

The background of the slide features a blue circuit board pattern with white lines and a central square component.

Cours 5

Théorèmes de Thévenin et Norton

EE 105 – Sciences et technologies de l'électricité
Printemps 2025

Prof. Camille Brès - camille.bres@epfl.ch

EPFL Objectifs pour aujourd'hui

Pouvoir remplacer un dipôle actif possédant multiples sources et multiples résistances par un circuit équivalent plus simple:

- Théorème de Thévenin (source de tension) et de Norton (source de courant)

Savoir utiliser les dipôles équivalents pour aider à l'analyse de circuit.

Savoir adapter un circuit en puissance.

Méthode de résolution

- Bien observer le schéma, définir les grandeurs et les sens (courant, tension).
- Réduire le schéma en combinant éléments en série et en parallèle.
- Faire l'analyse pour obtenir les grandeurs fondamentales puis les grandeurs associées aux éléments simplifiés.

Mise en équation: méthode plus générale

- Seulement des sources de tensions indépendantes.
- Se base sur l'analyse des mailles indépendantes et la loi de Kirchhoff pour les mailles + loi d'Ohm.
- Peuvent être représentées sous forme matricielle.

$$\begin{bmatrix} R_{kl} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{mk} \end{bmatrix}$$

Principe de superposition: analyse du circuit une source à la fois

- La grandeur finale étant la somme des grandeurs partielles

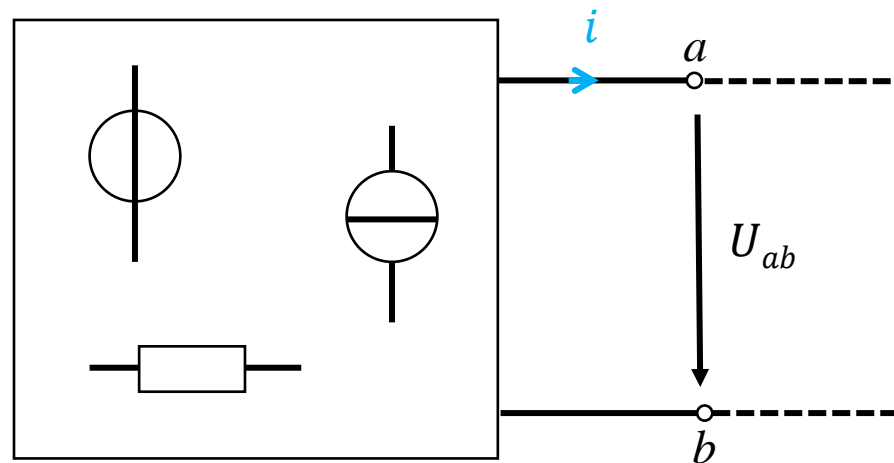
Thévenin et Norton

EPFL Les principes de Thévenin et de Norton

Dépendant de l'analyse de circuit, l'opération interne d'une partie du circuit n'est pas nécessairement d'intérêt ou essentielle pour comprendre le fonctionnement global.

Seules les caractéristiques aux bornes de cette partie du circuit sont nécessaires.

Il est utile de pouvoir remplacer la partie du circuit par son équivalent, dit de Thévenin ou de Norton.



Principe (théorème) de Thévenin ou Norton:

Un circuit composé de **multiples sources** et **multiples résistances** peut être remplacé par un circuit qui consiste en **une seule résistance** en série ou parallèle avec **une seule source** indépendante.

