

Systemes de stockage à supercondensateurs

Philippe Barrade

Laboratoire d'Electronique Industrielle
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

EPFL-STI-IEL-LEI

Station 11

CH-1015 Lausanne

+41 21 693 2651

Philippe.barrade@epfl.ch

Présentation

- Introduction
- Généralités sur les supercondensateurs
 - Principe
 - De la cellule au module
 - Electronique et interfaces de puissance
- Applications
 - Supercondensateurs et systèmes hybrides
 - Application au domaine des transports
- Activités pédagogiques sur le stockage par supercondensateurs
 - Généralités sur les études à l'EPFL
 - Projets de cycles Bachelor et Master
 - Liens entre recherche et enseignement
- Conclusion

Introduction

- Stockage de l'énergie:
 - Condensateurs
 - Condensateurs électrochimiques
 - Pseudocondensateurs
 - Condensateurs à double couche (ECDL)
 - Batteries
 - Pb, NiCa, NiMh
 - Li+,...
 - A circulation d'électrolyte (Vanadium-Redox flow batteries)
 - Piles à combustibles
 - H₂, Methanol (reforming)
 - Volant à inertie
 - SMES
 - Air comprimé, Système hydro-pneumatiques

Introduction

- Condensateur / Supercondensateurs / Batteries LiPo



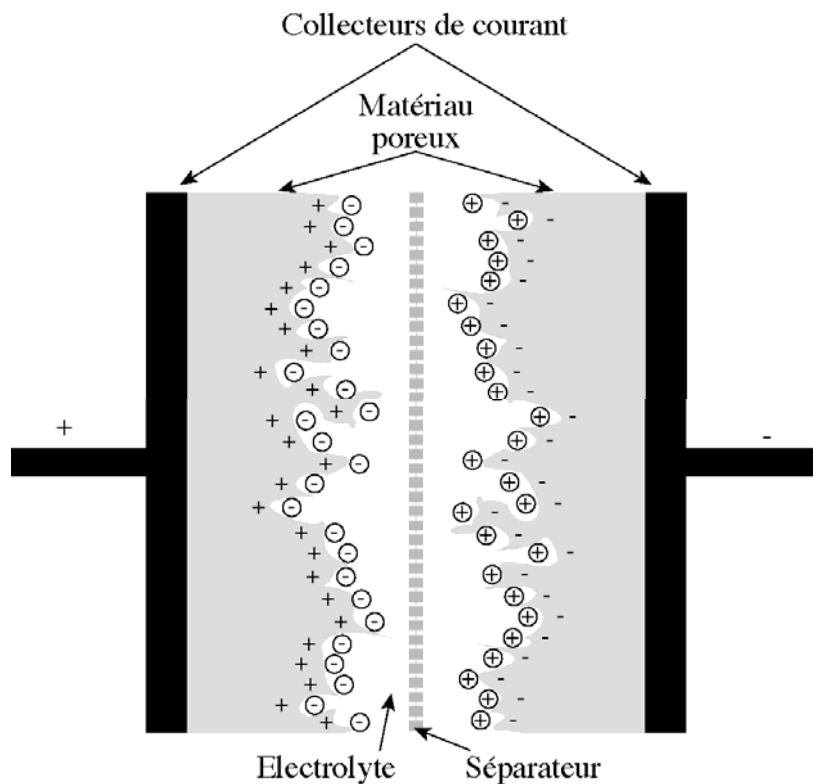
Cond. Electrolytique	ECDL	ECDL	ECDL	LiPo
10mF/250V	10F/2.5 V	140F/2.5 V	310F/2.5V	3 cellules serie
W=312J	W=31J	W=437J	W=968J	W=28.7kJ

Généralités sur les supercondensateurs

- Principe

- Basé sur le phénomène de la double couche (Helmholtz, 1879)

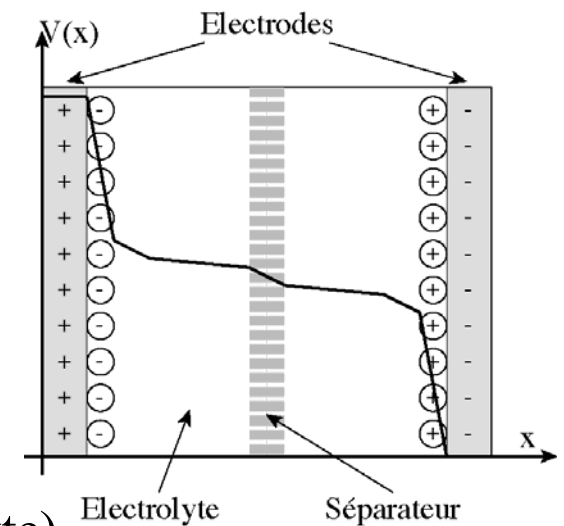
- Electrodes: matériau poreux (poudre de carbone), déposé sur une feuille de métal (collecteur de courant, aluminium)
- Séparateur: interdit tout contact galvanique entre les électrodes (papier)
- Electrolyte: organique, permet la circulation d'ions entre les électrodes



$$C = 2 \cdot \epsilon \cdot \frac{A}{d}$$

$$W = \frac{1}{2} C U^2$$

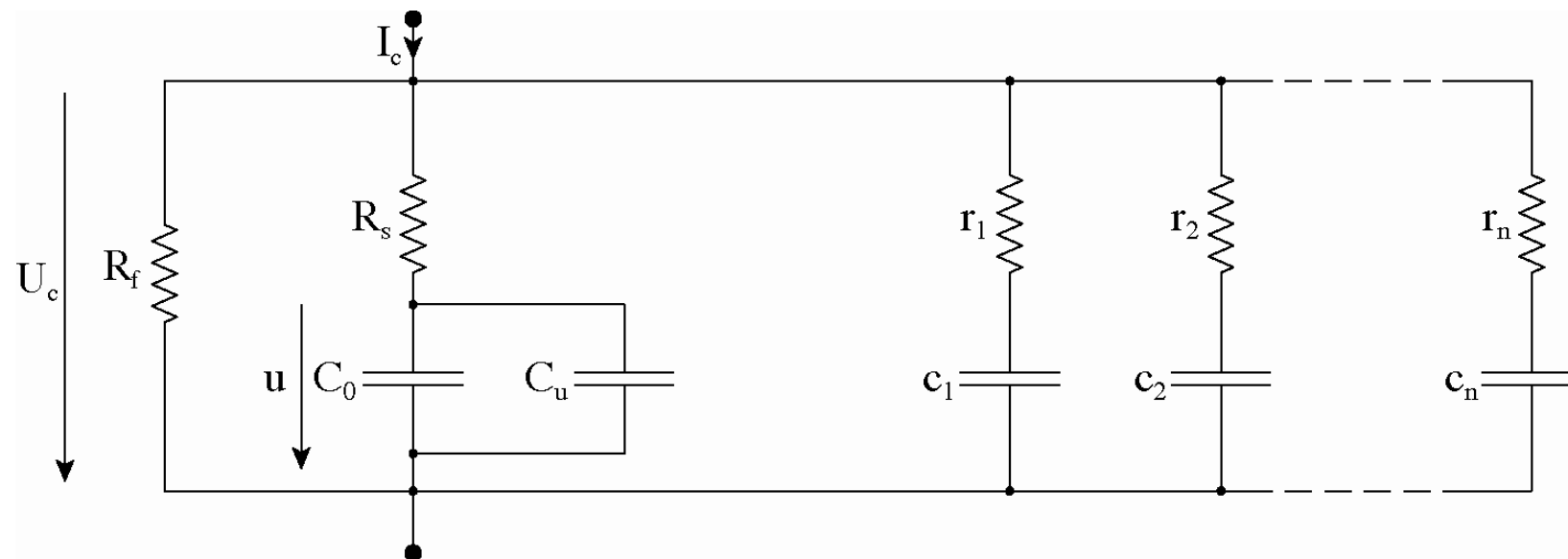
- A: jusque 3000m² (porosité)
- d: 2-10Å (dimension des ions)
- U: 2.5-3V (défini par l'électrolyte)



Généralités sur les supercondensateurs

- Principe:

- Caractéristiques principales



- Capacité: fonction de la tension (couche de diffusion)
- Résistance série: connexions, dépôt du carbone sur le collecteur, conductivité ionique de l'électrolyte
- Résistance de fuite: impuretés, décomposition de l'électrolyte, vieillissement
- Circuit RC: relaxation (porosité des électrodes), constantes de temps de la seconde à la journée

Généralités sur les supercondensateurs

- De la cellule au module: besoins en énergie

- Énergie stockée dans une cellule

$$W_M = \frac{1}{2} C U_M^2$$

- Coefficient de décharge: le niveau bas de tension (décharge) doit être borné pour contrôler le rendement

