

Sensibiliser les étudiants à l'électronique de puissance dès le début de la formation en circuits électriques

F. Labrique, Ch. Trullemans et Paul Sente

Contexte

Réforme de Bologne :

- 3 années de Baccalauréat (BAC),
- 2 années de Master (MS).

=> la formation spécialisée débute en BAC,
généralement dès la deuxième année.

Formation de base en circuits à l' EPL :

(pour les étudiants ayant choisi un module en électricité)

- A lieu en Q4 (2^{ième} semestre, 2^{ième} année),
- Correspond à 10 crédits.

(5 pour le cours, 5 pour le projet)



Objectifs de cet enseignement

- Objectif du cours :

Être capable d'analyser des circuits simple :

- Écrire de manière *intelligente* les équations (inspection du circuit),
- Comprendre de manière physique leur comportement.

- Objectifs du projet :



- Contextualiser les matières vues au cours,
- Développer la capacité de concevoir un circuit répondant à une fonction donnée,
- Introduire au traitement analogique du signal et au conditionnement de l'énergie.

=> Préparer les étudiants à une formation en électronique, en télécommunication ou en électromécanique.

Le contenu du cours

- Concepts de base :
éléments, KCL, KVL, puissance instantanée.
- Techniques de réduction des circuits à CC :
Mise en série ou en parallèle, Thévenin / Norton, étoile-triangle.
- Etude du régime sinusoïdal (phaseurs) :
impédance, puissance active / réactive, réponse en fréquence (Bode).
- Étude des régimes transitoires :
analyse temporelle des circuits au 1^{er} et 2^d ordre, Laplace.
- Étude des quadripôle actifs :
Types (Z, Y, H), association, quadripôles chargés.
- Les amplificateurs opérationnels :
Montages de base, imperfections principales.



L'apport du projet

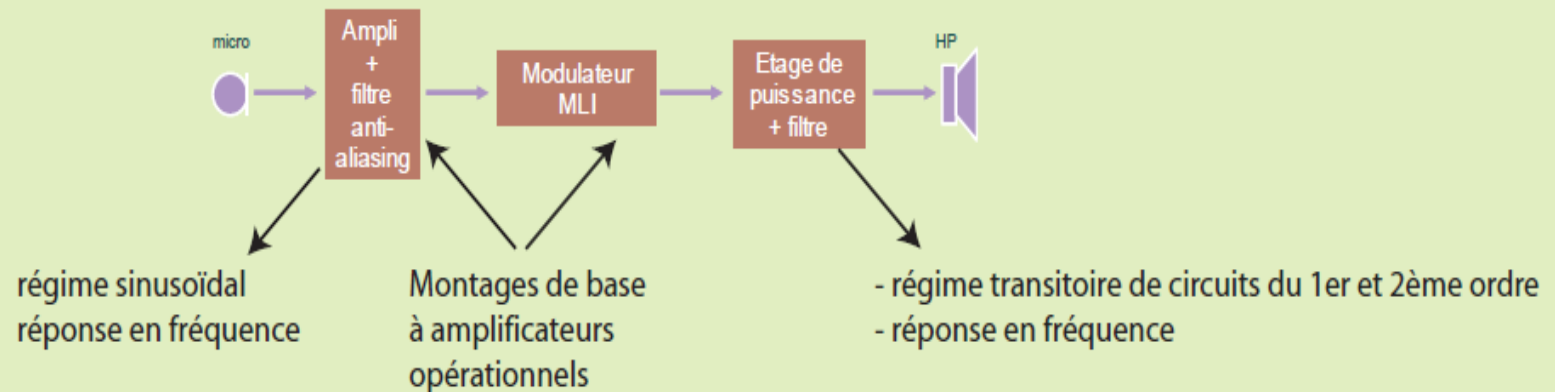
- Illustrer :
 - Réponse à un échelon / une suite d'échelons d'un circuit du 1^{er} / 2^{ième} ordre,
 - Réponse en fréquence,
 - Montages à amplificateurs opérationnels,
 - Bilan de puissance.
- Concevoir un circuit à partir de sa décomposition en blocs fonctionnels.



Le projet 2007-2008

Etude et réalisation d'un amplificateur audio de classe D utilisant une modulation $\Sigma\Delta$ analogique.

Matières mises en contexte



Week 1: Introduction

The official product launch of Elite SC-09TX will take place at the CES in Las Vegas on January 7-10.



Class D amplifiers

The way of the future ?

Motivation is a keystone of learning

Le projet 2007-2008

Etude et réalisation d'un amplificateur audio de classe D utilisant une modulation $\Sigma\Delta$ analogique.

- Percevoir le concept sous-jacent,
- Traduire le concept en un schéma fonctionnel,
- Traduire le schéma fonctionnel en circuits,
- Comprendre la nécessité d'une étape d'amplification de puissance,
- Voir et comprendre que ce type d'étage de puissance permet un rendement proche de 100%.

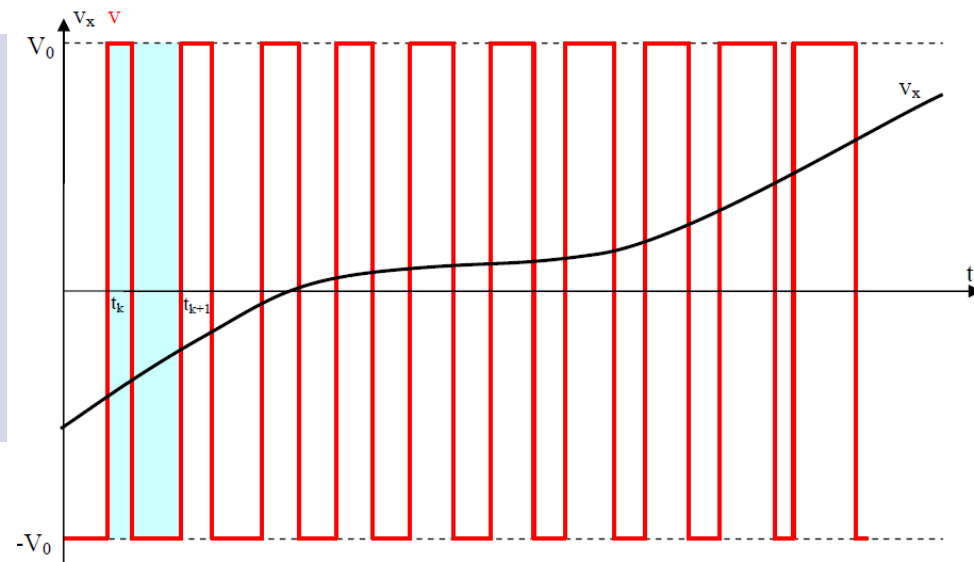


Les étapes du projet 2007-2008

Principe de la MLI (exercice avec tutorat)

Principe

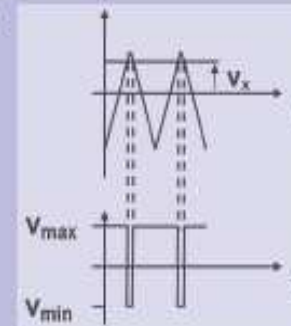
- diviser le temps en petits intervalles
- ajuster sur chaque intervalle les temps où $V=V_{\max}$ et $V=V_{\min}$ pour que la valeur moyenne de V soit égale à v_x



$$\frac{1}{T} \int_{t_k}^{t_{k+1}} v_x dt = \frac{1}{T} \int_{t_k}^{t_{k+1}} v dt$$

$$\Rightarrow \frac{1}{T} \int_{t_k}^{t_{k+1}} (v_x - v) dt = 0$$

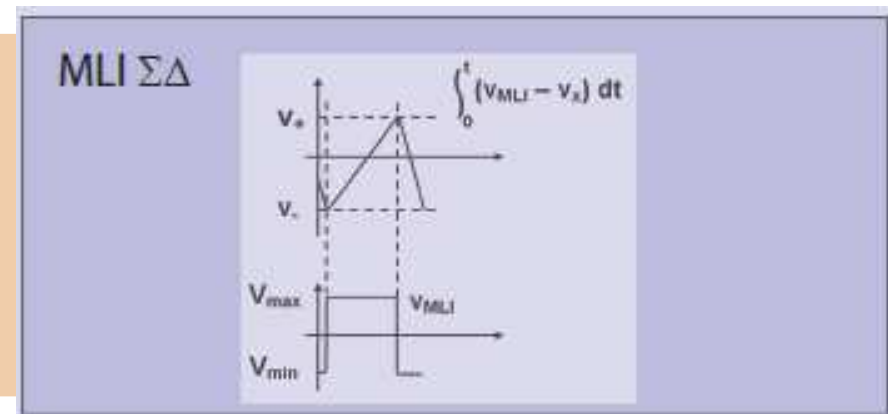
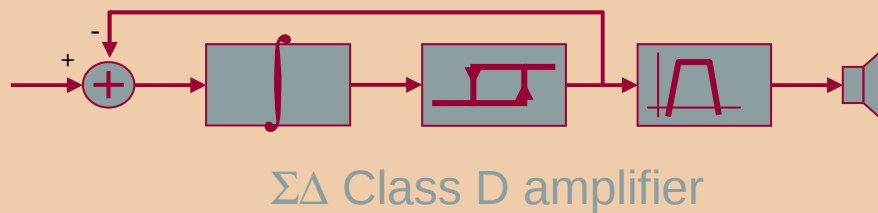
MLI intersective



