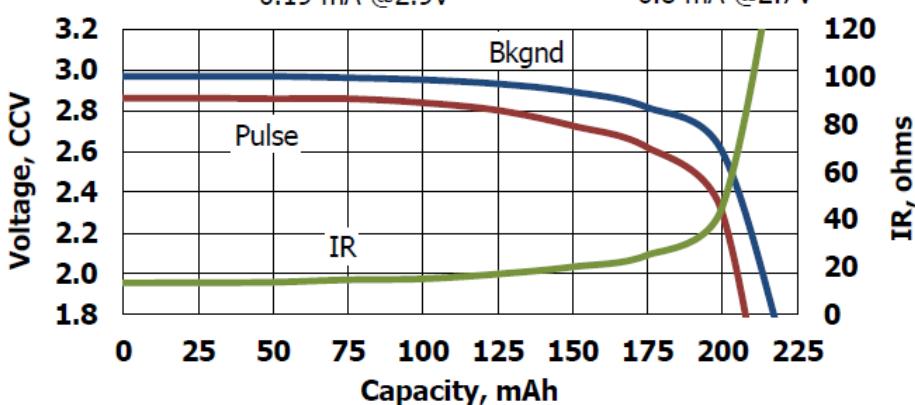
Retour sur les piles CR2032

- Modélisation
 - générateur de tension de 3V
 - résistance interne IR
 - environ 15 ohms à vide
 - variable lors de la vie de la batterie
- En réalité, pulse discharge :



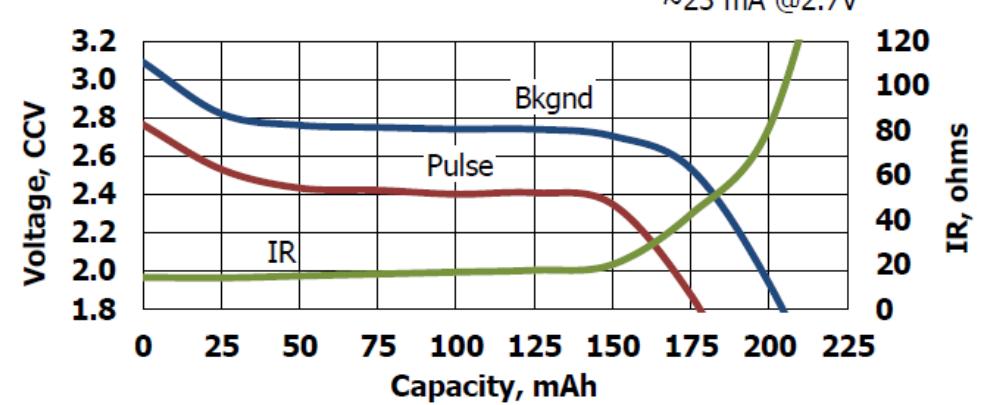
Bkgnd Drain: Continuous
21°C (70°F) 15K ohms
0.19 mA @2.9V

Pulse Drain: 2 seconds X 12 times/day
400 ohms
~6.8 mA @2.7V



Bkgnd Drain: None
21°C (70°F)

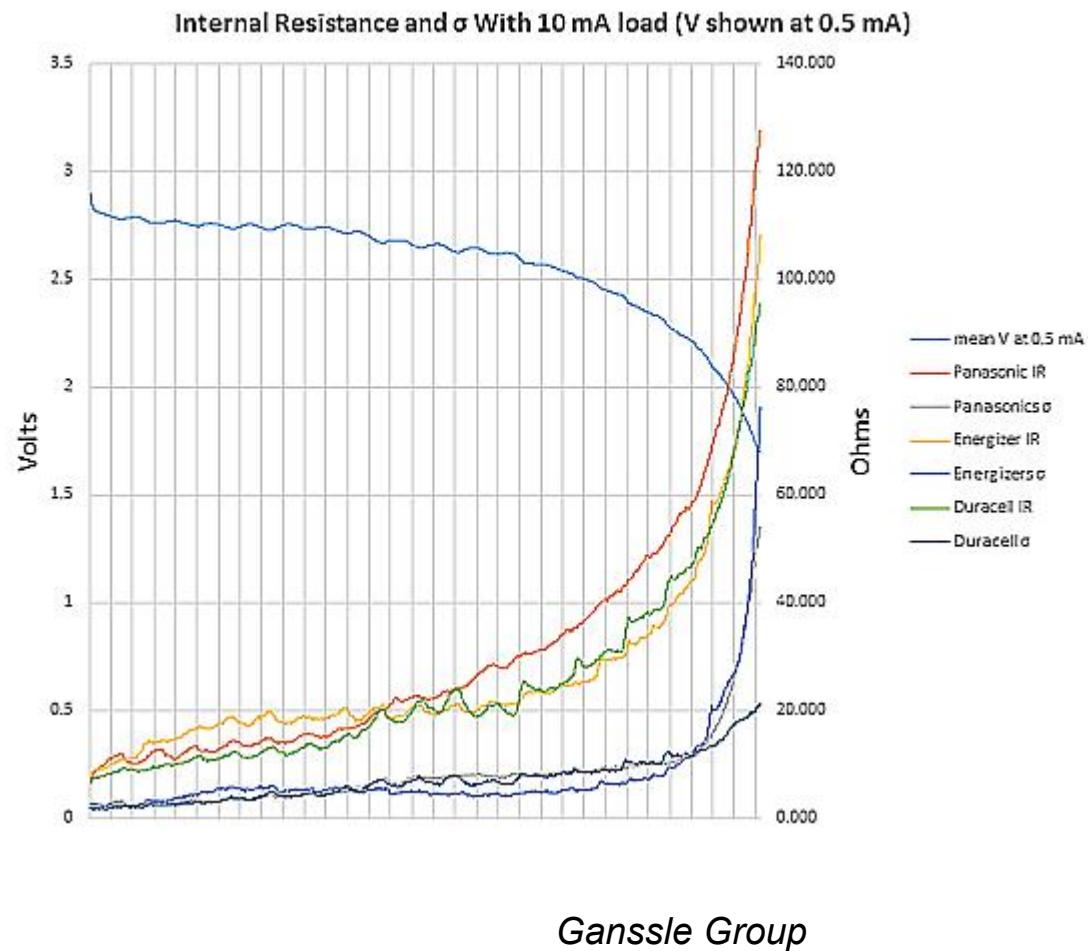
Pulse Drain: 1mSec ON / 14mSec OFF
120 ohms
~23 mA @2.7V