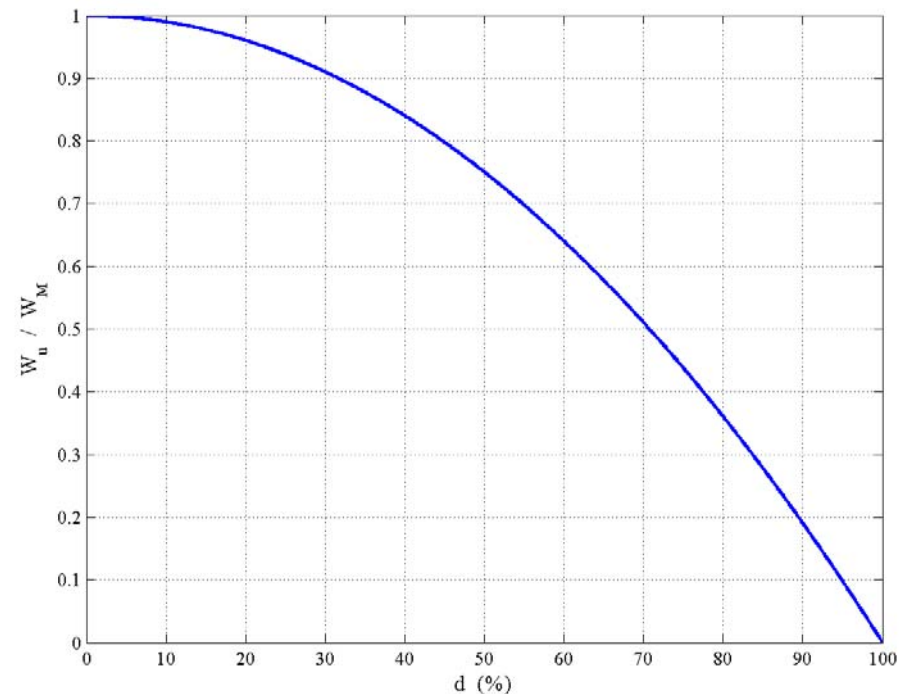
$$d = \frac{U_m}{U_M} 100$$

- L'énergie utile n'est qu'une fraction de l'énergie totale stockée

$$W_u = W_M \left(1 - \left(\frac{d}{100} \right)^2 \right)$$

- Nombre de cellules pour une énergie utile donnée

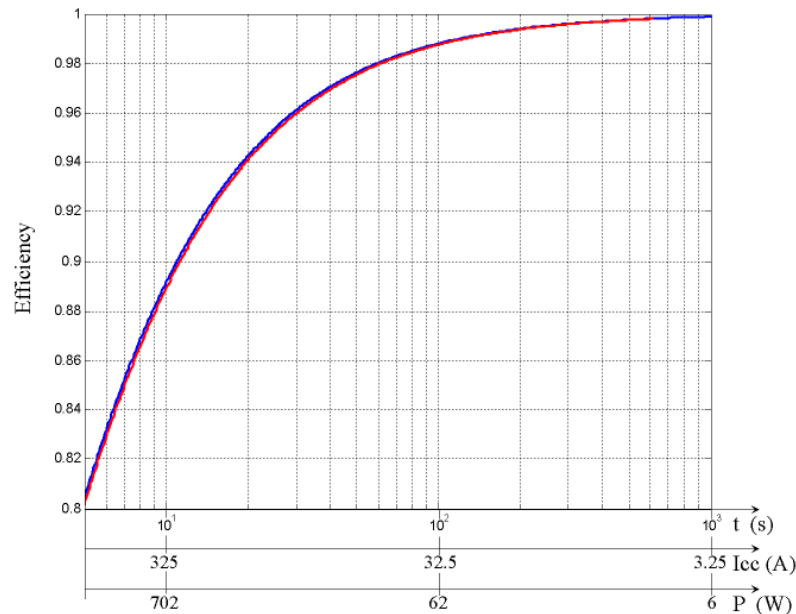
$$N_s = \frac{2W_u}{C U_M^2 \left[1 - \left(\frac{d}{100} \right)^2 \right]}$$



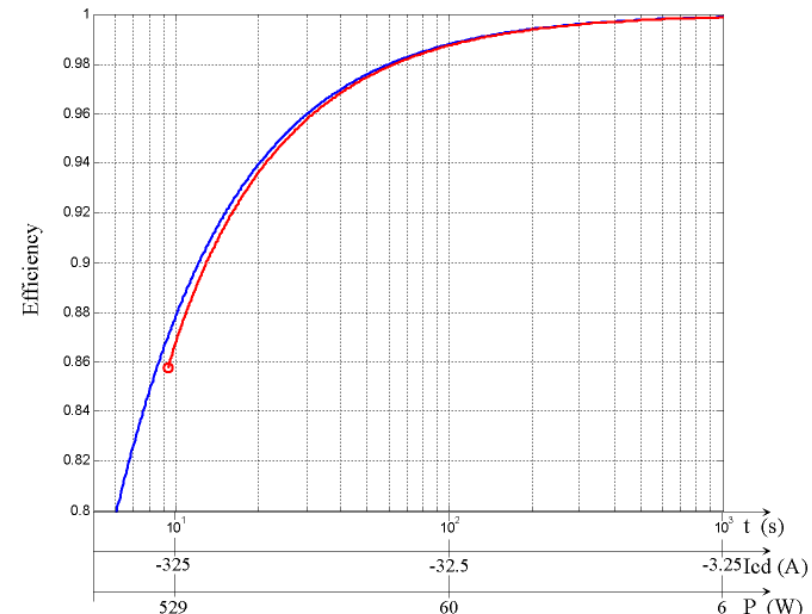
Généralités sur les supercondensateurs

- De la cellule au module: contraintes en puissance (2600F/2.5V/0.7mΩ)

Charge



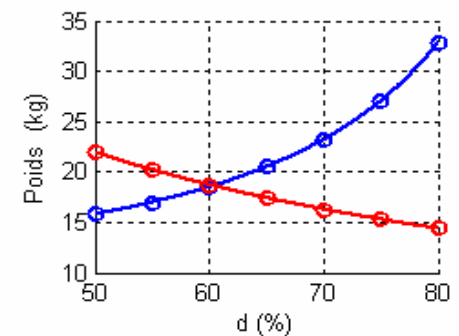
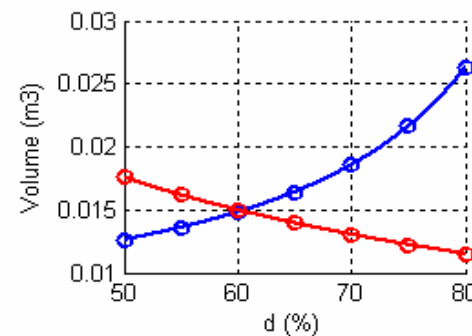
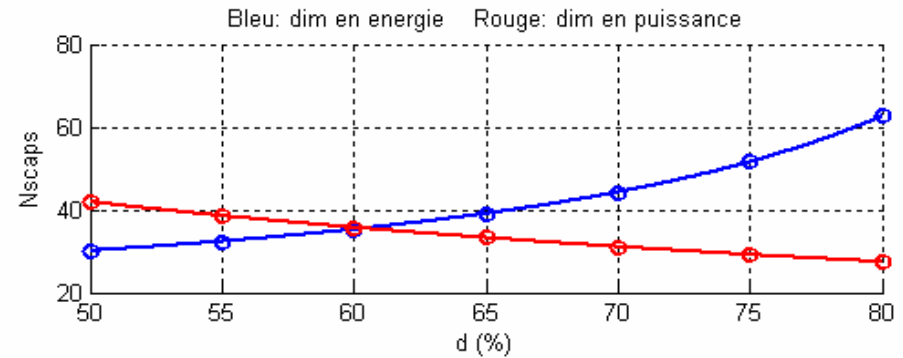
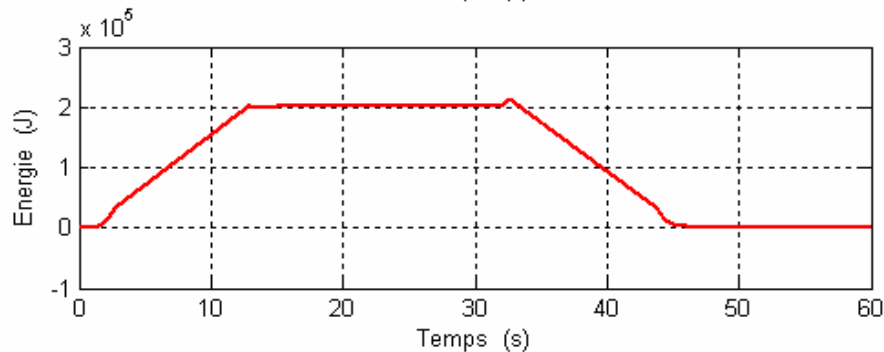
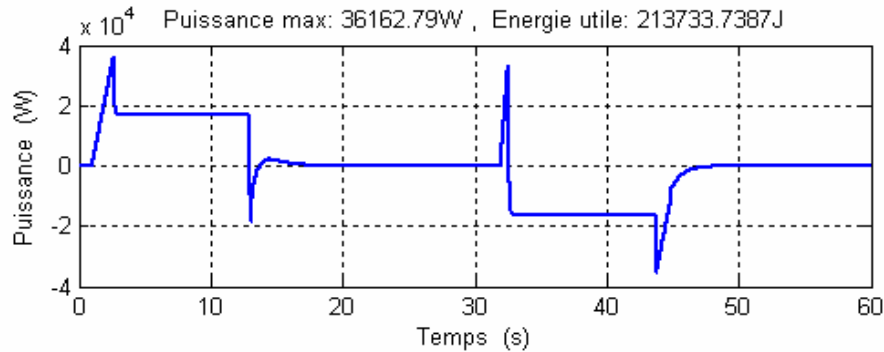
Décharge