Pour pouvoir appliquer ces principes, nous allons devoir calculer:

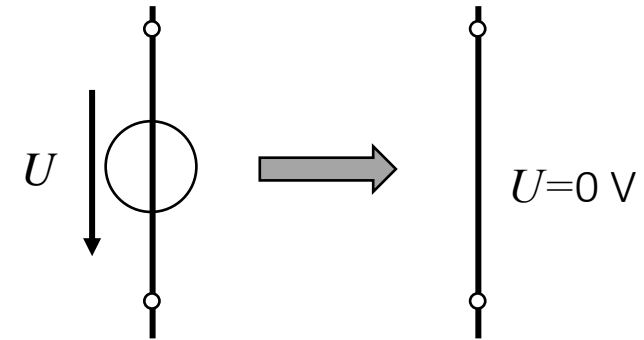
- La tension circuit ouvert et/ou le courant de court-circuit.
- La résistance interne du circuit obtenue lorsque toutes les sources ont été éteintes.

Il faut également identifier clairement les bornes de sortie du circuit à remplacer

EPFL Rappel: éteindre une source

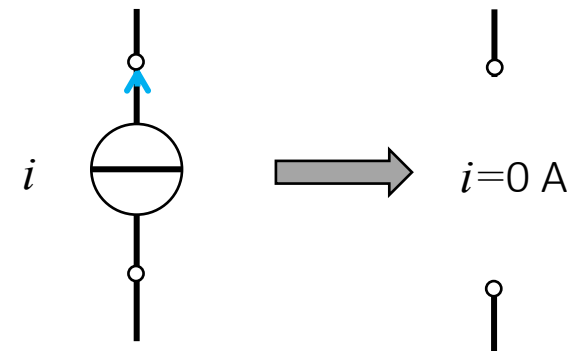
Eteindre une source de tension idéale:

- Résistance de la source nulle (pas de chute de tension)
- Elle est remplacée par un court circuit



Eteindre une source de courant idéale

- Résistance de la source infinie (pas de passage de courant)
- Elle est remplacée par un circuit ouvert



EPFL Théorème de Thévenin

Le **théorème de Thévenin** a été initialement découvert par le scientifique Allemand **Hermann von Helmholtz** en 1853, puis en 1883 par l'ingénieur télégraphe français **Léon Charles Thévenin**. Il s'utilise pour convertir une partie d'un réseau complexe en un dipôle plus simple



Hermann von Helmholtz (1821-1894)



Léon Charles Thévenin (1857-1926)

EPFL Théorème de Thévenin (1)

Soit N un réseau électrique linéaire vu de deux points (dipôle).

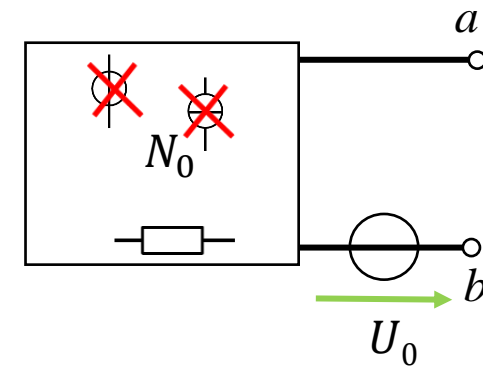
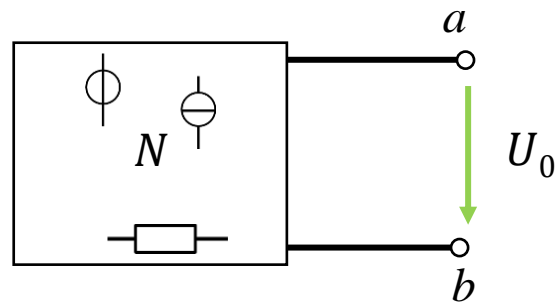
- Ce réseau doit être composé **uniquement** de sources et de résistances

Soit U_0 la tension à vide aux bornes du dipôle N .

- On parle de tension circuit ouvert: N n'est pas connecté (par de charge)

Nous définissons N_0 , le dipôle N lorsque toutes les sources de N sont éteintes.