Les étapes du projet 2007-2008

Principe de la modulation $\Sigma\Delta$ (exercice avec tutorat)

Vue fonctionnelle



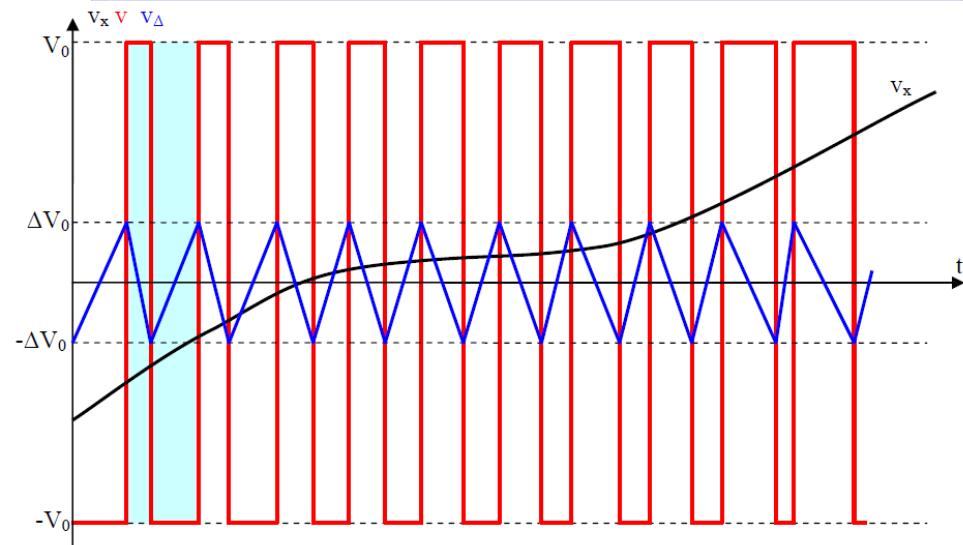
Calculer T_1 et T_2

en fonction de K , V_0 et ΔV_0 :

$$\frac{1}{K}(v_x - V_0)T_1 = -2\Delta V_0 \quad T_1 = K \frac{2\Delta V_0 / V_0}{1 - v_x / V_0}$$

$\Rightarrow$

$$\frac{1}{K}(v_x + V_0)T_2 = 2\Delta V_0 \quad T_2 = K \frac{2\Delta V_0 / V_0}{1 + v_x / V_0}$$

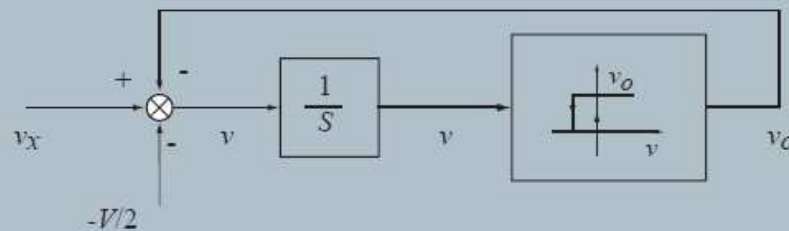


Les étapes du projet 2007-2008

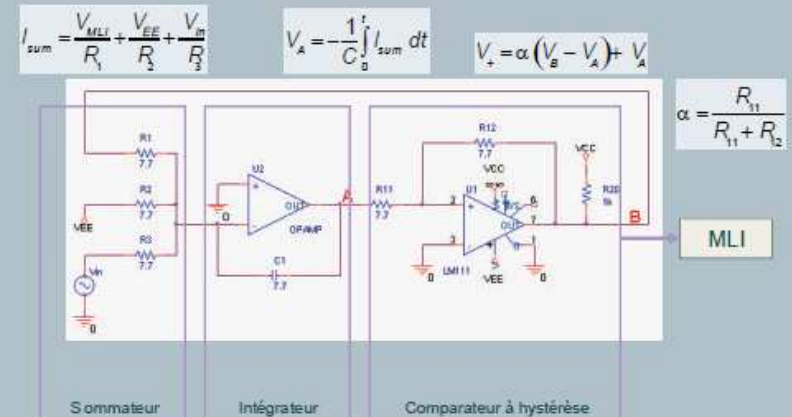
Du principe au circuit : le modulateur

Construire un modulateur de largeur d'impulsion $\Sigma\Delta$

Schéma fonctionnel



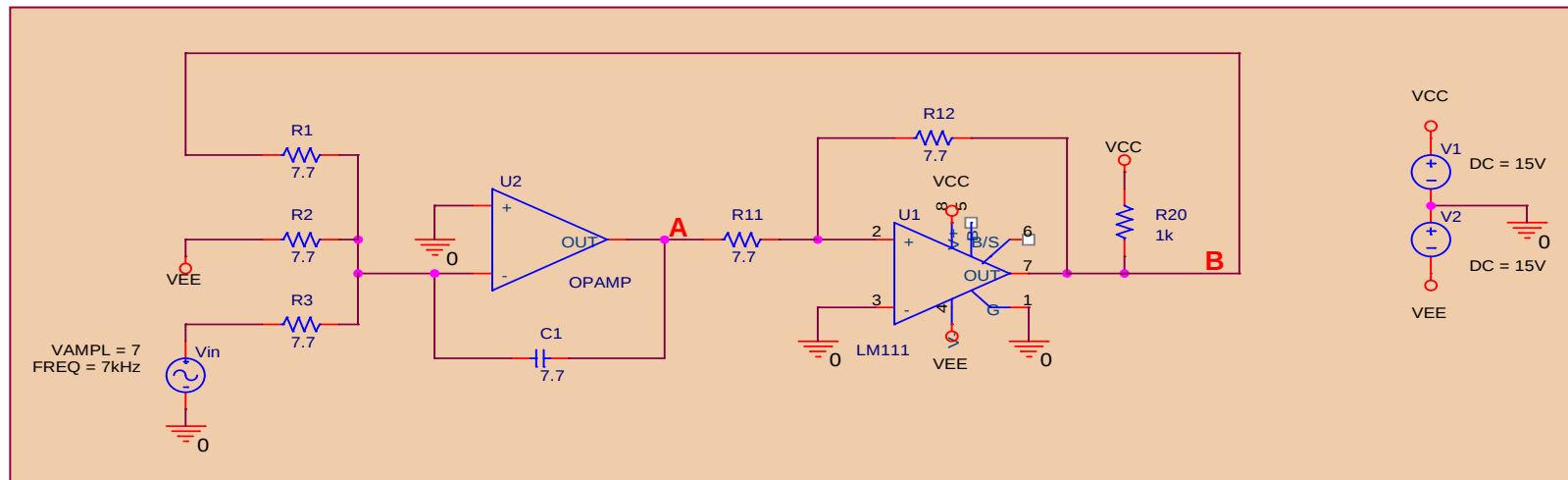
Réalisation



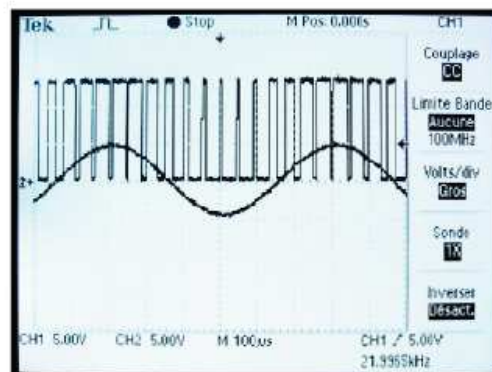
- Apprentissage de la simulation avec Spice
- Simulation (circuits simples : sommateur, intégrateur, bascule à hystérésis),
- Dimensionnement : $30 \text{ kHz} < f_{MLI} < 70 \text{ kHz}$ pour $V_O/2 < V_{in} < V_O/2$
- Validation par simulation de l'ensemble du circuit.