- Le temps de charge doit être supérieur à 10s pour un rendement de 90% ($I_c < 320A$ or $P < 700W$)
- Le temps de décharge doit être supérieur à 10s pour un rendement de 90% ($I_c < 320A$ or $P < 400W$)
- Le courant ou la puissance pour la charge/décharge doivent être limités pour garantir un rendement supérieur à 90% : La densité de puissance n'est alors que de 806W/kg (au lieu des 4300W/kg annoncés par le constructeur)

Généralités sur les supercondensateurs

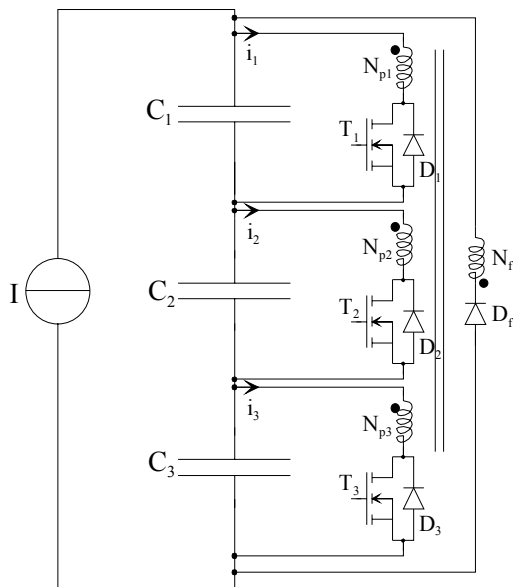
- De la cellule au module: besoins en énergie ET contraintes en puissance (2600F/2.5V/0.7mΩ)
 - Exemple: 220kJ, +/-40kW, rendement 90%



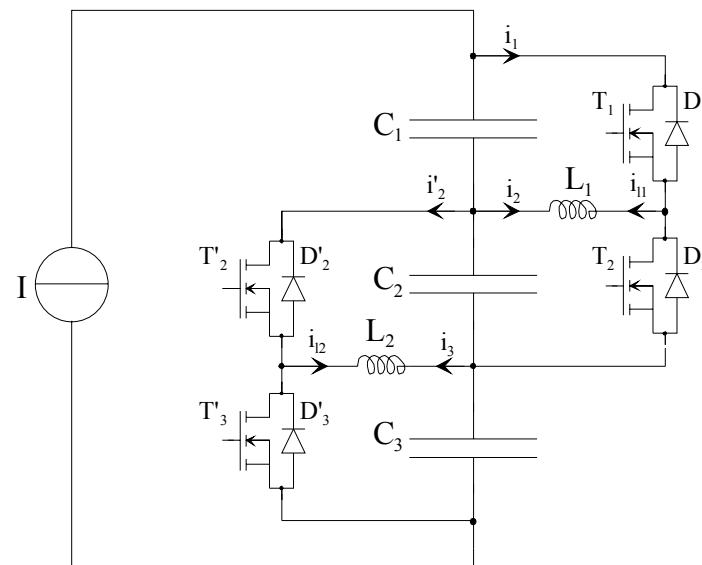
- Pour cette application particulière, la prise en compte des contraintes en puissance est le facteur dimensionnant

Généralités sur les supercondensateurs

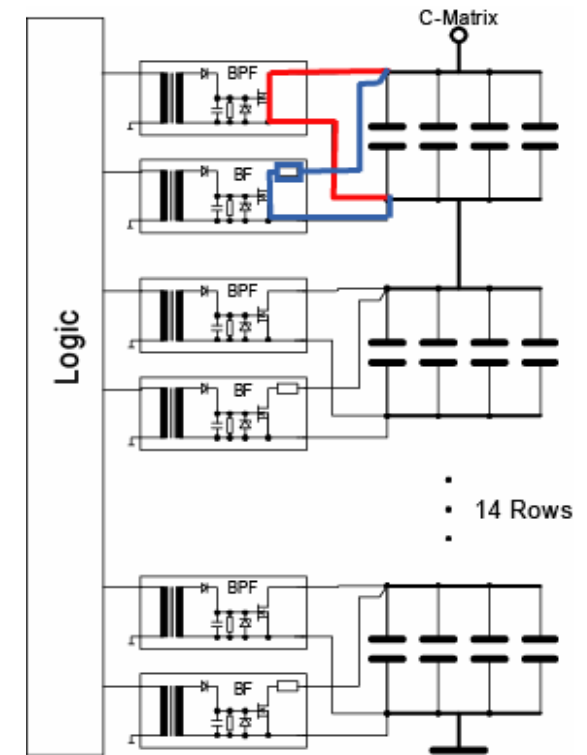
- Electronique et interfaces de puissance:
 - Mise en série de cellules basse-tension: fondamental d'équilibrer les tensions
 - Eviter des surtensions sur les cellules de moindre capacité (vieillessement)
 - A tension maximale atteinte: l'énergie stockée est maximisée



Découpage : convertisseur forward avec secondaires distribués



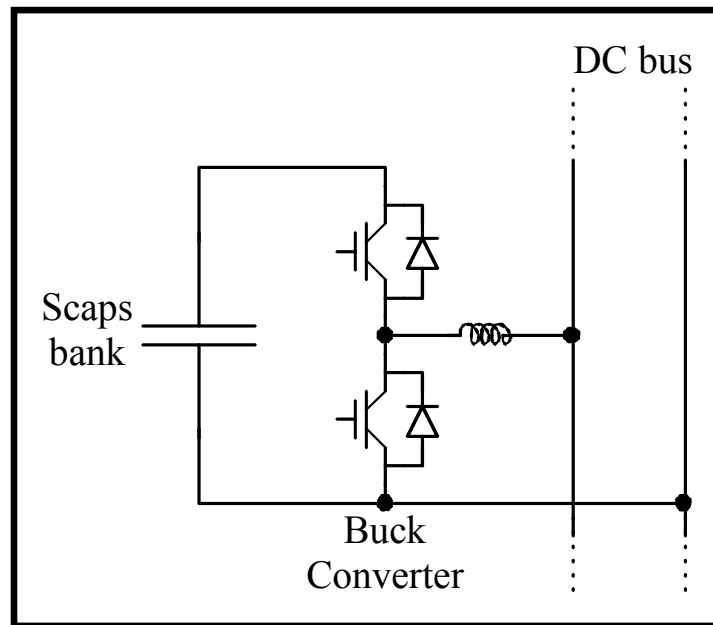
Découpage : convertisseurs Buck-boost



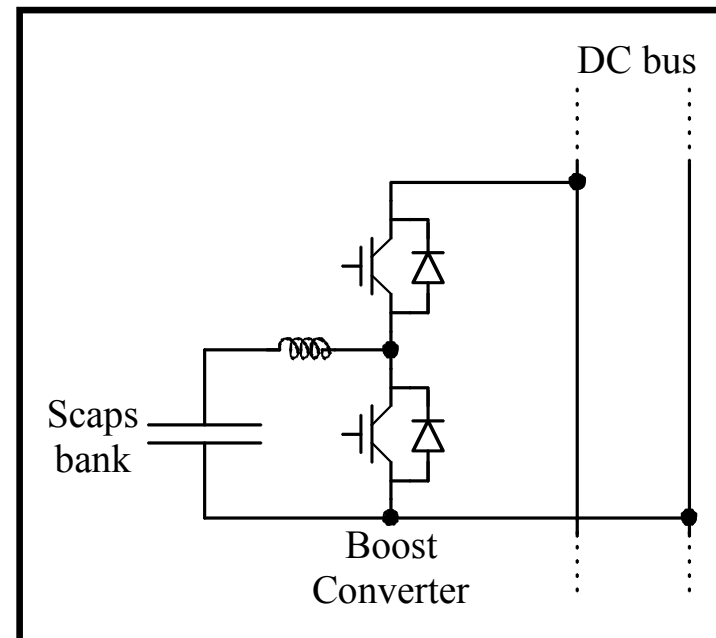
Linéaire : MOS-FETS en résistances variables

Généralités sur les supercondensateurs

- Electronique et interfaces de puissance:
 - Interfaces:
 - Les supercondensateurs voient leur capacité diminuer avec la fréquence
 - La résistance série d'un supercondensateur varie peu avec la fréquence
 - ⇒ Nécessité de limiter le contenu harmonique du courant de charge/décharge (limiter les pertes liées à des harmoniques non-déterminant pour le stockage, durée de vie)