Energizer

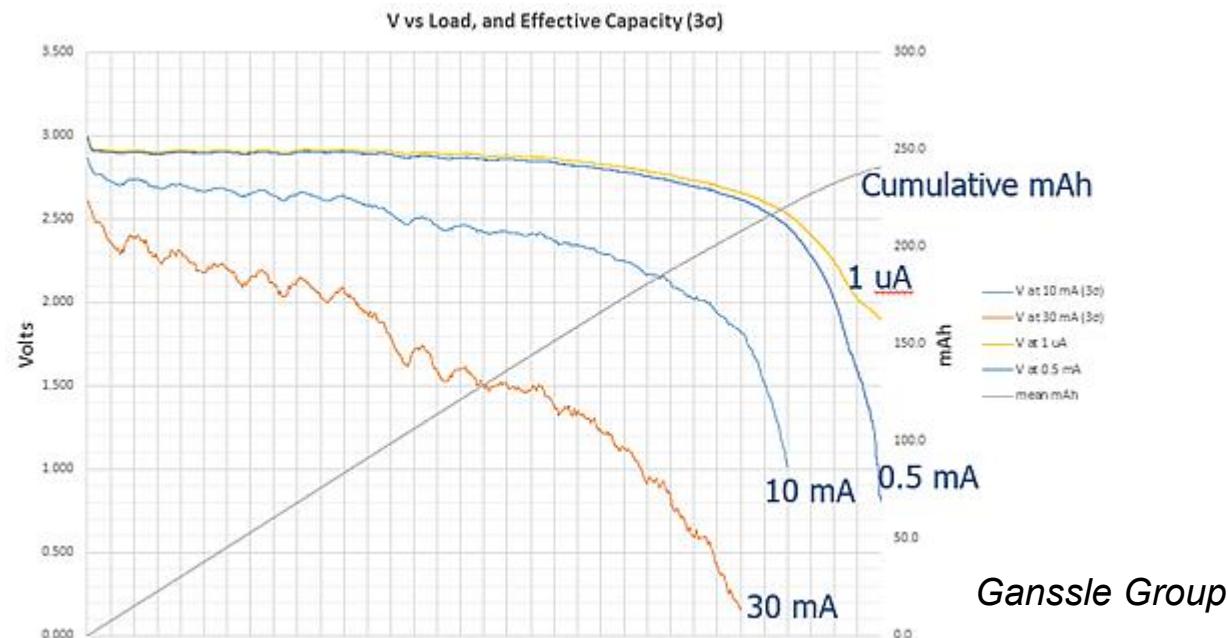
Retour sur les piles CR2032

- Décharge à 10mA sur 3 modèles



Retour sur les piles CR2032

- Capacité réelle de la batterie



- Consommation d'un STM32L151 : 9.2mA @ 32MHz
- Consommation d'un nRF51822 :
 - CPU + flash : 4.1mA @ 16MHz
 - TX BLE : 16mA @0dB
 - RX BLE : 13mA
 - ⇒ plus que 30% de la capacité « normale » de la batterie !

Retour sur les piles CR2032

Conclusion

- Les capacités des batteries sont données pour un certain courant de décharge (très faible).
- Au-delà :
 - la capacité réelle de la batterie chute énormément,
 - la résistance interne de la batterie augmente énormément.
- Bien lire les datasheets des piles !
- Ne pas acheter de piles dont on ne connaît pas les caractéristiques exactes.

Optimisation matérielle

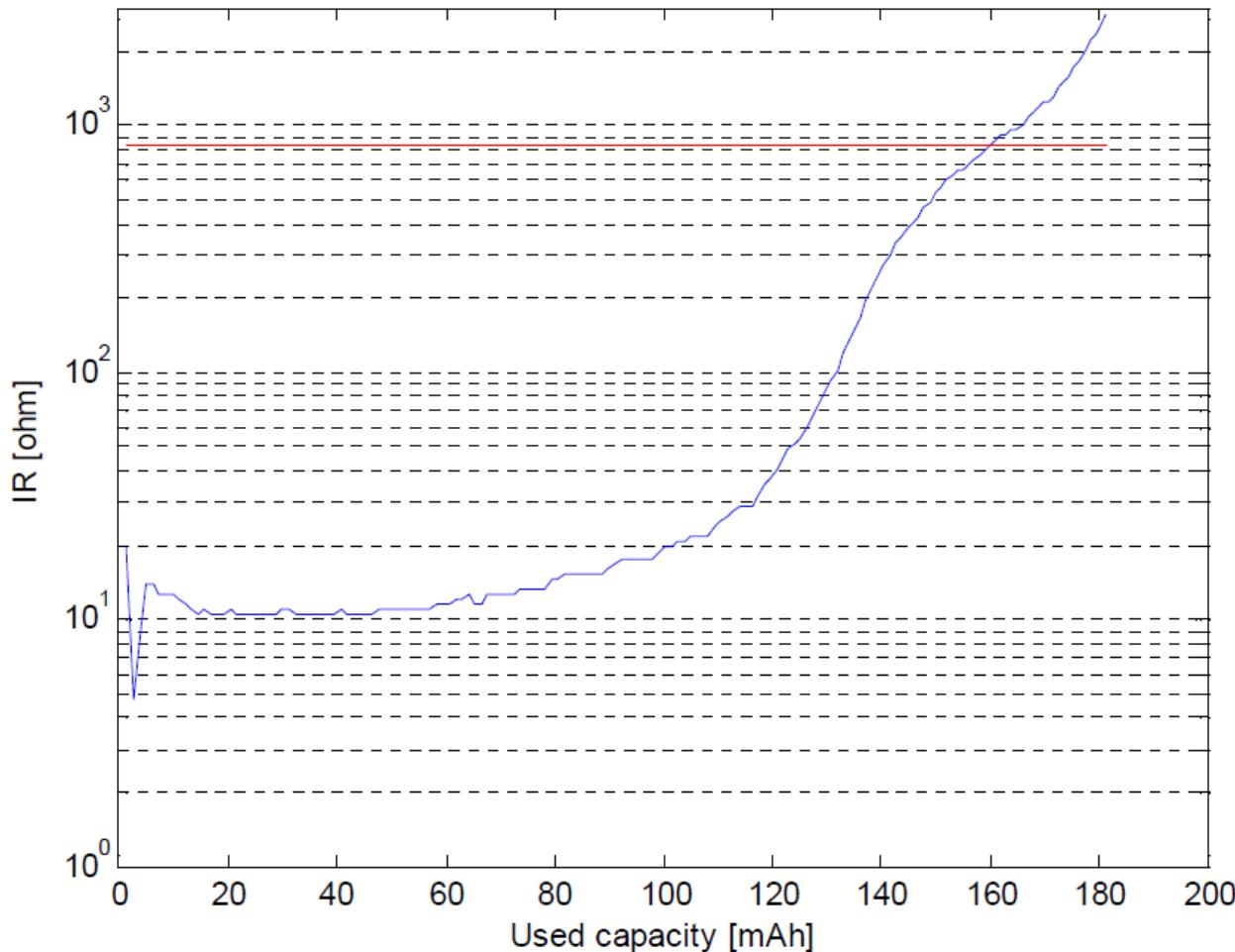
- Humidité, saleté, graisse, sel.
 - Ne croyez pas les légendes urbaines, mesurez !
 - Mesures du Ganssle Group avec et sans soldermask pour des pistes de 1cm de long.