Le dipôle N est équivalent à N_0 en série avec une source de tension U_0

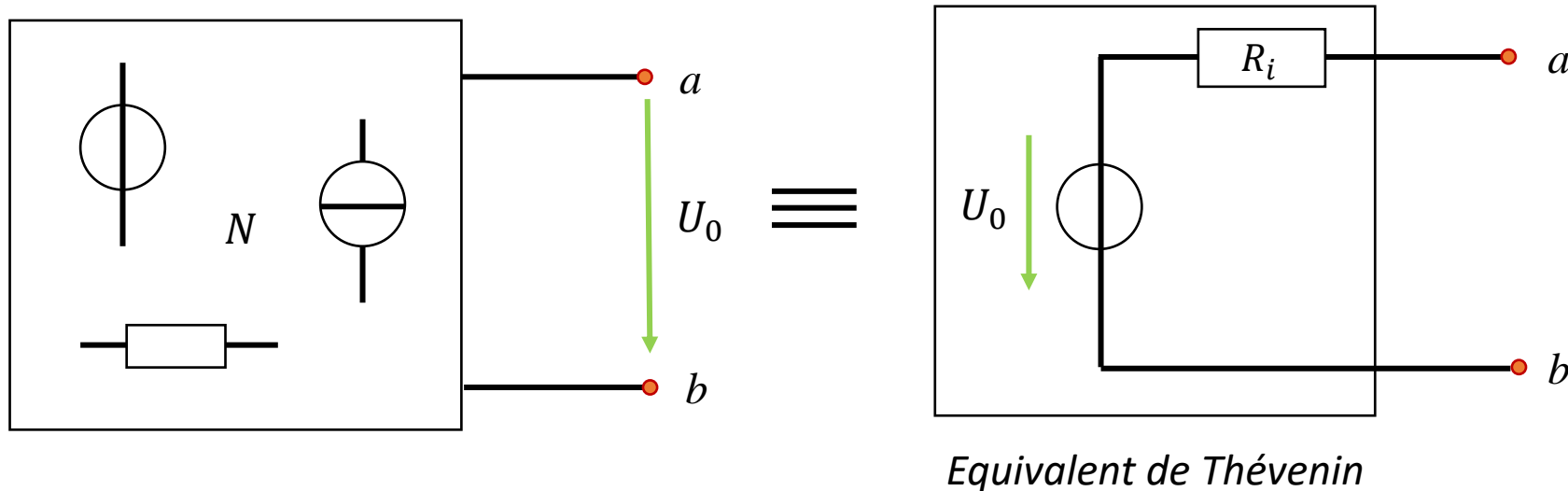


EPFL Théorème de Thévenin (2)