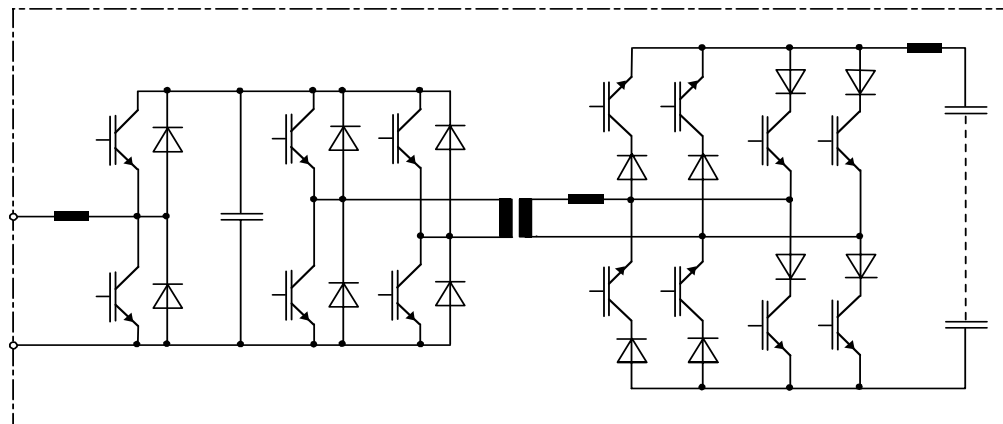
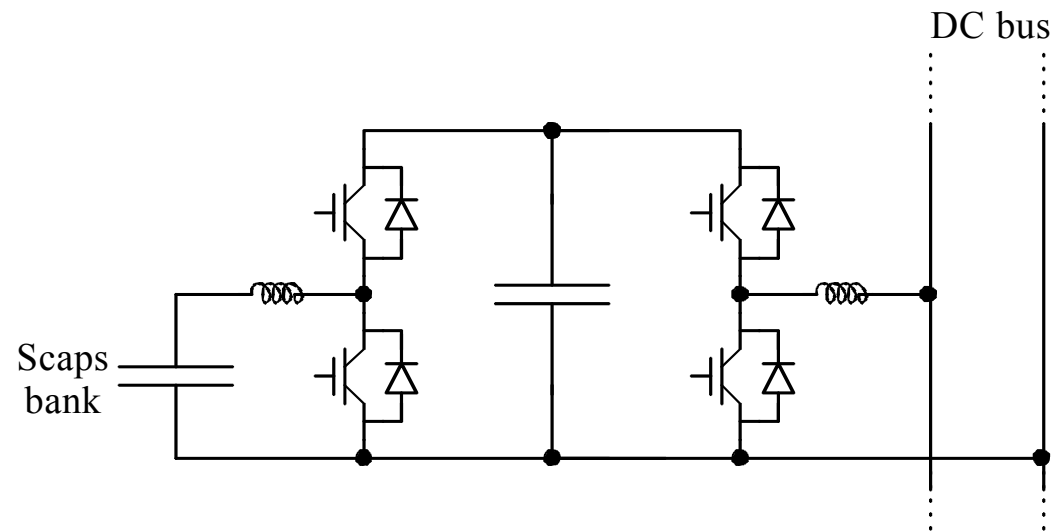
Structure nécessitant un filtre d'entrée



Structure adaptée à la nature basse tension des supercondensateurs

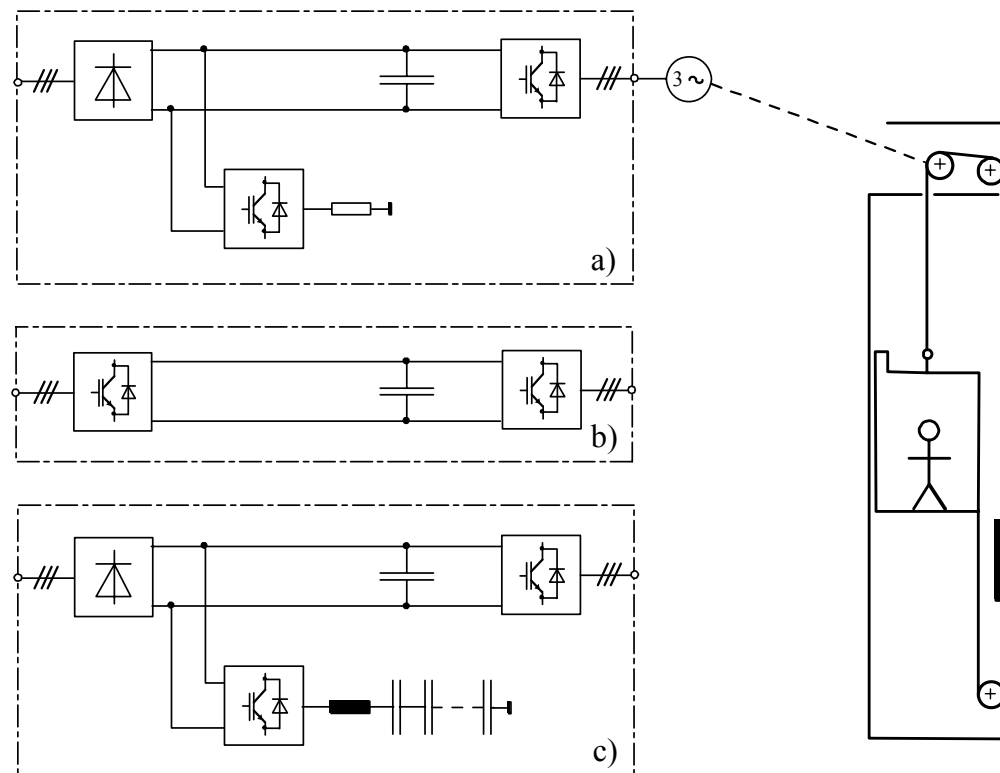
Généralités sur les supercondensateurs

- Electronique et interfaces de puissance:
 - Chaînes de conversion



Applications

- Supercondensateurs et systèmes hybrides
 - Densité en énergie des supercondensateurs est limitée
 - Densité en puissance compatible avec des application moyenne/forte puissance
 - Les supercondensateurs sont en général associés à d'autres sources
 - ⇒ Systèmes hybrides (ex: ascenseur)



Applications

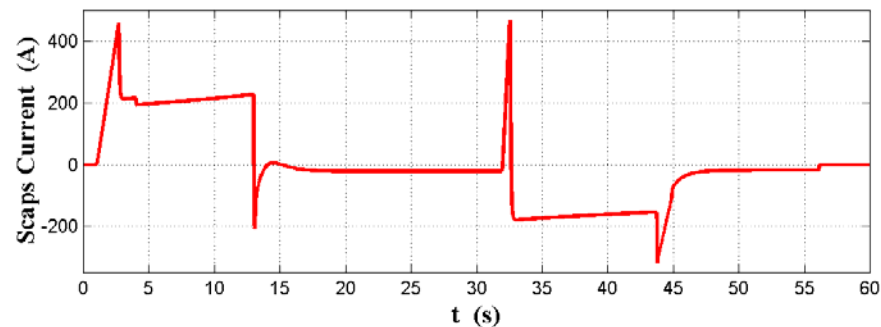
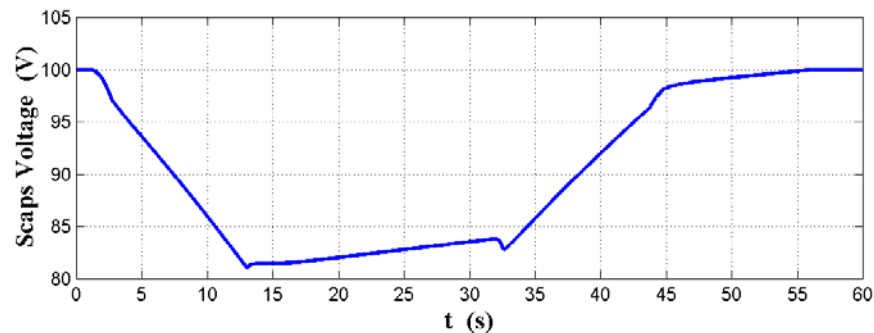
- Supercondensateurs et systèmes hybrides