	Fuite sur 1cm sans Solder Mask	Fuite sur 1cm avec Solder Mask
Humidité relative ambiante 80 %	0.02 μ A	trop faible
Crème pour les mains !	0.18 μ A	trop faible
Graisse des doigts	<0.008 μ A	trop faible
Graisse des doigts à 80% d'humidité relative	0.065 μ A	trop faible
Sel sec	0.05 nA	trop faible
Sel à 80% d'humidité relative	2 μ A	trop faible
Rosine	0.002 μ A	-

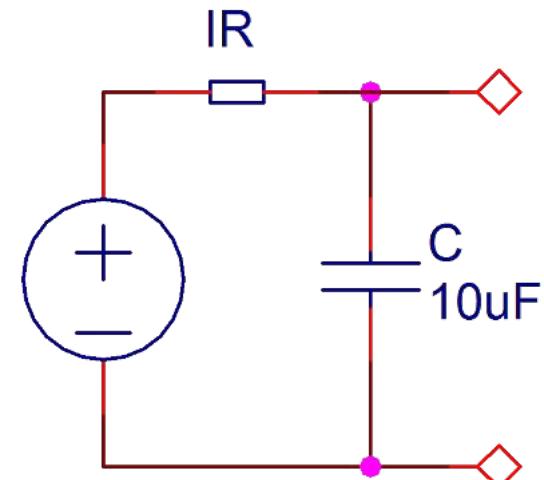
Optimisation matérielle

• Capacités de découplage

- Permettent de fournir des pointes de courant que l'alimentation ne pourrait pas fournir.



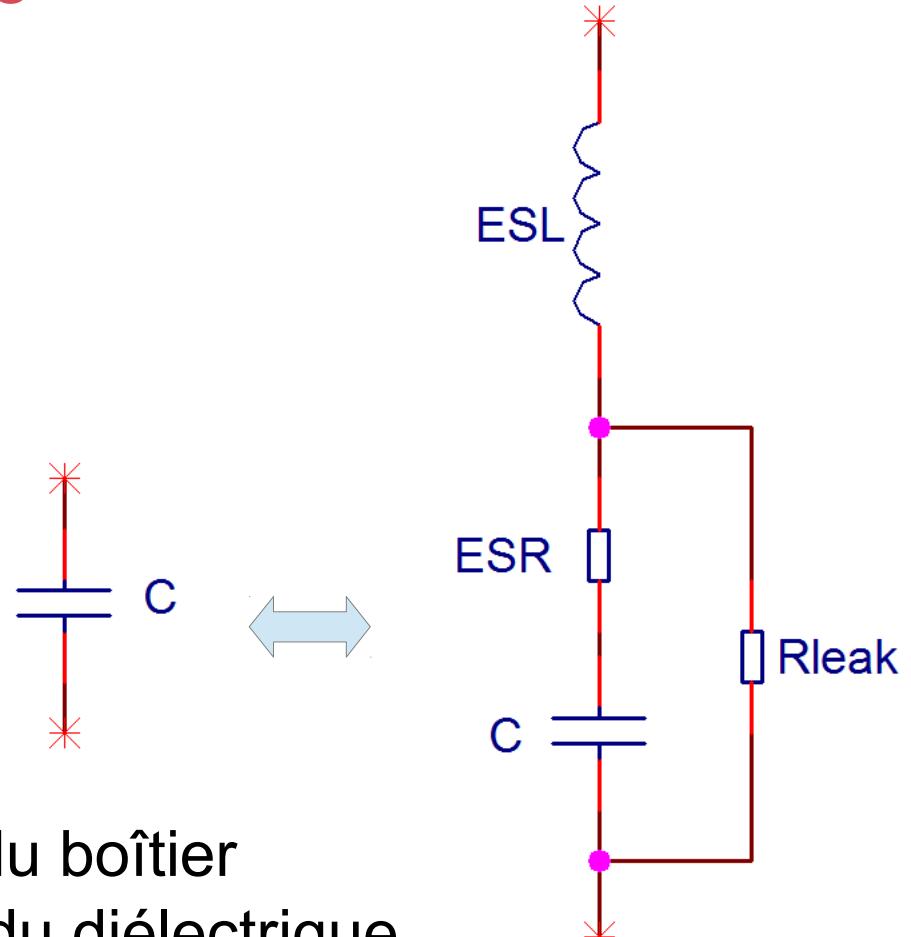
source : TI



Optimisation matérielle

- Capacités de découplage

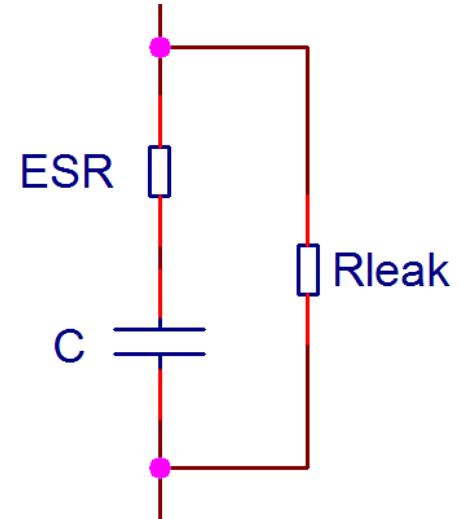
- ont des éléments parasites
 - résistance série : ESR
 - résistance de fuite : Rleak
 - inductance série : ESL



- ESL : dépend principalement du boîtier
- ESR : dépend principalement du diélectrique
- Rleak : dépend principalement du diélectrique et du boîtier

Optimisation matérielle

- Courant de fuite (leakage)
 - Varie comme la taille du boîtier.
 - Généralement donnée en Ohms.Farad.
- Diélectriques communs
 - Électrolytiques : courant de fuite énorme.
 - Tantales : courant de fuite grand.
 - Céramiques : courant de fuite faible.
- Le courant de fuite varie en fonction :
 - du temps,
 - de la tension à laquelle la capacité est utilisée.