Les étapes du projet 2007-2008

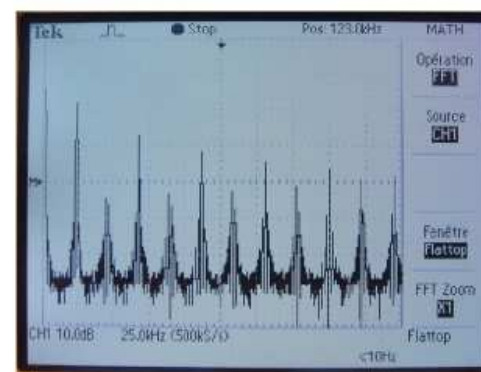
Du principe au circuit : le modulateur



in:
sine wave



PWM

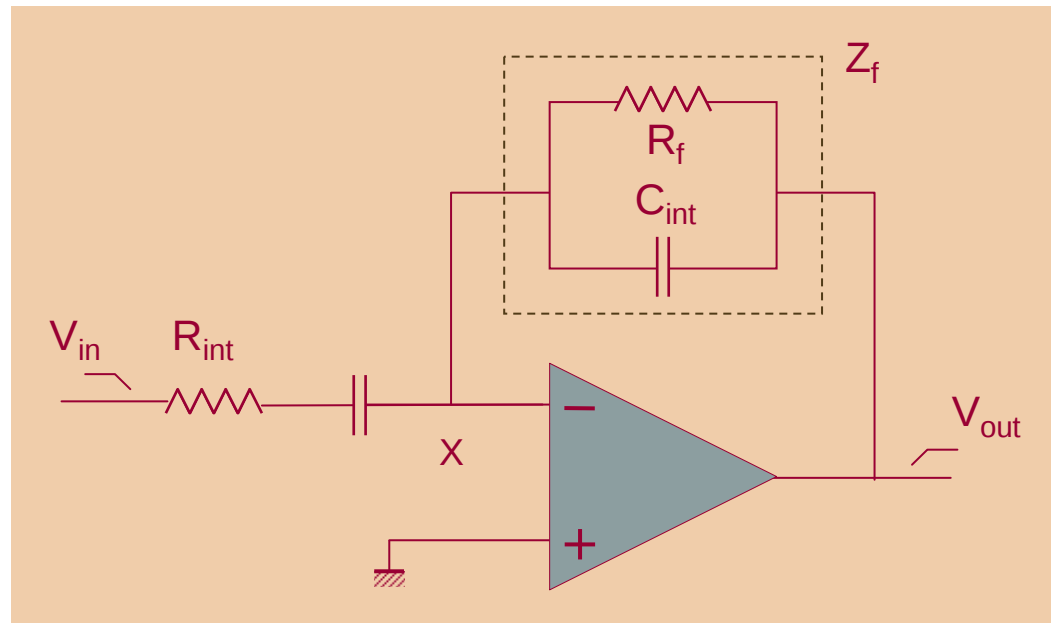


output
spectrum

Sera expliqué en
BAC 3 au cours de
signaux et systèmes

Les étapes du projet 2007-2008

Du principe au circuit : filtrage d'entrée

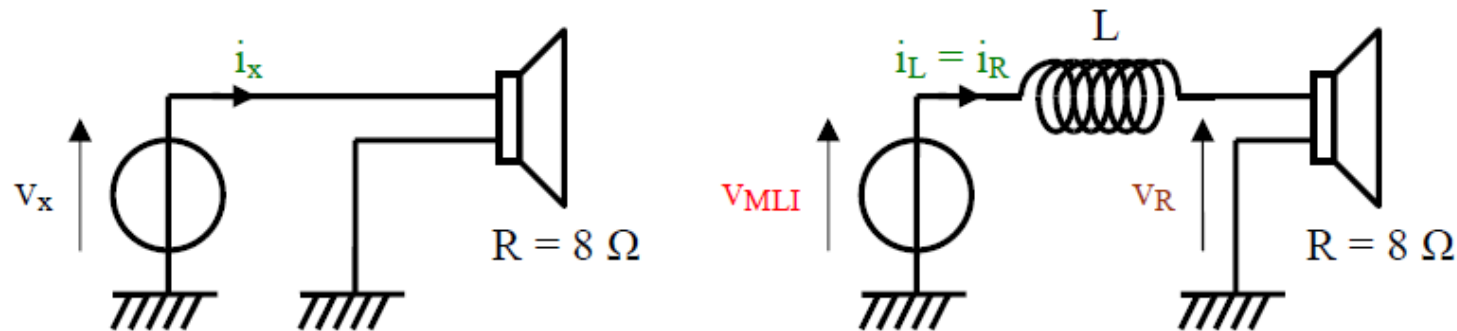


Limiter la bande passante du signal d'entrée :

=> dimensionner un filtre passe-bande à placer à l'entrée du modulateur.

Les étapes du projet 2007-2008

Du principe au circuit : alimentation du haut-parleur



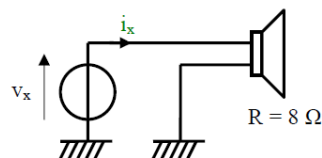
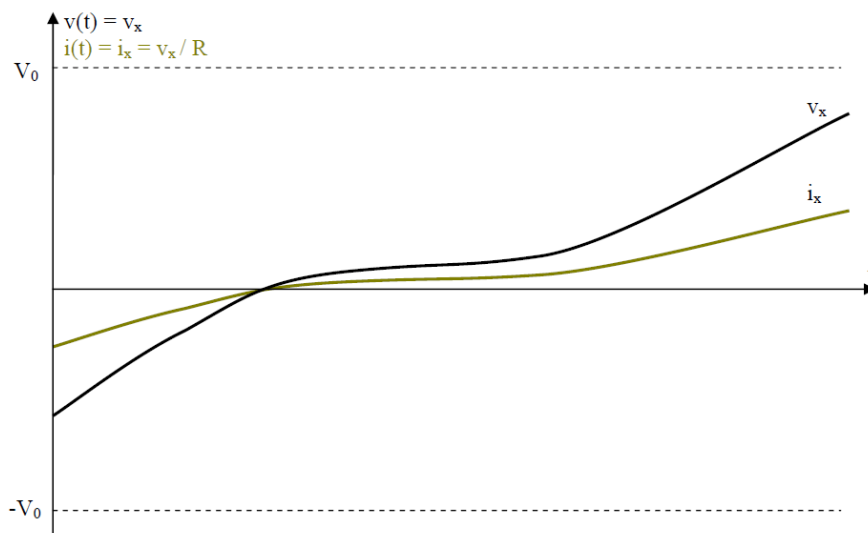
On utilise les exercices sur la réponse d'un circuit RL à un échelon et sur sa réponse en fréquence pour le calcul de L avec comme contraintes :

- Atténuation maximale de l'ondulation de courant due à la MLI,
- Sauvegarde de la bande passante.



Les étapes du projet 2007-2008

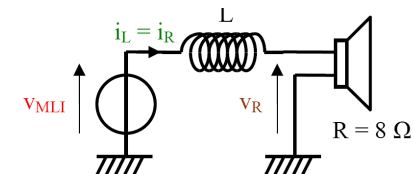
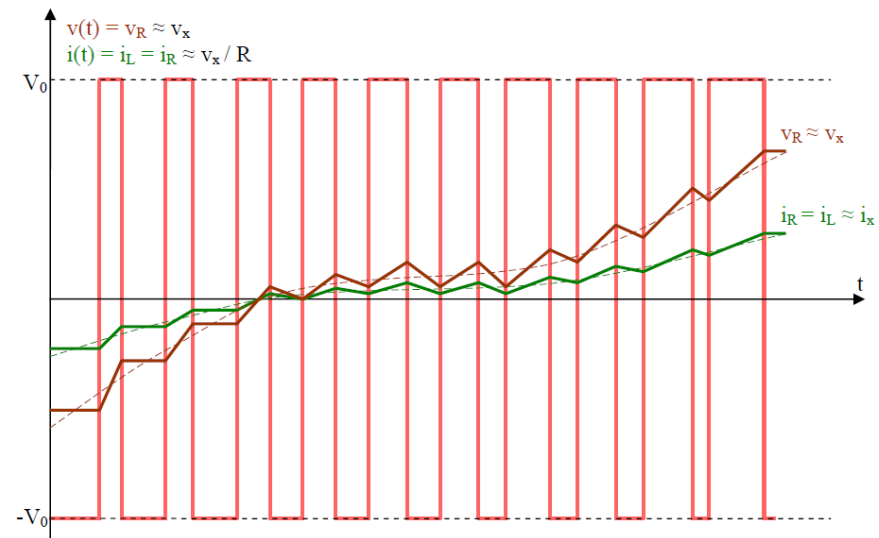
Du principe au circuit : alimentation du haut-parleur



Le HP + la self = un passe-bas ...

⇒ La composante HF sera filtrée vis-à-vis du HP,

⇒ On retrouvera la tension d'entrée $v(t)$ aux bornes de R ...