- Cas particulier d'un ascenseur

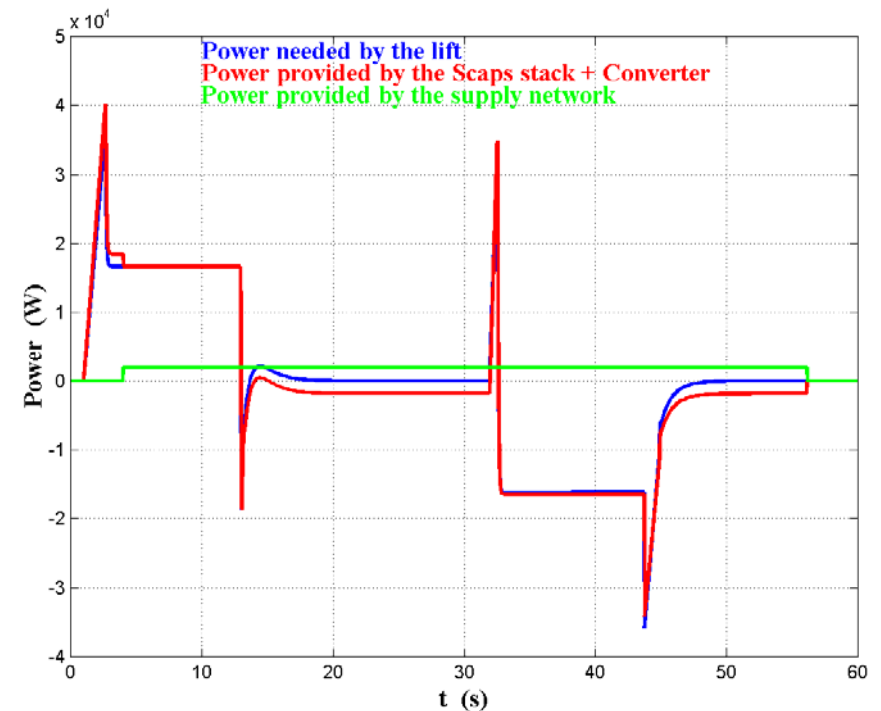
⇒ Cage : 720 kg, Contrepoids : 1440 kg, Charge : 1400 kg

⇒ Demande en énergie pour 10 étages: 220kJ (accu. Supercapacitif 45 litres)

⇒ Le réseau n'est sollicité que pour fournir les pertes du système (1 kW constant au lieu de +/- 40 kW)



Tension, courant Scaps



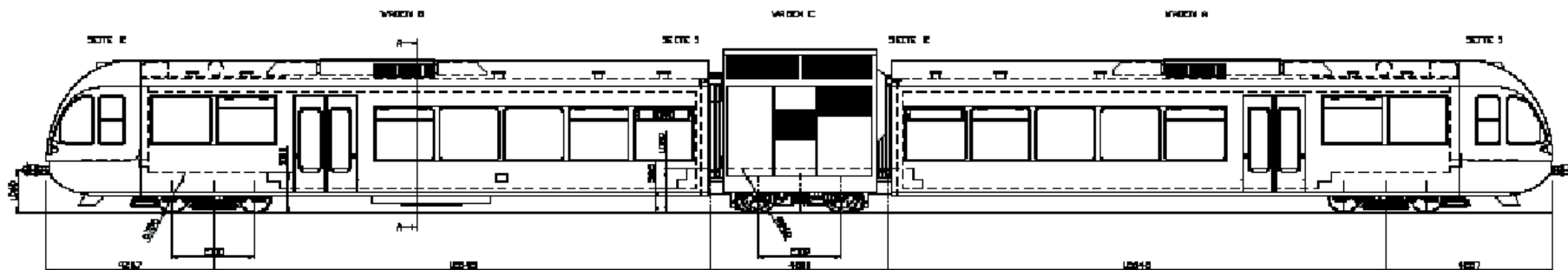
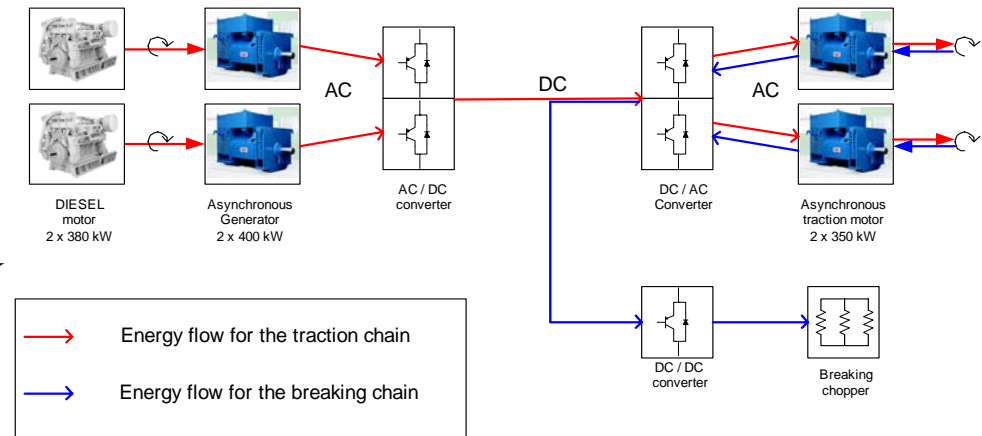
Puissances

Applications

- Application au domaine des transports : train diesel électrique

- GTW train (Stadler Rail AG, CH)

- Poids (à vide) : 67 t
- Poids total : 84 t
- Diesel : 2x380 kW
- Puissance maximale à la roue : 620 kW
- Vitesse maximale : 140 km/h

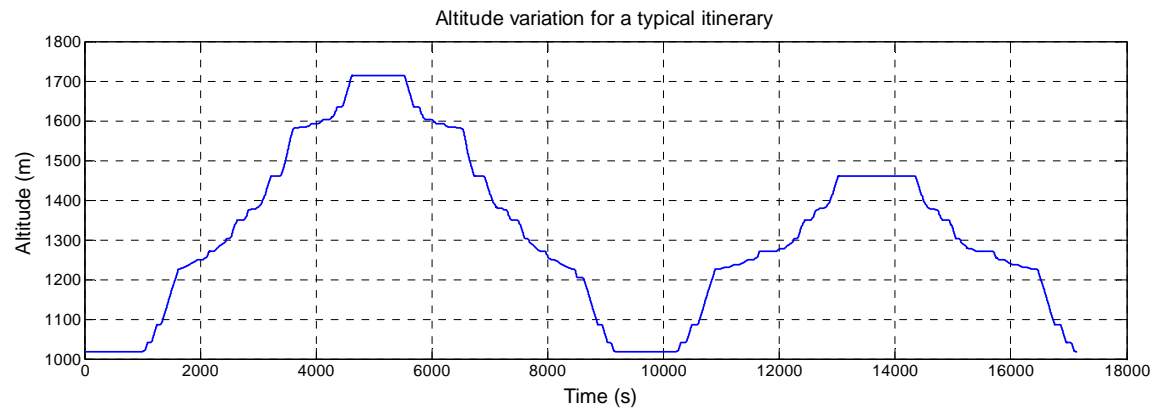


Applications

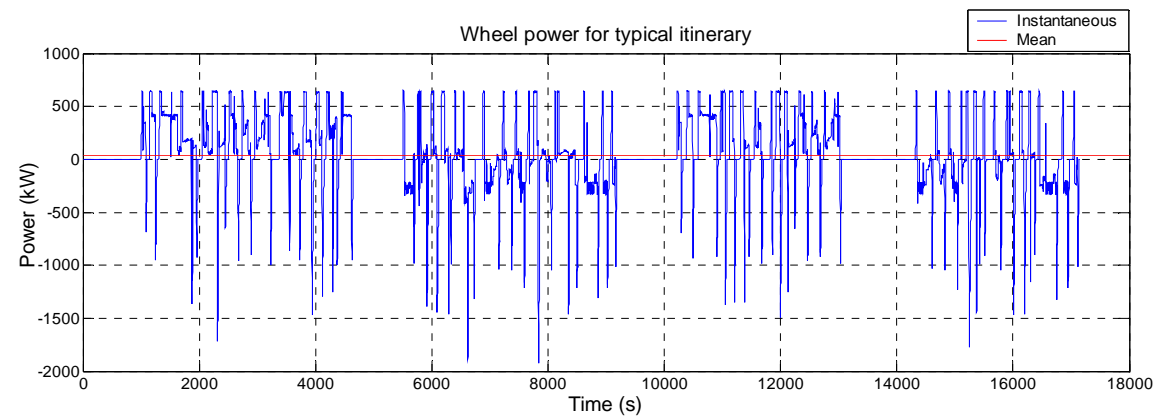
- Application au domaine des transports : train diesel électrique

- Ligne : Merano-Malles (Italie)