Optimisation matérielle

- Électrolytiques (Kemet 180CPS)

ELECTRICAL DATA AND ORDERING INFORMATION							
U _R (V)	C _R (μ F)	NOMINAL CASE SIZE L x W x H (mm)	I _R 105 °C 100 kHz (mA)	I _{L2} 2 min (μ A)	tan δ 100 Hz	Z 100 kHz 20 °C (Ω)	ORDERING CODE
16	39	5.3 x 5.3 x 5.7	2350	300	0.12	0.020	97501E3
	39	6.6 x 6.6 x 5.9	2460	300	0.12	0.024	97502E3
	68	6.6 x 6.6 x 5.9	2440	300	0.12	0.025	97503E3
	100	6.6 x 6.6 x 5.9	2490	320	0.12	0.024	97504E3
	150	8.4 x 8.4 x 6.7	3220	500	0.12	0.022	97505E3
	220	10.4 x 10.4 x 7.7	3450	704	0.12	0.022	97506E3
	270	8.4 x 8.4 x 12	4850	864	0.15	0.012	97507E3
	330	10.4 x 10.4 x 12.6	5300	1056	0.15	0.012	97508E3
	470	10.4 x 10.4 x 12.6	6100	1504	0.15	0.010	97509E3
20	820	10.4 x 10.4 x 12.6	5400	2624	0.12	0.012	97511E3
	120	6.6 x 6.6 x 5.9	3200	480	0.12	0.025	97201E3
	390	8.4 x 8.4 x 12	4950	1560	0.12	0.014	97202E3
	560	10.4 x 10.4 x 12.6	5600	2240	0.12	0.012	97203E3

Optimisation matérielle

- Tantale

Rated Voltage	Rated Capacitance	Case Code/Case Size	KEMET Part Number	DC Leakage	DF	Standard ESR		Low ESR		Maximum Operating Temp
VDC at 85°C	µF	KEMET/EIA	(See below for part options)	µA at +25°C Maximum/ 5 Minutes	% at +25°C 120 Hz Maximum	mΩ at +25°C 100 kHz Maximum	E-Spec Code	mΩ at +25°C 100 kHz Maximum	E-Spec Code	°C
6.3	10	B/3528-21	T489B106(1)006A(2)	0.5	6.0	3000	E3K0			125
6.3	15	A/3216-18	T489A156(1)006A(2)	0.7	6.0	2030	E2K0			125
6.3	22	C/6032-28	T489C226(1)006A(2)	1.0	6.0	2000	E2K0			125
6.3	47	B/3528-21	T489B476(1)006A(2)	2.2	6.0	1620	E1K6			125
6.3	150	B/3528-21	T489B157(1)006A(2)	7.1	15.0	3000	E3K0			125
6.3	100	C/6032-28	T489C107(1)006A(2)	4.7	6.0	440	E440			125
6.3	150	C/6032-28	T489C157(1)006A(2)	7.1	8.0	500	E500			125
6.3	100	D/7343-31	T489D107(1)006A(2)	4.7	8.0	800	E800			125
6.3	150	D/7343-31	T489D157(1)006A(2)	7.1	6.0	400	E400			125
6.3	220	D/7343-31	T489D227(1)006A(2)	10.4	8.0	360	E360			125
6.3	470	X/7343-43	T489X477(1)006A(2)	22.2	8.0	250	E250			125
6.3	680	X/7343-43	T489X687(1)006A(2)	32.1	15.0	600	E600			125

source : Kemet

Optimisation matérielle

- Céramiques multilayers (MLCC)

EIA Case Size	1,000 Megohm Microfarads or 100 GΩ	100 Megohm Microfarads or 10 GΩ
0603	N/A	All
0805	< 0.0039 µF	≥ 0.0039 µF
1206	< 0.012 µF	≥ 0.012 µF
1210	< 0.033 µF	≥ 0.033 µF
1808	< 0.018 µF	≥ 0.018 µF
1812	< 0.027 µF	≥ 0.027 µF
≥ 1825	All	N/A

source : Kemet

Vendor	Dielectric	Leakage spec	100 uF leakage at 3 V	% of total available power consumed by the cap
TDK	Y5V	100 ohm-farad	3.0 uA	120%
Kemet	Y5V	50 ohm-farad	6.0 uA	240%
AVX	X7R	1000 ohm-farad	0.3 uA	12%
Kemet	X7R	500 ohm-farad	0.6 uA	24%
Samsung	X7R	100 ohm-farad	3.0 uA	120%

source : Ganssle Group

- Attention à la température et à la tension de fonctionnement !