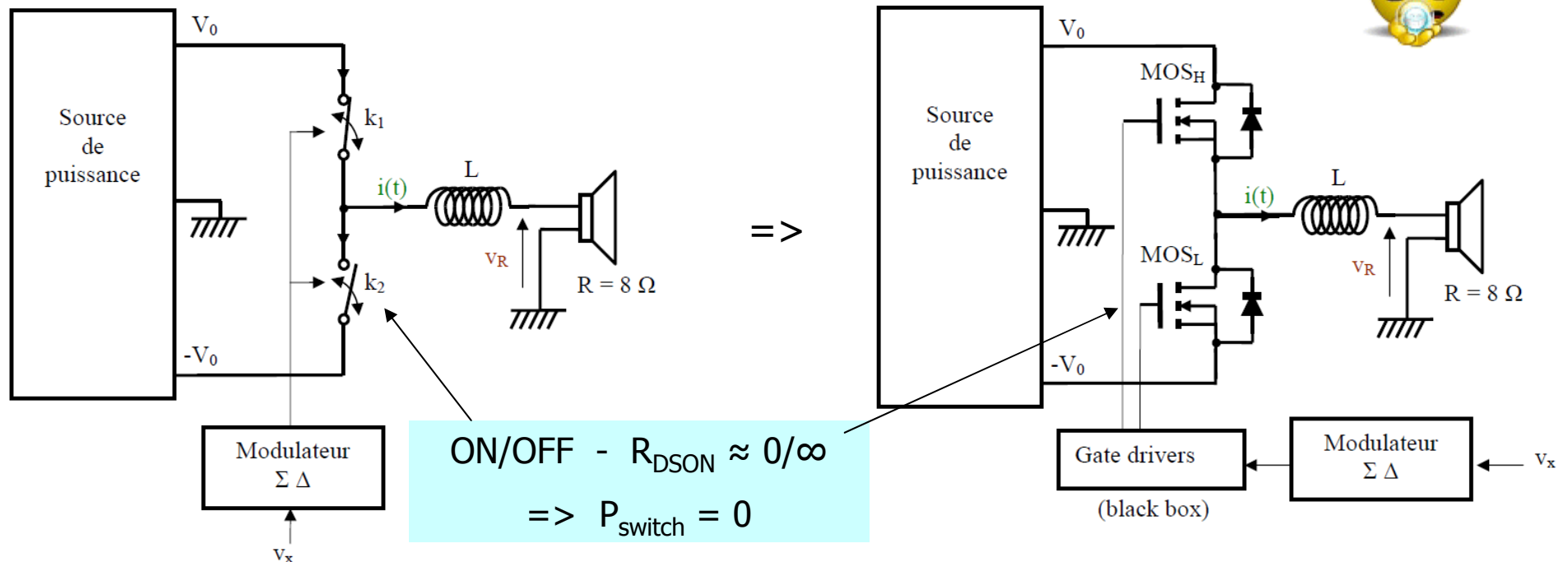
Les étapes du projet 2007-2008

Du principe au circuit : le niveau de puissance

Le comparateur ne peut fournir le courant que va consommer le haut parleur

=> Nécessité d'amplifier le signal MLI ... mais sans « gaspiller » l'énergie !

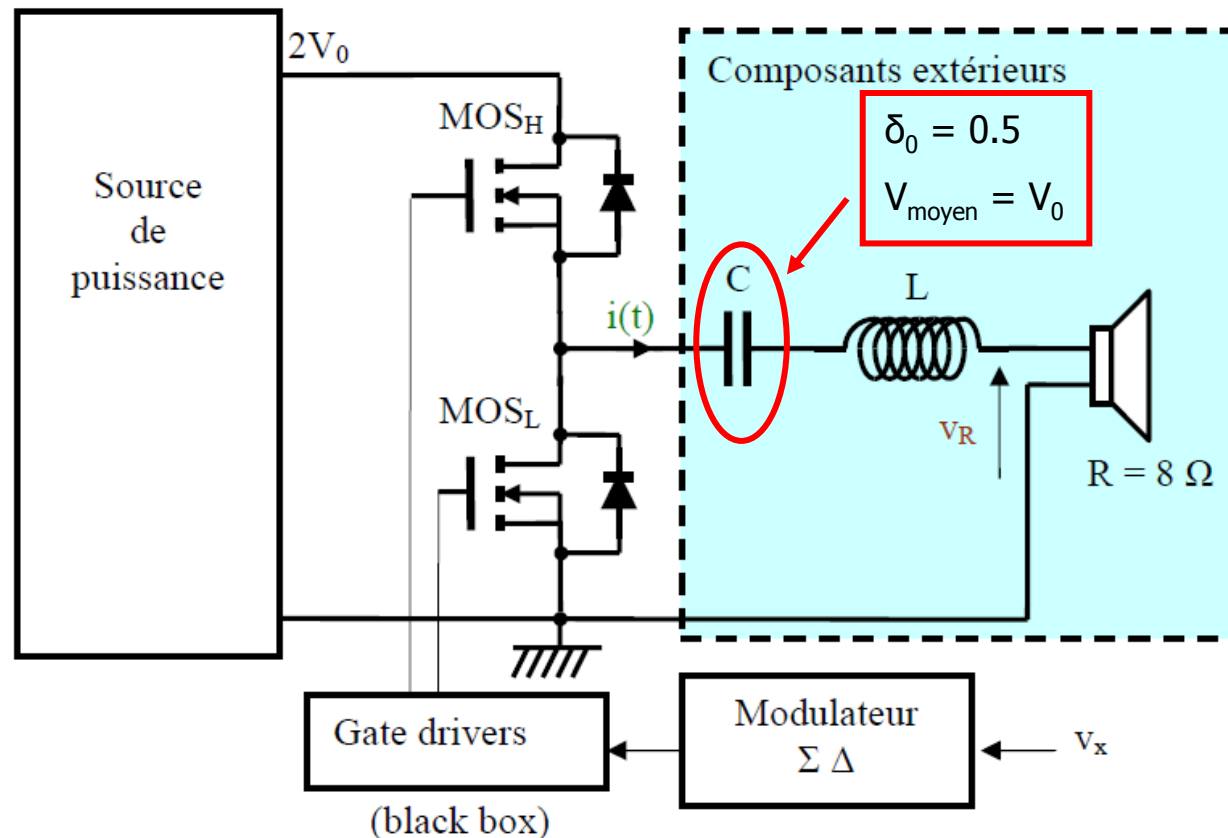
=> l'idée du « switching » sans pertes (idéalement).



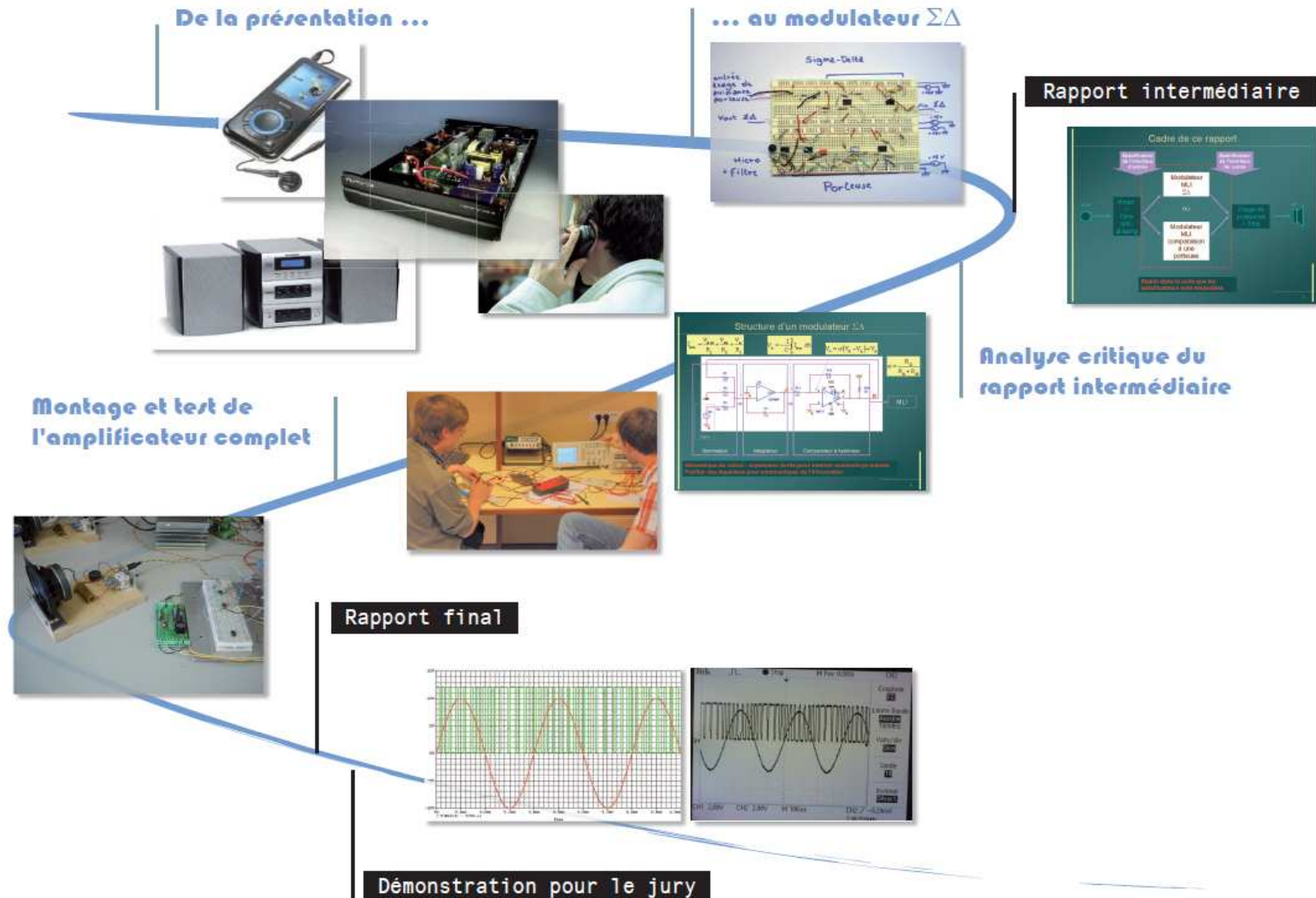
Les étapes du projet 2007-2008

Du principe au circuit : les détails pratiques

Et si la source de puissance était unique (unipolaire) ...