- Profil d'altitude

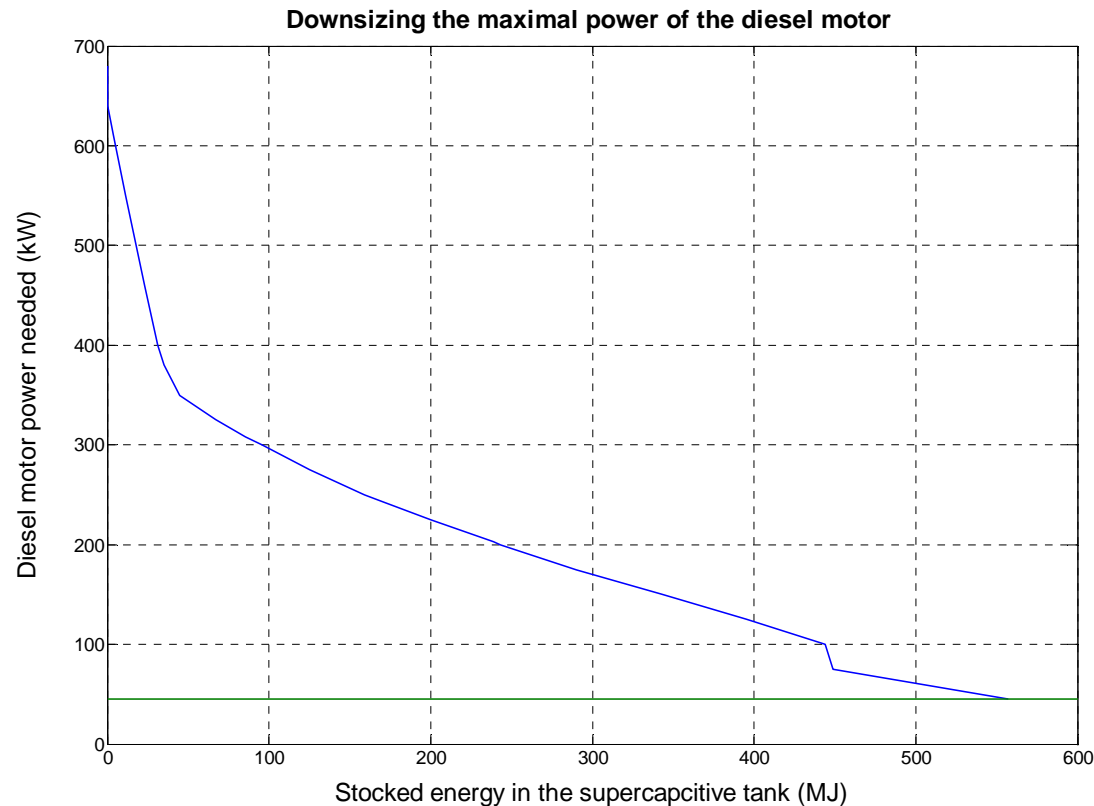


- Profil de puissance



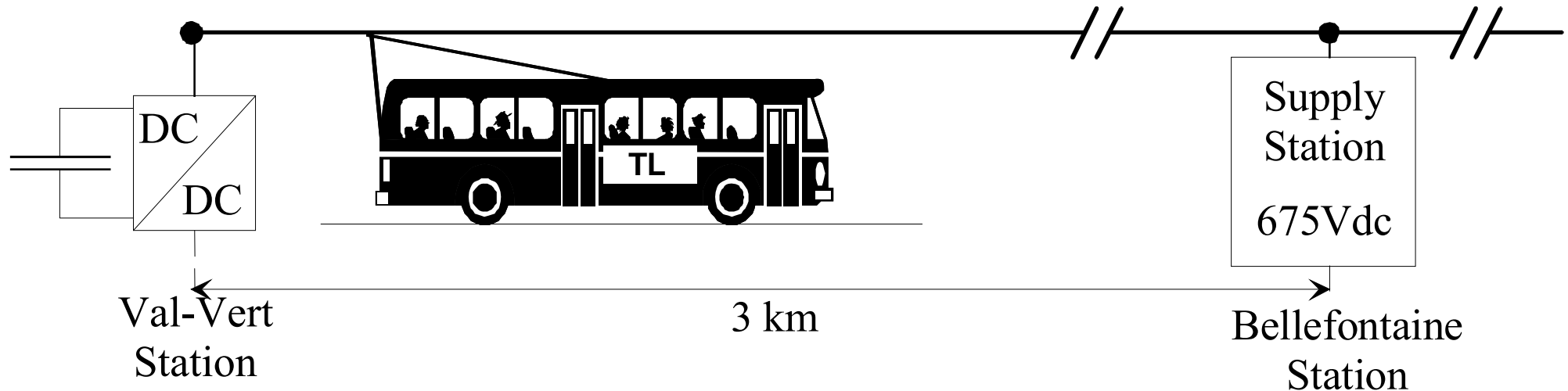
Applications

- Application au domaine des transports : train diesel électrique
 - Énergie stockée en fonction de la puissance diesel installée
 - Principal résultat
 - Réduction de la puissance diesel installée en fonction de l'énergie stockée



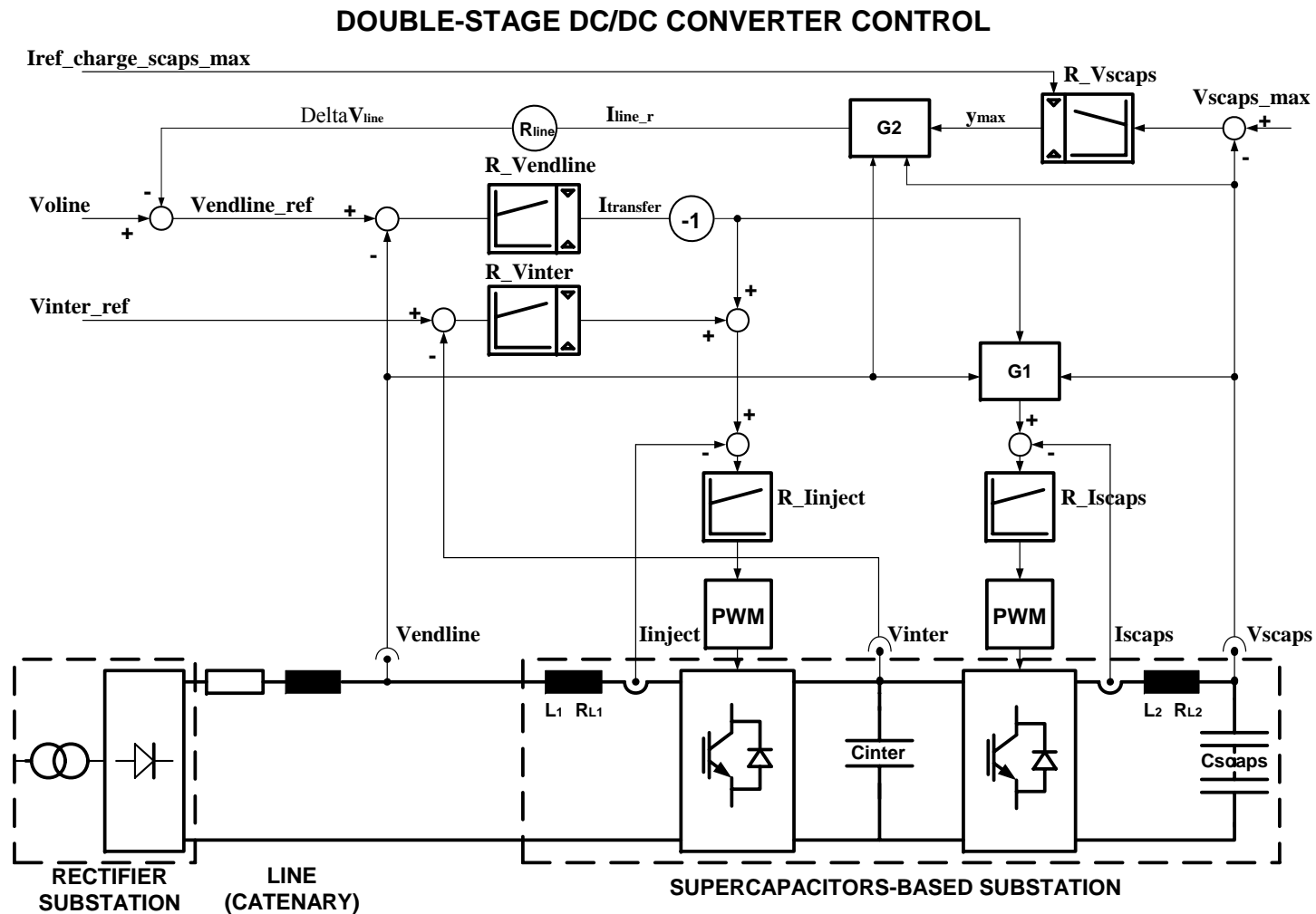
Applications

- Application au domaine des transports
 - Alimentation de réseaux caténaires
 - Récupération d'énergie de freinage
 - Maintien des niveaux de tension
 - Dispositif autonome (travaux infrastructure limités)



Applications

- Application au domaine des transports
 - Alimentation de réseau caténaire
 - Importance du réglage



Applications

- Application au domaine des transports
 - Stockage possible en parallèle de stations conventionnelles (récupération d'énergie, pas de maintien de tension)
 - Stockage possible en ligne (récupération d'énergie, maintien de tension)
 - Stockage embarqué (récupération d'énergie, maintien de tension, autonomie limitée)

System	SITRAS SES	Mitrac En Saver (Bombardier)	UPT KESS 250 (Urengo)	Proposal
technologies	Supercondensateurs (1)	Supercondensateurs (2)	Volant à inertie (1)	Supercondensateurs (2)(3)
Energie	2.5kWh	0.85kWh	2.2kWh (@200kW)	5.7kWh
Puiss. Max.	1000kW	300kW	250kW	400kW
Volume	22m ³	0.8m ³	2.3m ³	2m ³
Poids	9t	1.5t	0.477t	2.5t (**)
Energie vol.	0.101kWh/m ³	1.035kWh/m ³	0.956kWh/m ³	2.85kWh/m ³
Densité en energie density	0.25Wh/kg	1.78Wh/kg	1.46Wh/kg	2.28Wh/kg)
(1) Système complet (2) Sans convertisseurs ni auxiliaires (3) garantie sur rendement (supérieur à 90%)				

Applications

- Application au domaine des transport:
 - Formule S2000 (?)