Optimisation matérielle

- LED

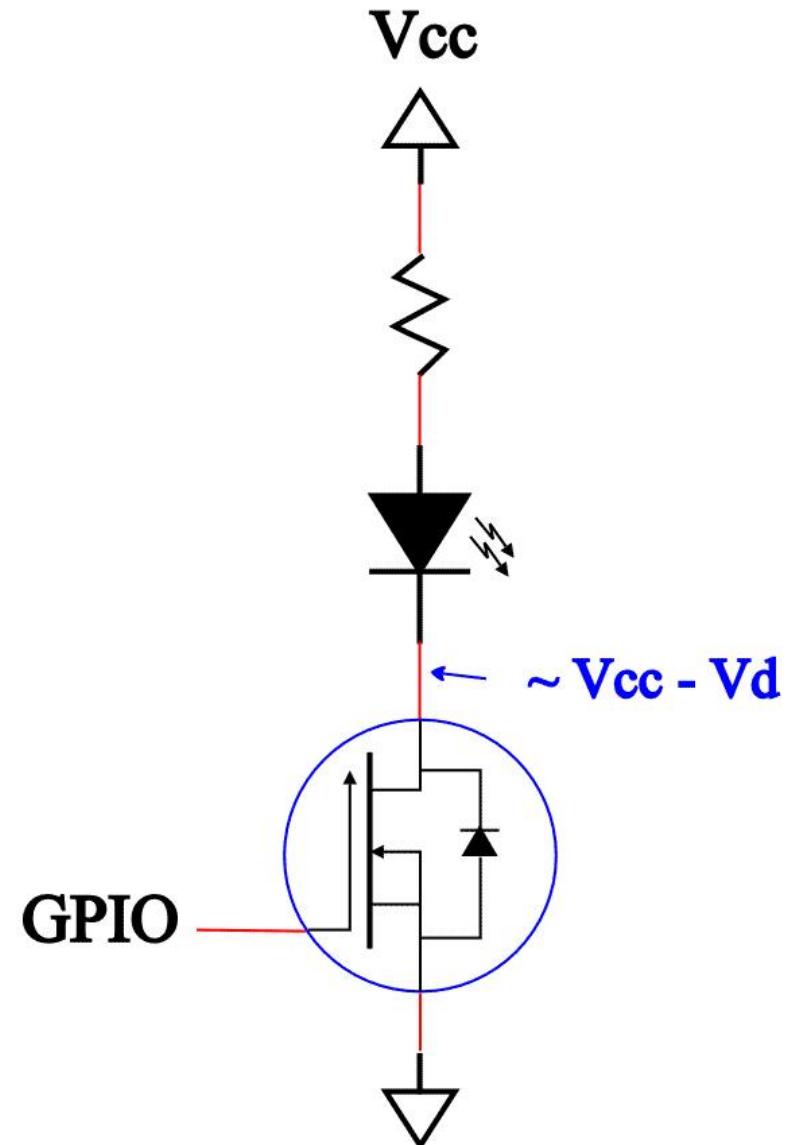
- Les LED sont spécifiées pour un courant maximum, souvent beaucoup plus grand que nécessaire.

- Optimisation

- LED haute luminosité
 - PWM
 - 50% = 50% de gagné,
 - flash : quelques millisecondes suffisent.
 - Éviter de piloter des LEDs par des GPIO :
 - les piloter à travers un transistor MOS.

Optimisation matérielle

- LED

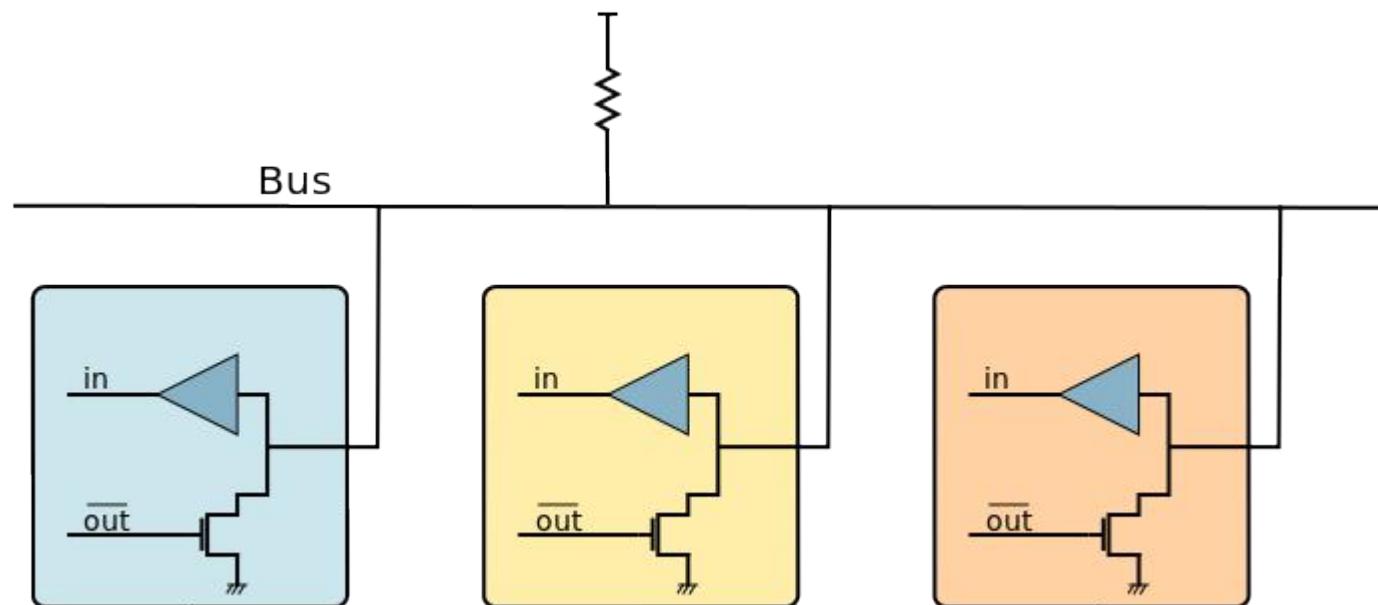


source : cMicroTek

Optimisation matérielle

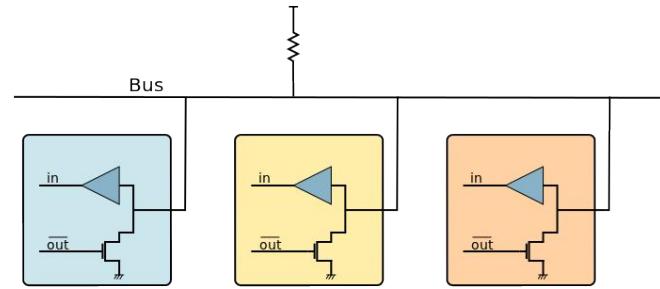
- Transactions bidirectionnelles

- drivers open drain (collecteur ouvert)
 - Évite, par construction, les court-circuits.
 - AND câblé.
 - Nécessite une résistance de rappel (pull-up)