Les étapes du projet 2007-2008



Les étapes du projet 2007-2008

Le calendrier ...

Week	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Lectures	Temporal domain 1st order circuit + ideal Op Amp	Phasors Impedance and admittance Sinusoidal steady state			Fourier domain Frequency effect on circuit behavior Bode plot Frequency spectrum		Laplace domain 1st and 2nd order circuit transiant response		Feed back Op Amps Offset voltage, limited bandwidth						
Deadlines	Presentation ◆					Preliminary report ◆								Final report ◆	Demonstration for the jury ◆
Project support		Paper & pencil exercice PSpice demo : Hysteresis trigger Website : Spice tutorial	Paper & pencil exercice : lossy integrator	Laboratory notice : PWM $\Delta\Sigma$ modulator Spice : Questions & answers session	Website : Lab equipement manuals	Sigma delta modulator Laboratory notice $\Delta\Sigma$ PWM modulator	Consultance		Just-in-time lecture based on the preliminary reports. PSpice ABM Library	Amplifier Power output stage and reconstruction filter				Preamplifier	
Productions		Spice simulation of a compensated attenuator	Spice simulation of a lossy integrator		Assembly of a lossy integrator, amplitude and phase measurements	$\Delta\Sigma$ PWM modulator : comparison between hand calculations, simulations and measurements				comparaison PWM modulator		Characteri- sation of the complete amplifier	Microphone or mp3 input		

Valorisation : publications

Ce projet a été présenté dans la revue ...

IEEE Circuits and Systems Magazine,

Special Issue on Circuit and System Education, vol. 9 n°1

« *From KCL to Class D Amplifier* », Pages: 63-74



Il a aussi été présenté à ...

- **ISCAS 2008 / CAS Education Workshop 2008**

Views, Experience, and Prospects for Education in Circuits and Systems

22 May 2008, Sheraton Seattle Hotel, Seattle, Washington, USA

- **CETSIS 2008**

7ième Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes

27-29 octobre 2008, Université Libre de Bruxelles, Belgique

Et repris dans un numéro spécial du **journal J3eA** :

Vol. 8 No. HORS SÉRIE 1 (2009)