Applications

- Application au domaine des transport: Formule S2000 (?)

- Spécifications

- Système de propulsion hybride

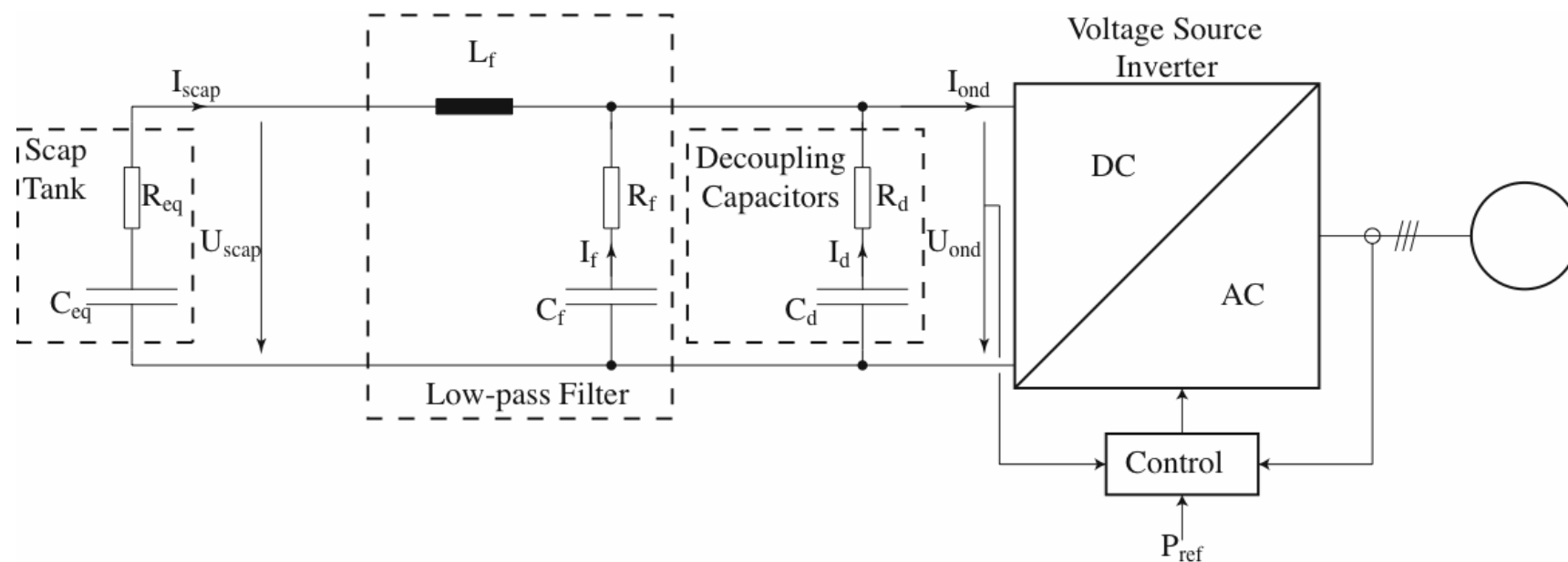
- ⇒ 2.0 litres, 4 cylindres, 250HP

- ⇒ Moteur-générateur à aimants permanents, couplé sur la boîte à vitesses

- ⇒ Stockeur supercapacitif:

- Charge pendant les phases de décélération

- Décharge dans un mode “push-to-pass”



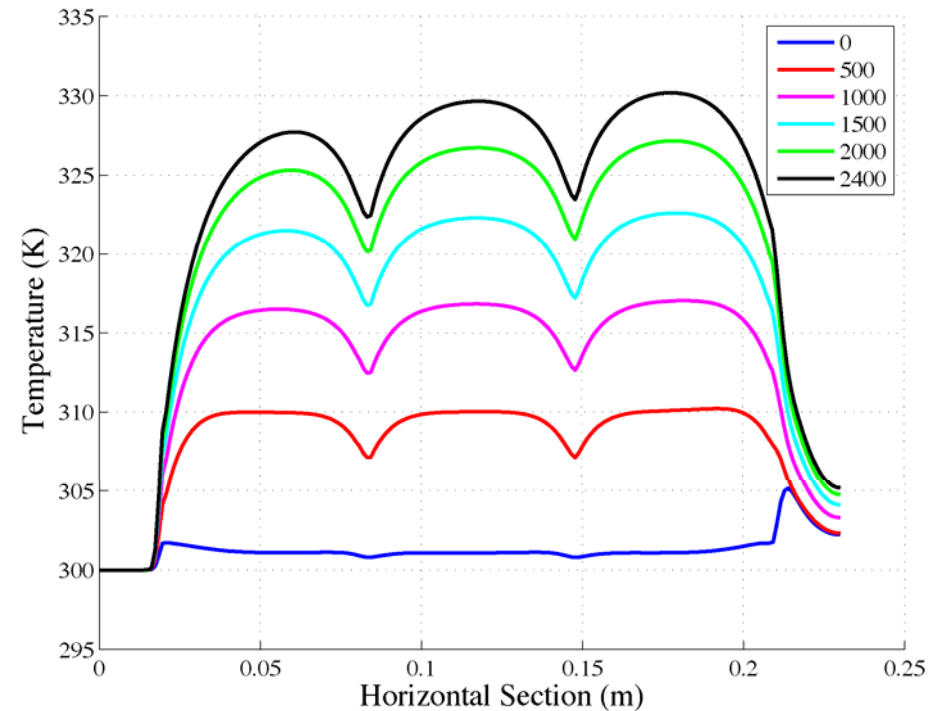
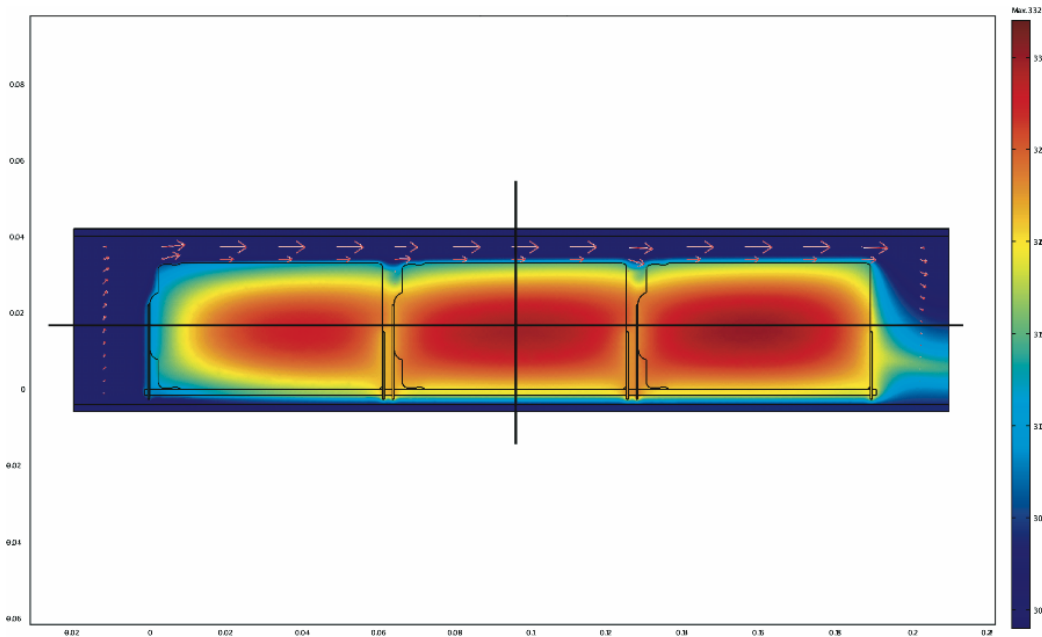
Applications

- Application au domaine des transport: Formule S2000 (?)
 - Spécifications pour l'accumulateur supercapacitif:
 - 30kW, 5.6sec, 170kJ
 - Plage de variation de tension: de 400V à 700V

C (F)	n_s	n_p	U_M (V)	U_m (V)	D (%)	η (%)
120	216	3	540	270	50.1	92.4
140	214	3	535	310	58	90
310	254	1	635	320	50.3	91.5
350	272	1	680	415	61	90
650	102	1	275	140	50.7	93.6
1200	57	1	154	79	51.4	91.6
1500	45	1	121	61	50	91
2000	34	1	92	47	50.8	91.3
3000	24	1	65	35	53.8	90.2