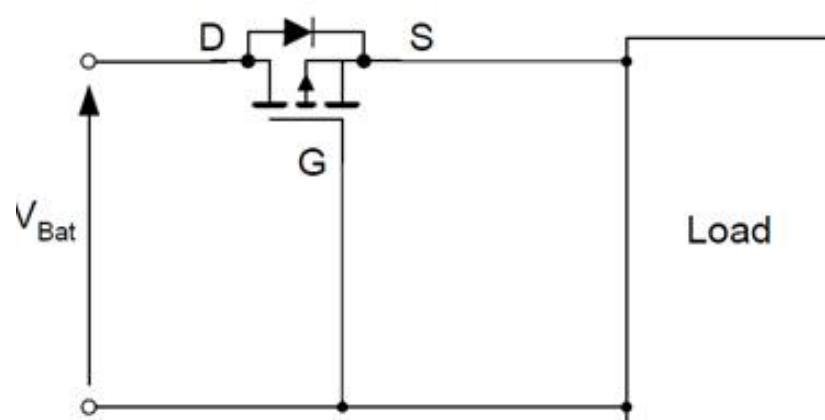
Optimisation matérielle

- Quelle valeur pour les pull-up ?
 - valeur minimale : courant admissible dans les drivers,
 - valeur maximale : rapidité des fronts.
- Attention :
 - un pull-up de 10k @ 3V consomme 300 μ A !
 - un pull-up de 100k @ 3V consomme 30 μ A !
- Conclusion :
 - éviter les pull-up / pull-down,
 - préférer des bus sans pull-up : SPI, UART, ...



Optimisation matérielle

- Protection contre l'inversion des batteries
 - Usuellement : diode schottky.
 - Mais tension de seuil souvent trop grande : 0.15 à 0.4V
- Solutions :
 - utilisation d'un PMOS en « diode idéale »



- utiliser un boîtier anti-inversion



Optimisation matérielle

• Bien choisir son alimentation

- Régulateurs à découpage :
 - Rendement excellent, sauf pour certaines topologies si courant faible.
 - Parfois mode spécial « courant de sortie faible »
 - Nécessitent une capacité d'entrée pour lisser les appels de courant
 - leakage
 - pointe de courant : IR augmente considérablement
- Régulateurs linéaires :
 - Rendement moins bon
 - Ne nécessitent pas de capacité en entrée
- Pas de régulateur
 - Beaucoup de circuits basse consommation acceptent des tensions d'entrée de 3.3V à 2.2V → ok pour une pile bouton !
- Conclusion : tester !

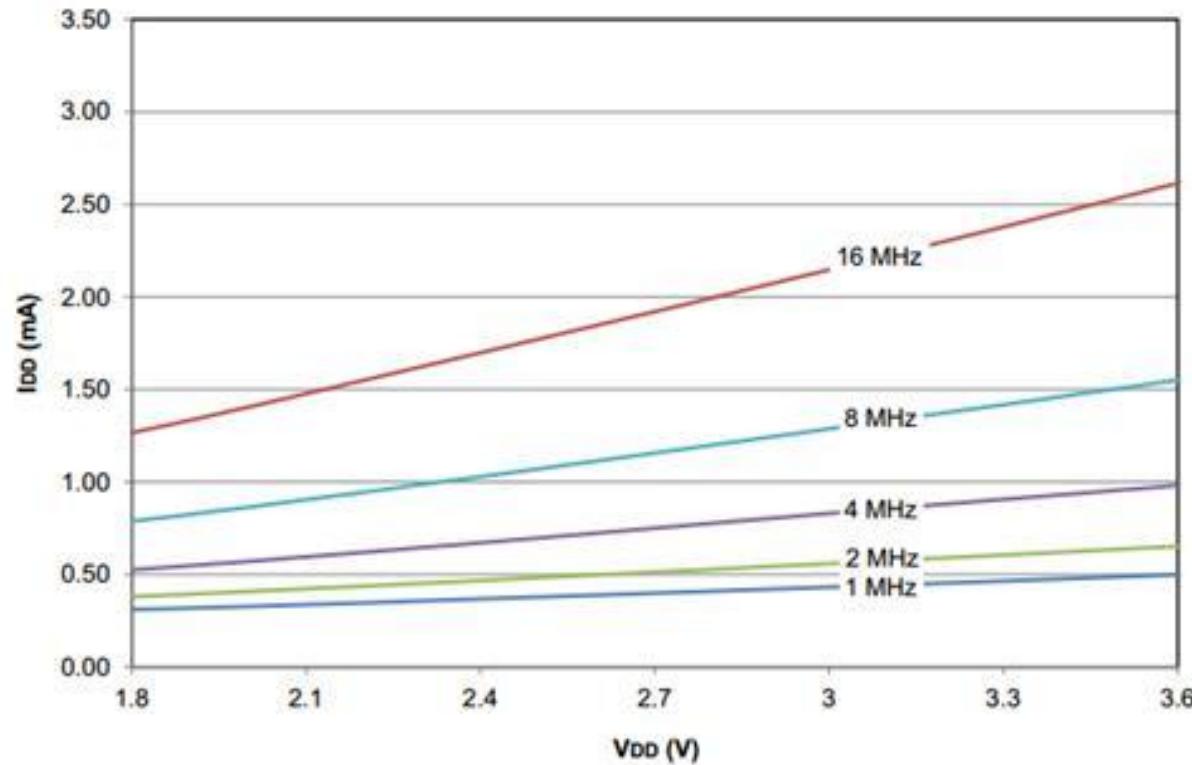


Optimisation matérielle

- Éteindre les circuits qui ne servent à rien
 - Utiliser les enables si on en a à sa disposition.
- Implémenter un dispositif de coupure d'alimentation sinon
 - Attention à ne pas envoyer de tension sur une broche d'un circuit non alimenté.
 - Attention aux capacités de découplage qui peuvent maintenir un circuit en semi-vie erratique : prévoir un circuit de décharge rapide.
- Utiliser les fonctions low-power des périphériques
 - Exemple : IMU / accéléromètres