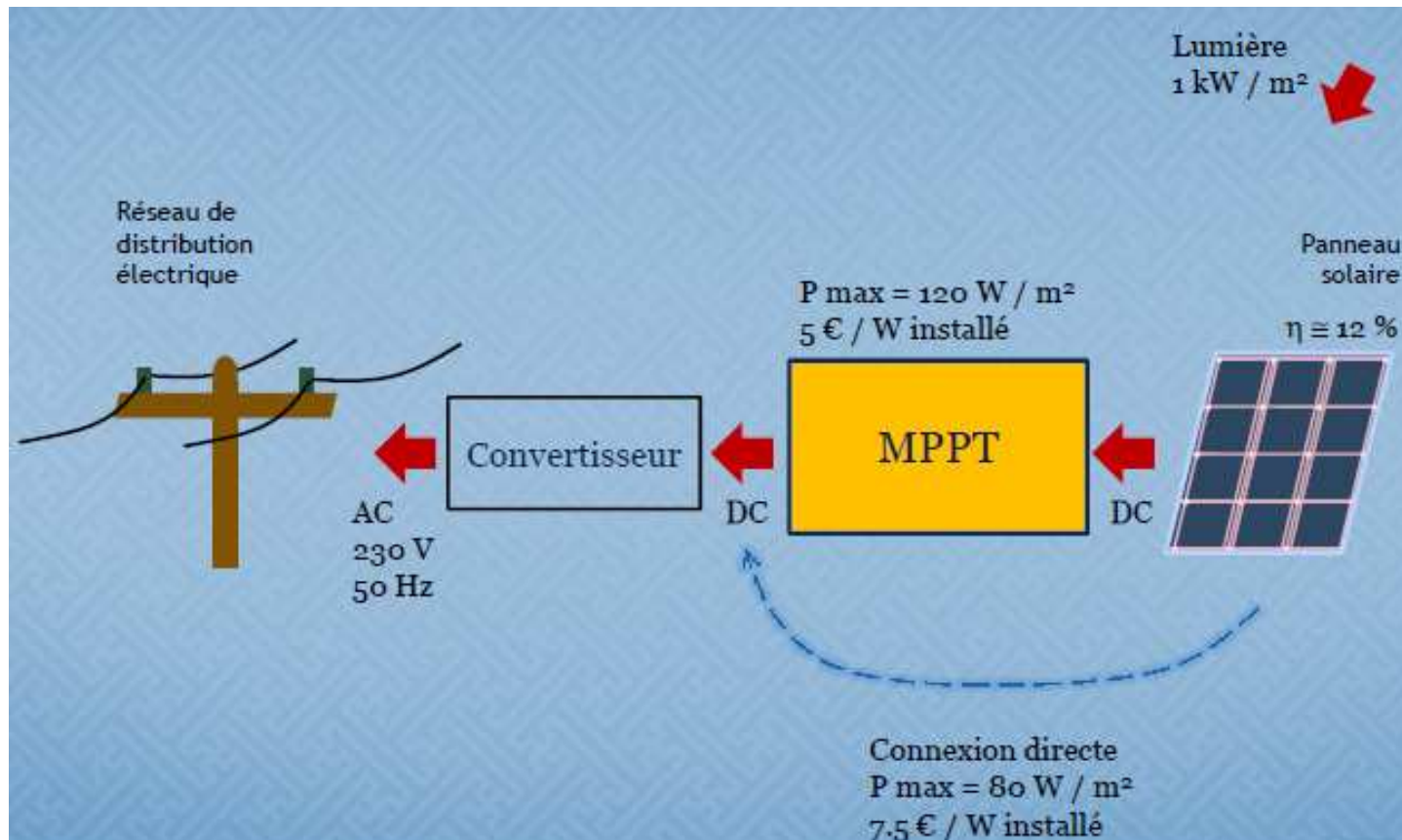
Le projet 2008-2009

Poursuite du point de puissance maximum (MPPT)
d'un panneau solaire



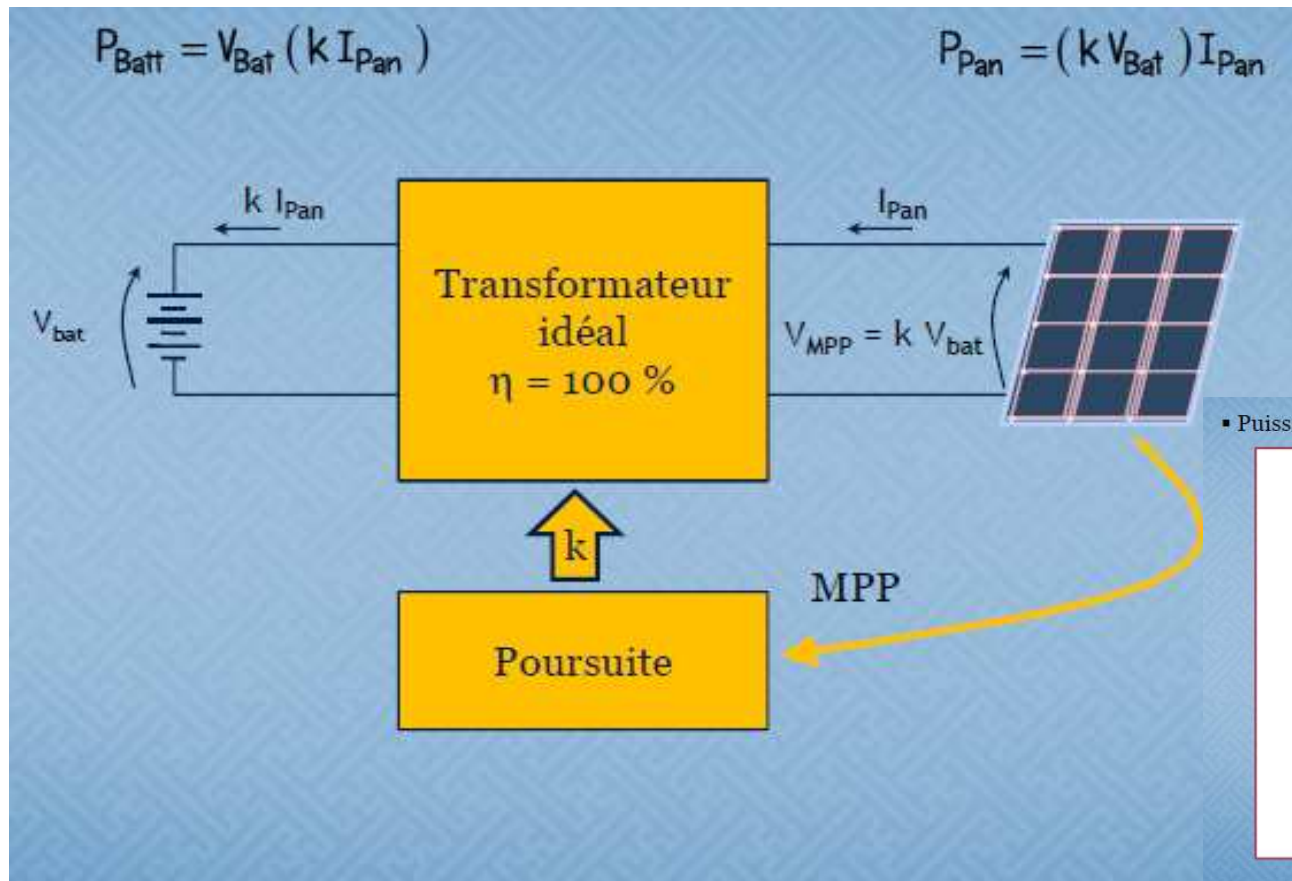
Le projet 2008-2009

Poursuite du point de puissance maximum (MPPT)
d'un panneau solaire : l'intérêt

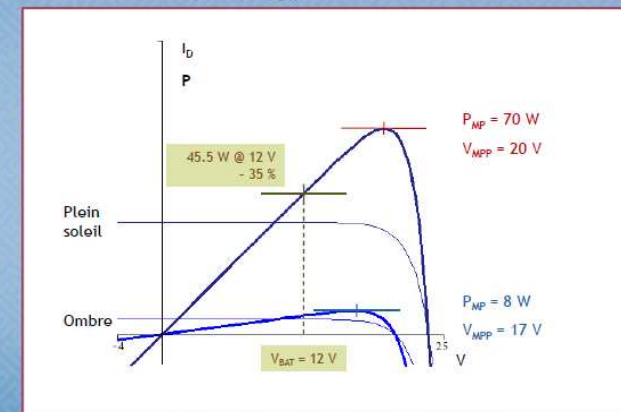


Le projet 2008-2009

Poursuite du point de puissance maximum (MPPT)
d'un panneau solaire : le principe



■ Puissance : $P = V I_D = \eta P_{light}$



Les étapes du projet 2008-2009

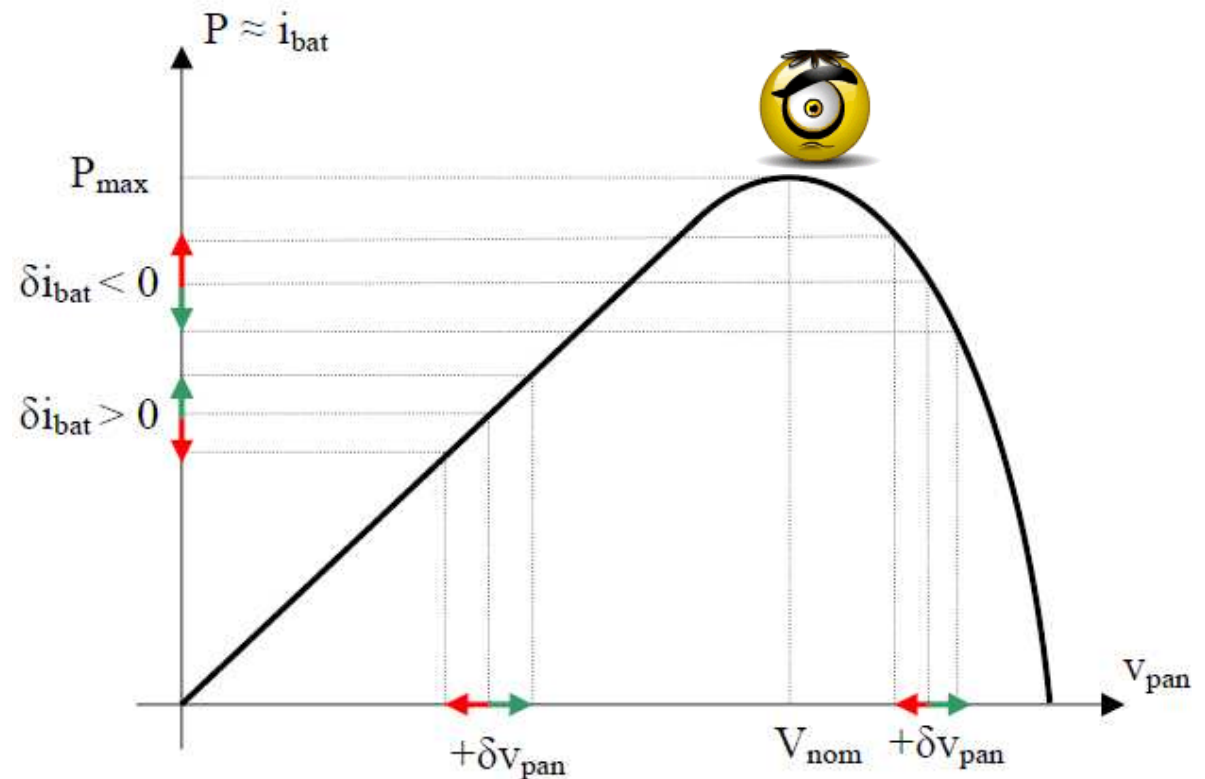
Comment ajuster « k » pour que $P = P_{\text{MAX}}$?

Mesure de P ?

Comme v_{bat} est constante, i_{bat} est proportionnel à P !

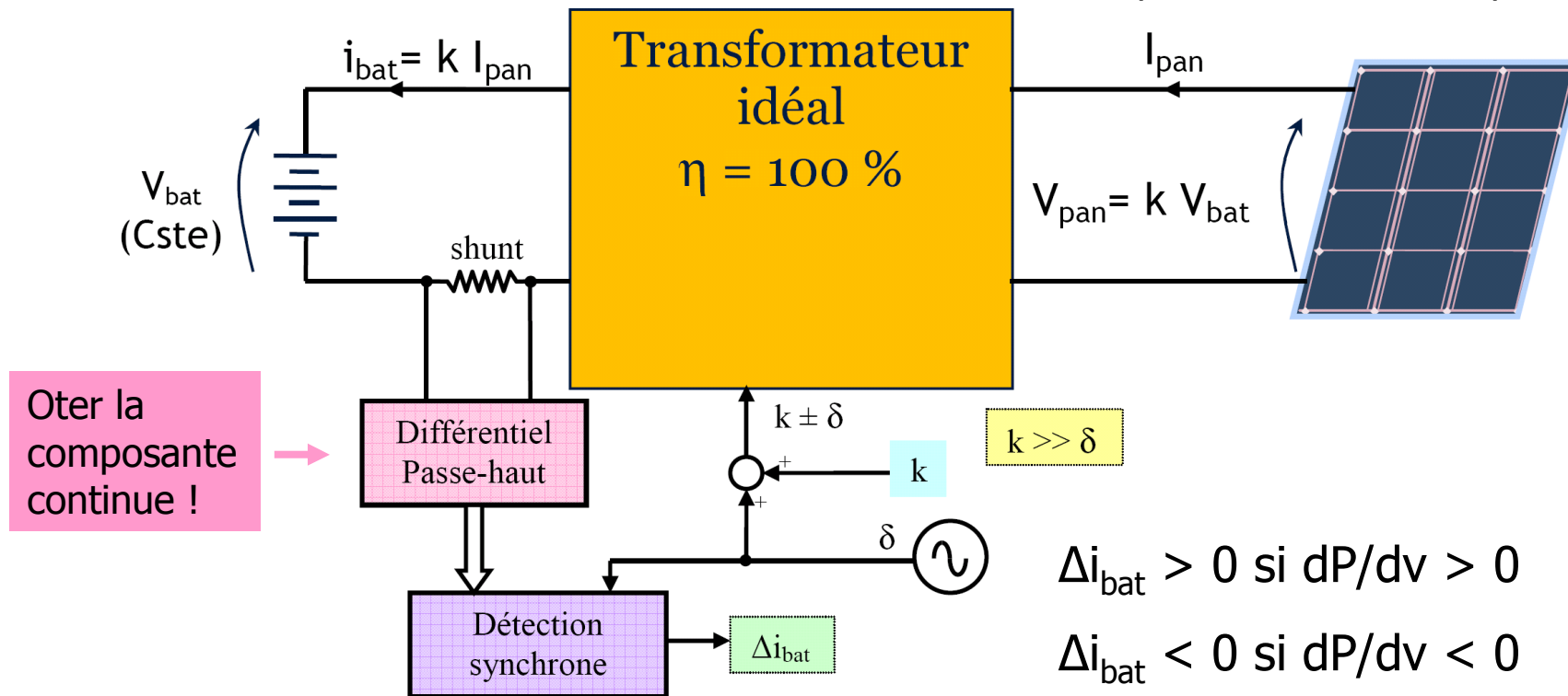
=> déterminer le signe de la dérivée de P pour la valeur k à laquelle on travaille et ...

- Augmenter k si $dP/dv > 0$
- Diminuer k si $dP/dv < 0$



Les étapes du projet 2008-2009

Comment déterminer le signe de dP/dv_{pan} ou $di_{\text{bat}}/dv_{\text{pan}}$?