Applications

- Application au domaine des transport: Formule S2000 (?)
 - Caractérisation thermique
 - 272 cellules 350F/2.5V/3.2mΩ
 - Puissance moyenne dissipée par cellule: $\langle Pr \rangle 1.13W$
 - Etude du régime transitoire sur les gradients de température
 - ⇒ Course de 24 tours (100sec par tour): 2400sec
 - ⇒ Refroidissement forcé, flux limité: 0.5m/sec

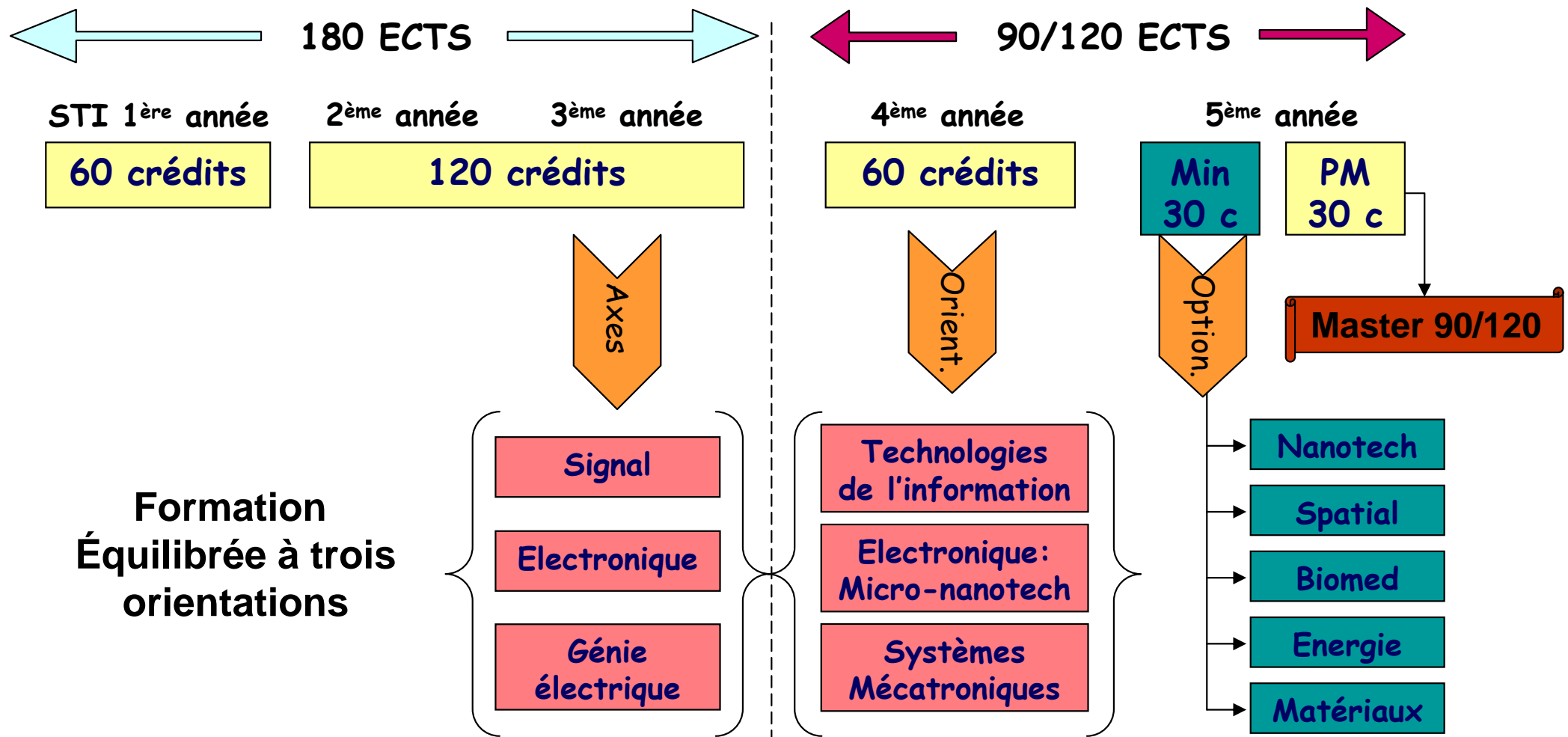


Activités pédagogiques

- Généralités sur les études à l'EPFL
 - L'EPFL est divisée en 7 facultés
 - Architecture, Sciences de base, Sciences et technique de l'ingénieur
 - Informatique et système de communication, Sciences de la vie
 - Management de la technologie, Sciences humaines et sociales
 - Chaque faculté est divisée en Instituts (recherche) et Sections (enseignement)
 - Ex faculté STI
 - ⇒ Génie Electrique et Electronique
 - ⇒ Génie Mécanique
 - ⇒ Science et Génie des Matériaux
 - ⇒ Microtechnique
 - ⇒ Bioengineering
 - Enseignements organisés dans le respect des accords de Bologne
 - ⇒ Bachelor (Licence)
 - ⇒ Master (Master), eq. diplôme d'ingénieur (F)
 - ⇒ Doctorat

Activités pédagogiques

- Généralités sur les études à l'EPFL
 - Etudes à la Section Génie Electrique et Electronique



Activités pédagogiques

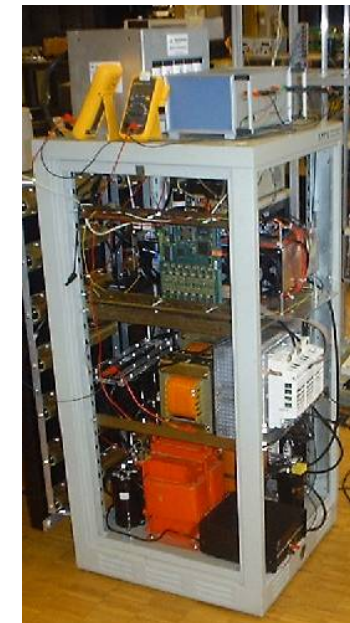
- Liens entre recherche et enseignement
 - Dans le cadre des projets
 - Bachelor
 - Master
 - Travail pratique de Master
 - Les projets proposés
 - Étroitement liés avec les thématiques de recherche au sein de chaque laboratoire
 - Réels projets d'ingénieur
 - Mise en pratique des notions vues en cours
 - Opportunité d'autoapprentissage
 - Sujet multi-discipline
 - ⇒ Stockage supercapacitif très favorable à de tels projets (systèmes hybrides)

Activités pédagogiques

- Liens entre recherche et enseignement
 - Exemples de projets
 - Etude théorique et simulation
 - ⇒ Modélisation, dimensionnement, réglage
 - Validation expérimentale
 - ⇒ Mécanique, Conversion statique, Electronique de réglage (analogique, numérique)



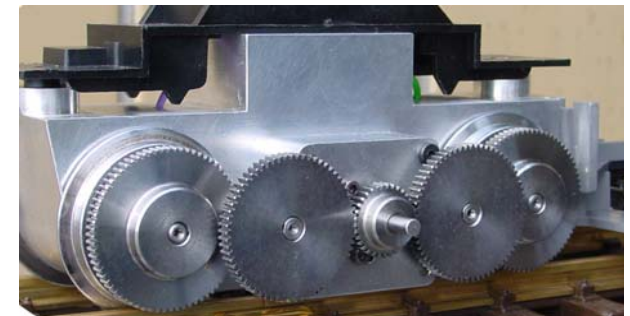
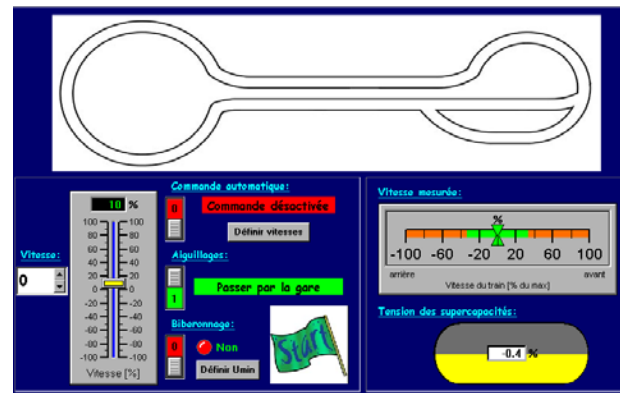
Ascenseur à supercondensateurs (500W)



Maintien de tension caténaire (10kW)

Activités pédagogiques

- Liens entre recherche et enseignement
 - Exemples de projets
 - Alimentation séquentielle d'un train à supercondensateur
 - ⇒ Mécanique, Electronique de puissance, Electronique de réglage (Analogique)
 - ⇒ Communication radio-fréquence (numérique), Programmation



Conclusion

- Les supercondensateurs
 - Résultent d'un compromis entre densité en énergie et densité en puissance
 - Durée de vie de 100'000 cycle à 1 million de cycles
- Difficultés principale
 - Coût, Mise en oeuvre:
 - Développement d'interfaces de puissance
- Champs d'applications
 - Système autonomes (faibles besoin en énergie)
 - Système hybrides
 - Contribution au rendement
 - Réduction des contraintes en puissance sur une source principale
- D'un point de vue pédagogique
 - Système hybrides: possibilité de proposer des thème d'étude pluridisciplinaires