Optimisation mixte

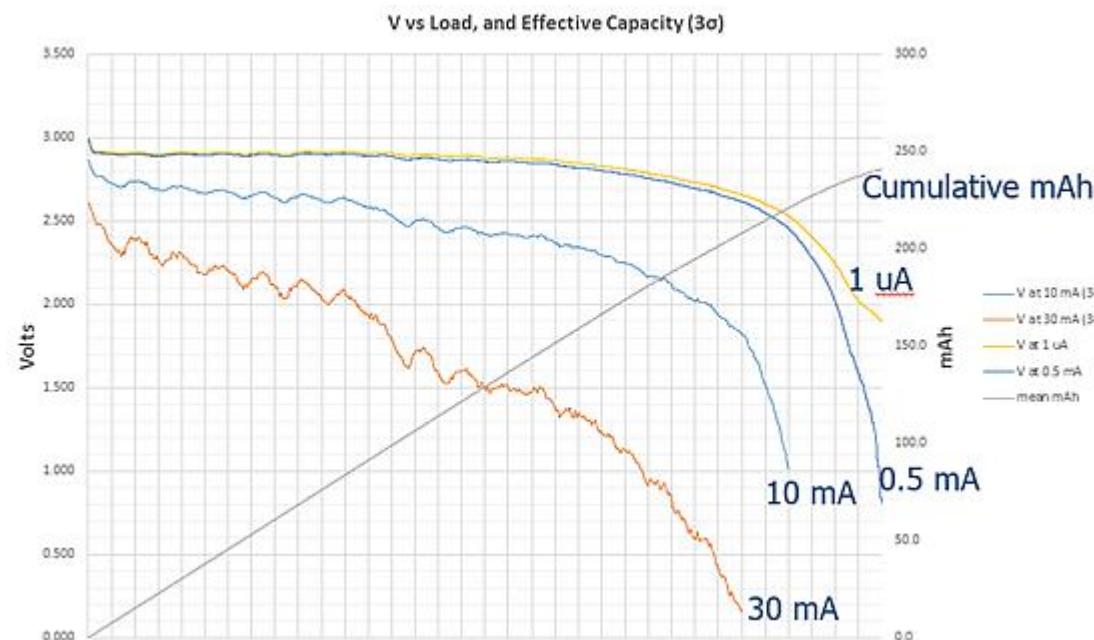
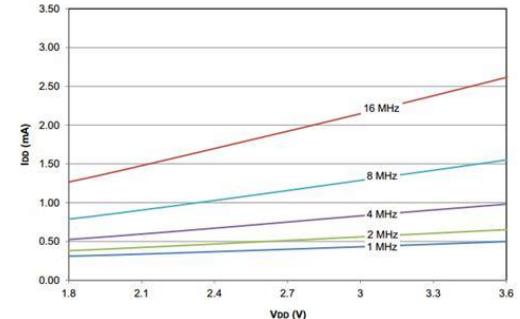
- Consommation théorique d'un circuit CMOS : $P \propto F \cdot C \cdot V^2$
 - Néglige la consommation statique.
 - En pratique : (MCU Microchip low power)



Optimisation mixte

- Conclusion naïve :

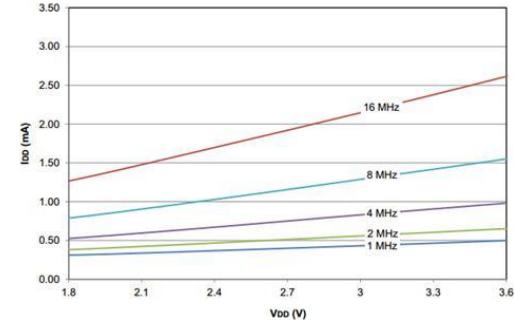
- Travailler à la fréquence la plus haute possible pour que ça dure le moins de temps possible.
- Oui mais non... Rappel : IR de la batterie



Optimisation mixte

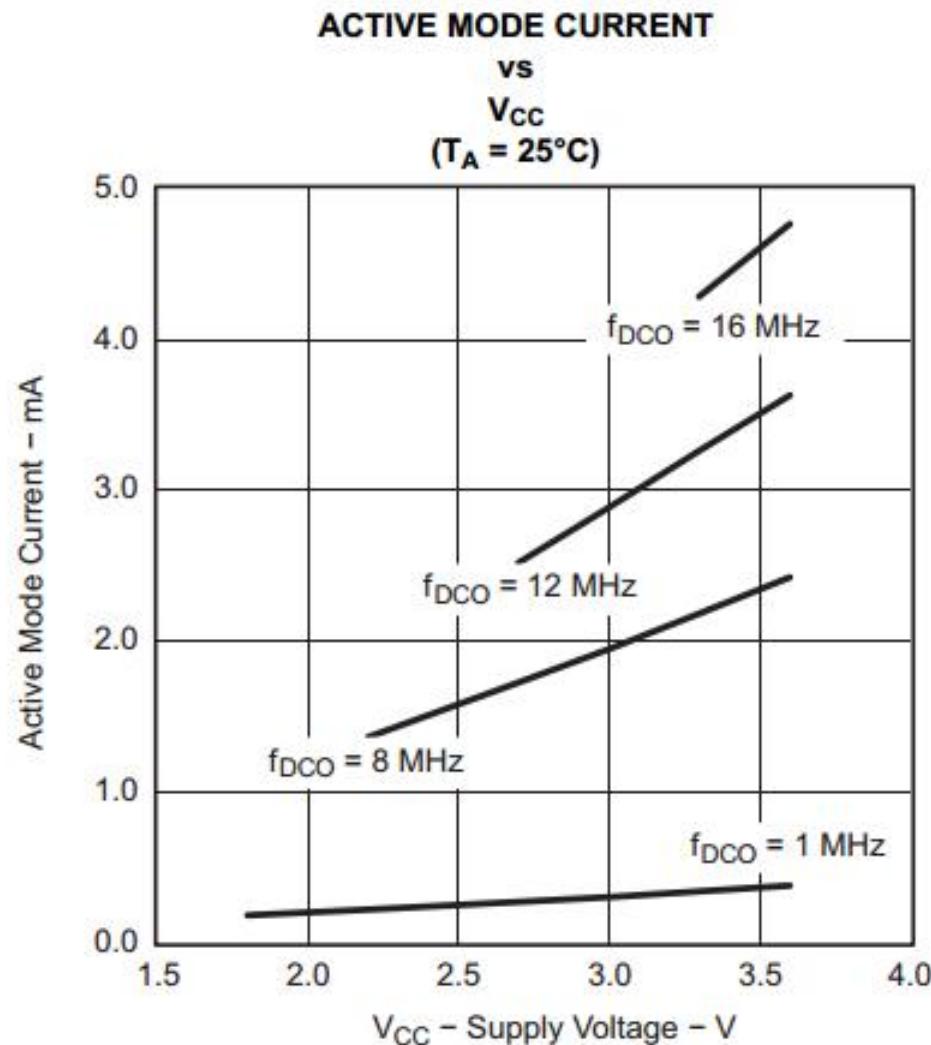
- Deux possibilités :

- Travailler à la fréquence la plus haute possible en prenant en compte l'IR le pire.
- Si les changements de fréquence peuvent se faire rapidement,
 - se réveiller à la fréquence la plus basse possible,
 - l'augmenter progressivement en mesurant la tension d'alimentation,
 - en tirant éventuellement partie de la courbe IR / capacité de la batterie si on les connaît.
- Phénomène de passivation
 - Parfois un appel brusque de courant peut faire chuter l'IR.
 - Veiller dans ce cas à ne pas faire rebooter le CPU...