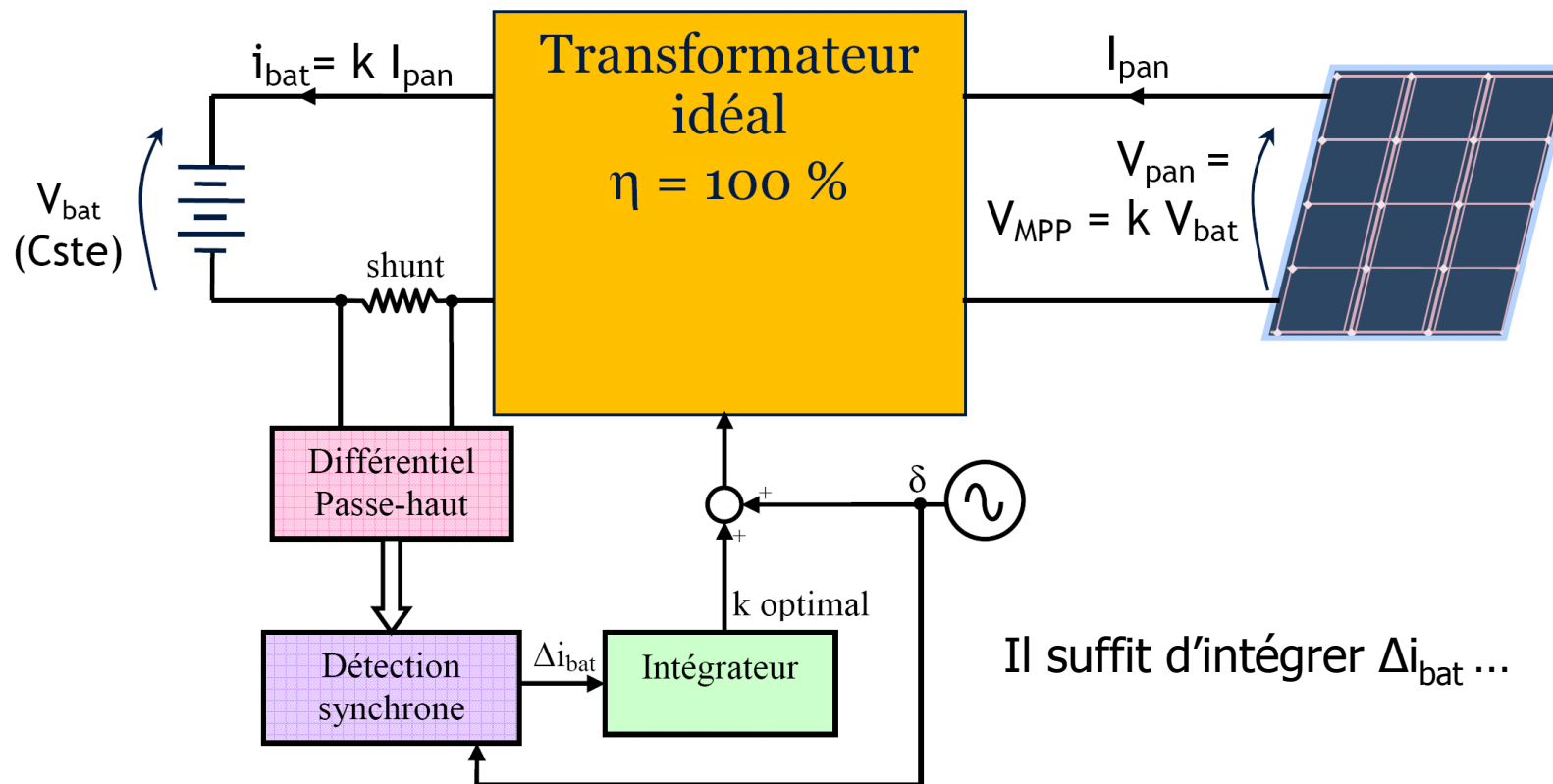


Ajouter une petite perturbation à v_{pan} et observer la variation résultante de i_{bat} par *détection synchrone* (un produit par le signe suffit) ...

$$\Delta i_{\text{bat}} = \delta i_{\text{bat}} \text{sign}(\delta v_{\text{pan}}) = 0 \text{ à } P_{\text{max}} !$$

Les étapes du projet 2008-2009

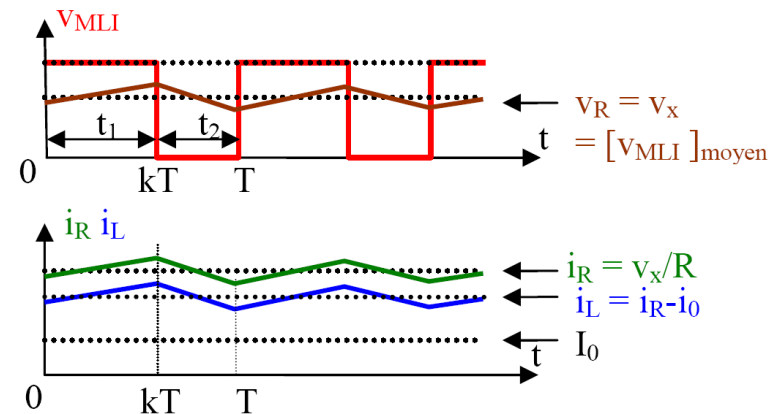
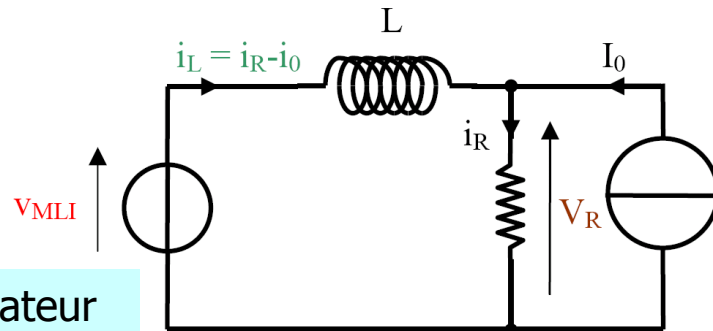
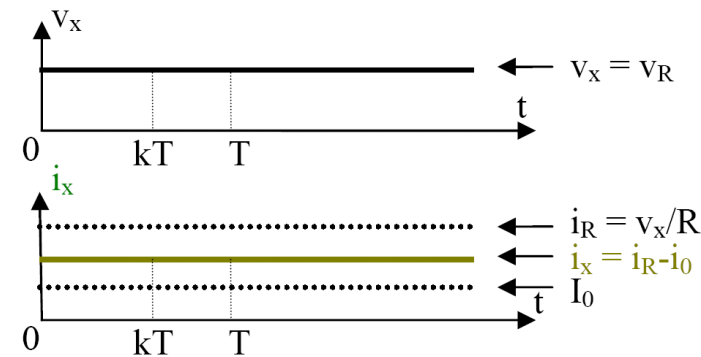
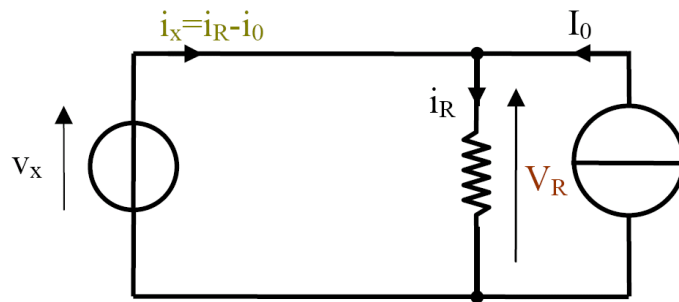
Comment « boucler la boucle » ?



Les étapes du projet 2008-2009

En parallèle : ? le transformateur idéal ?

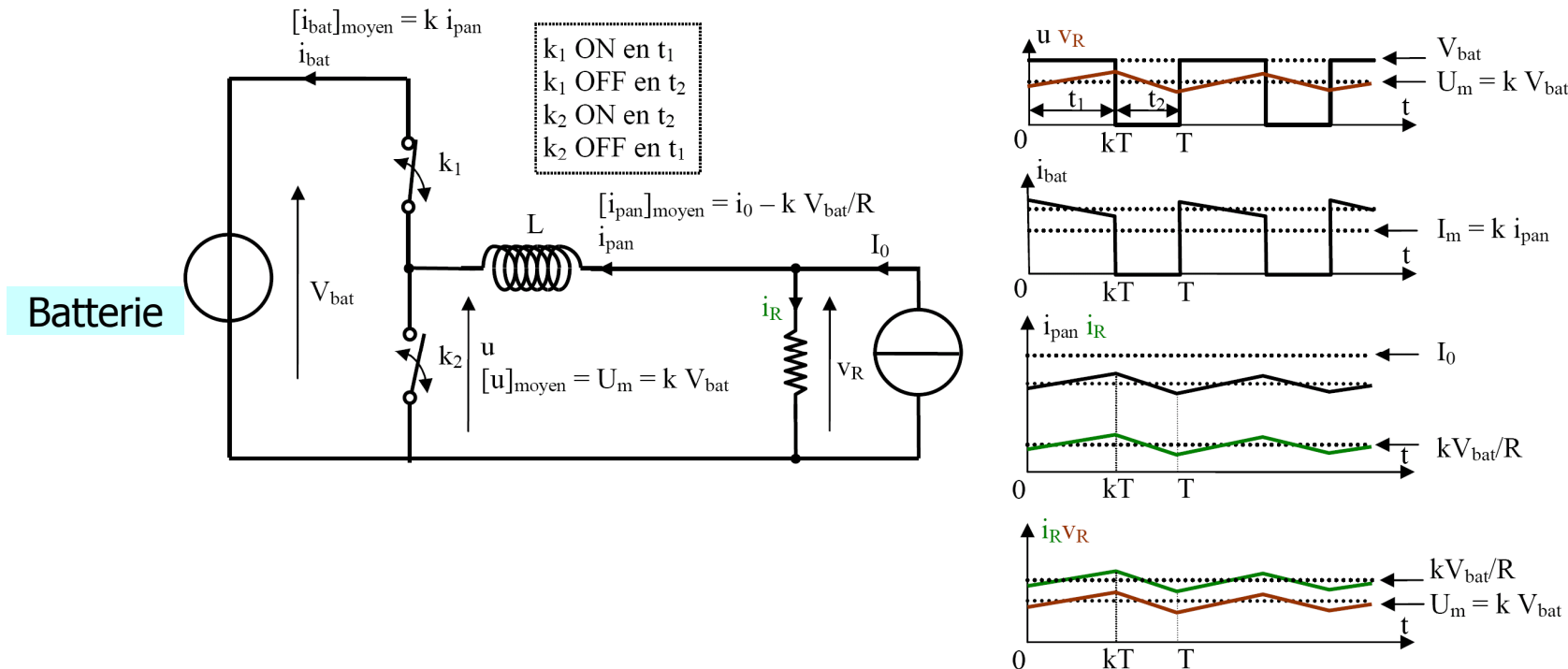
Un peu de filtrage ...



Générateur
Signal carré

Les étapes du projet 2008-2009

Et des interrupteurs ...



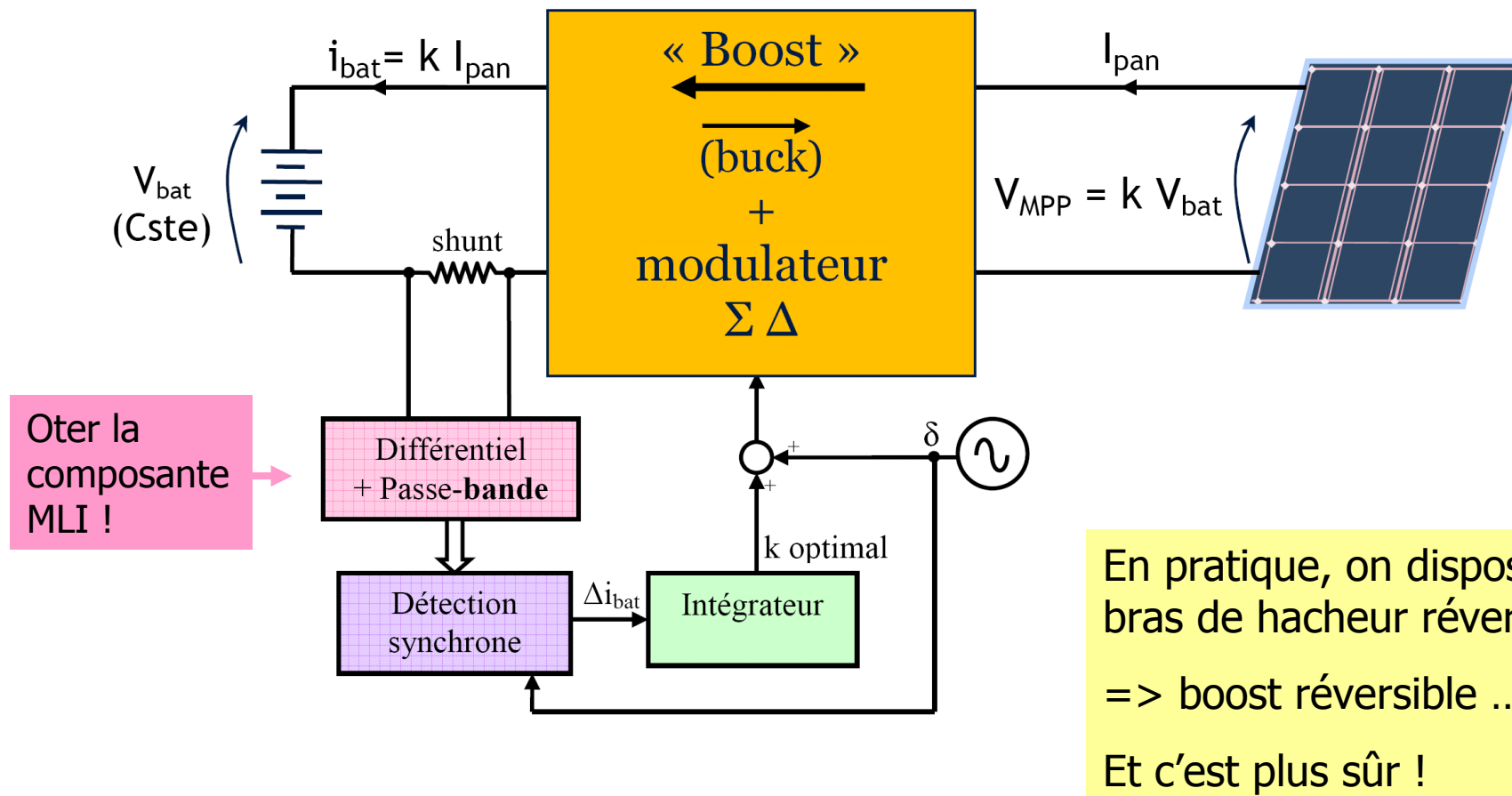
On a réalisé - *en valeur moyenne* - le transformateur idéal :

$$[I_{bat}]_{moyen} = k i_{pan} \quad \text{et} \quad [U_{pan}]_{moyen} = U_m = k V_{bat}$$

NB: ! la mesure de i_{bat} nécessite un passe-bande (DC et MLI) !

Les étapes du projet 2008-2009

Mais on ne le dira pas ...

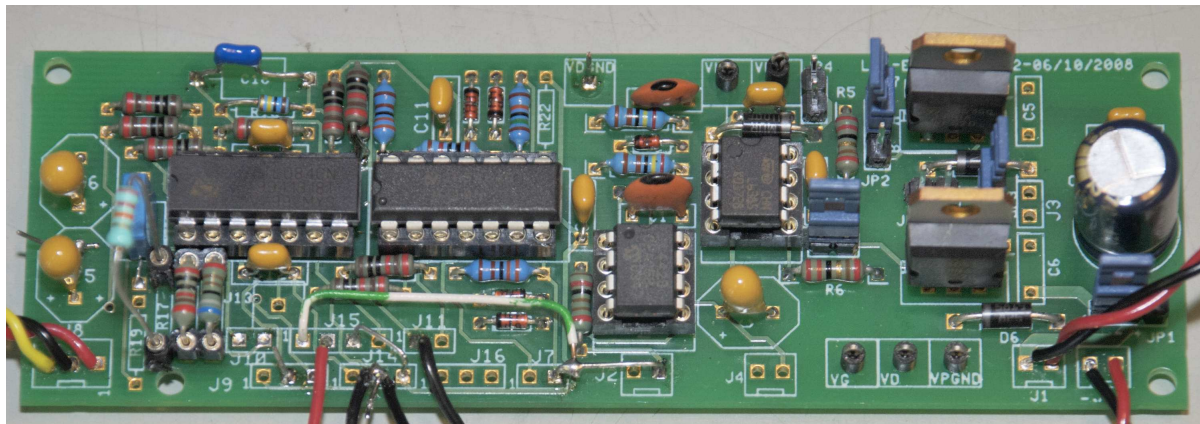
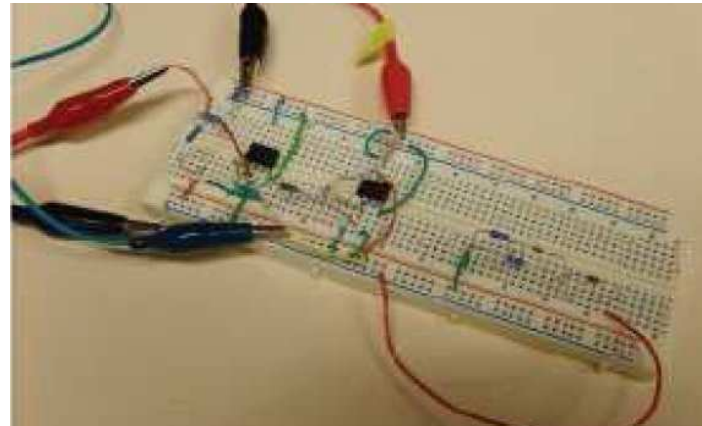


Les étapes du projet 2008-2009

Simulation et réalisation au labo ...

Breadboard :

- le filtre passe-bande
- le redresseur synchrone



Prémontés sur PCB :

- modulateur $\Sigma \Delta$
- bras de hacheur réversible