Optimisation mixte

- Jouer sur VDD (exemple MSP430 de TI)





Optimisation mixte

- Jouer sur VDD :
 - Pas forcément simple à implémenter.
 - Si un système dort 99% du temps, le circuit additionnel consommera probablement plus que le gain attendu.
 - Utiliser un PMIC...



Optimisation logicielle

- Optimisations triviales :

- Compiler en O3 !
- Utiliser les fonctions inline.
- Éviter le code relogeable (PIC).
- Fonctionner le plus possible sous interruptions plutôt qu'en polling.
 - Exemples :
 - UART à 115200 sur processeur à 8MHz : 700 cycles / octets
 - UART à 19200 sur processeur à 8MHz : 4100 cycles / octets
 - Utiliser si possible les FIFO pour générer moins d'interruption.
- Pour les gros transferts, utiliser le DMA de préférence aux boucles logicielles.
- Tirer parti des OS : passer en veille dans l'idle-thread.
- Périphériques non utilisés : les désactiver.
- Périphériques utilisés : les faire fonctionner à la fréquence la plus basse possible.



Optimisation logicielle

- Timers :
 - Faire fonctionner les timers le plus lentement possible.
 - Utiliser la valeur de prédiviseur la plus grande possible :
 - un prédiviseur comptant sur moins de bits qu'un timer, il consomme moins.
 - Utiliser la RTC si possible !
- UART :
 - Certains UART disposent d'un prédiviseur fractionnel.
 - A souvent besoin d'une horloge 16 fois plus rapide qu'un diviseur entier.
 - Exemple : STM32F103



Optimisation logicielle

- GPIO

- Si on peut régler le slew rate, prendre celui le plus faible possible.
- Exemple : STM32, FPGA, ...
- Mettre les entrées inutilisées à la masse, sauf si la datasheet indique explicitement de faire autrement.

- Watchdogs

- Consomment de façon non négligeable.
- Or un processeur ne « plante » pas lorsqu'il dort.
- ⇒ désactiver les watchdogs à la mise en veille, les ré-activer au réveil !



Optimisation logicielle

- Modes « économie d'énergie »
 - Chaque constructeur a son propre jargon...
 - Plusieurs modes, désactivant de plus en plus de périphériques
- Attention :
 - Le passage de certains mode à d'autres peuvent prendre beaucoup de temps.
 - Certains modes ne sauvegardent pas la RAM !
 - Veiller aux conditions permettant de sortir de chaque mode :
 - IRQ sur périphérique standard (UART, timer)
 - IRQ sur broche dédiée (WAKEUP)
 - Attention aux capacités de découplage des modes « ultra-basse consommation »
 - Exemple : STM32



Optimisation logicielle

- Calculs flottants

- Toujours se demander si on a vraiment besoin de flottants.
 - Dans la plupart des cas, on a en fait besoin de virgule fixe.
- Les coprocesseurs flottants basse-consommation consomment maintenant souvent moins que les calculs émulés :
 - Berkeley SoftFloat sur ARM Cortex 32bits
 - 120 cycles / addition
 - 100 cycles / multiplication
 - 140 cycles / division
- Penser aux optimisations simples :
 - Fonctions trigonométriques : tables de lookup, CORDIC
 - Formules approchées (atan2, ...)

Optimisation logicielle

• Calculs flottants

Function	Qfplib cycles	GCC library cycles
qfp_fadd	150	102
qfp_fsub	151	108
qfp_fmul	165	166
qfp_fdiv	323	475
qfp_fdiv_fast	187	-
qfp_fcmp	27	-
qfp_fcosh	595	3350
qfp_fsin	585	3300
qfp_ftan	767	6140
qfp_fatan2	718	4930
qfp_fexp	557	1930
qfp_fln	829	3960
qfp_fsqrt	738	460
qfp_fsqrt_fast	161	-



Crédits

- *Low Power Design*
 - cMicroTek
 - http://www.cmicrotek.com/LPD_book.pdf
- *Hardware and Firmware Issues in Using Ultra-Low Power MCU*
 - The Ganssle Group
 - <http://www.ganssle.com/reports/ultra-low-power-design.html>
- Datasheets / Application notes de différents constructeurs
 - ST, NXP, Kemet, AVX, Panasonic, Energiser, ...

Licence de droits d'usage



Contexte académique } sans modification

Par le téléchargement ou la consultation de ce document, l'utilisateur accepte la licence d'utilisation qui y est attachée, telle que détaillée dans les dispositions suivantes, et s'engage à la respecter intégralement.

La licence confère à l'utilisateur un droit d'usage sur le document consulté ou téléchargé, totalement ou en partie, dans les conditions définies ci-après, et à l'exclusion de toute utilisation commerciale.

Le droit d'usage défini par la licence autorise un usage dans un cadre académique, par un utilisateur donnant des cours dans un établissement d'enseignement secondaire ou supérieur et à l'exclusion expresse des formations commerciales et notamment de formation continue. Ce droit comprend :

- le droit de reproduire tout ou partie du document sur support informatique ou papier,
- le droit de diffuser tout ou partie du document à destination des élèves ou étudiants.

Aucune modification du document dans son contenu, sa forme ou sa présentation n'est autorisé.

Les mentions relatives à la source du document et/ou à son auteur doivent être conservées dans leur intégralité.

Le droit d'usage défini par la licence est personnel, non exclusif et non transmissible.

Tout autre usage que ceux prévus par la licence est soumis à autorisation préalable et expresse de l'auteur :

alexis.polti@telecom-paristech.fr