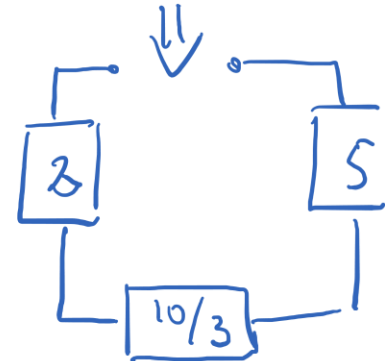
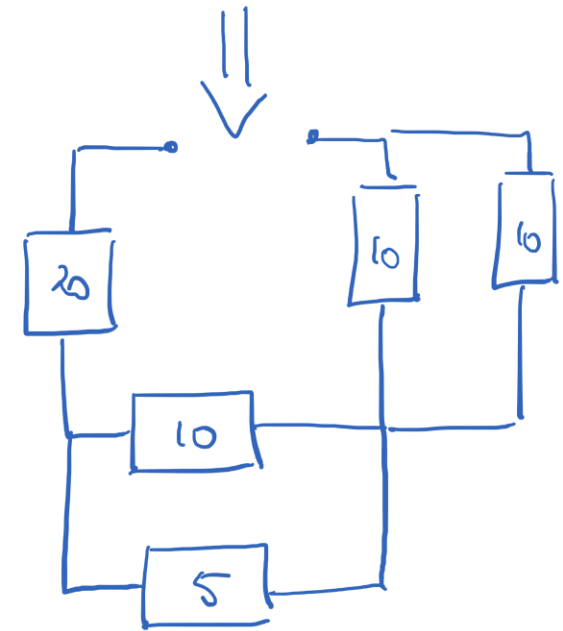
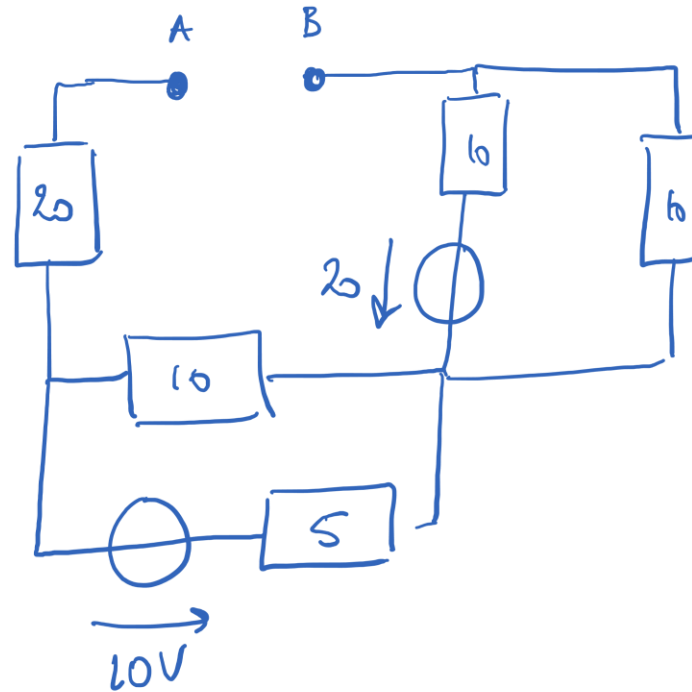
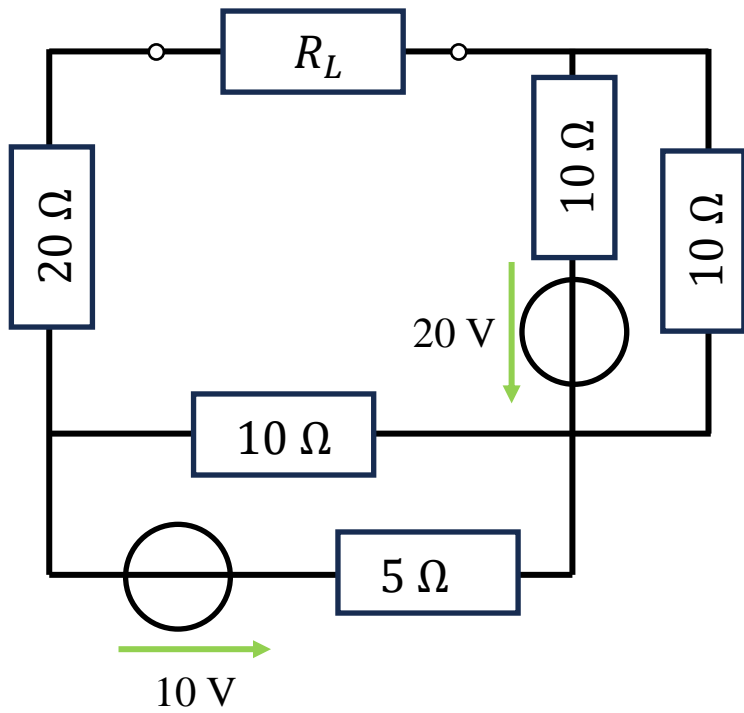
Soit R_i : la résistance équivalente de N_0 (résistance interne).

- La résistance équivalente du dipôle N vue des bornes du circuit lorsque toutes les sources idéales sont éteintes.

Le dipôle N est équivalent au dipôle composé d'une source de tension U_0 en série avec une résistance R_i



EPFL Résistance interne 'vue' par R_L

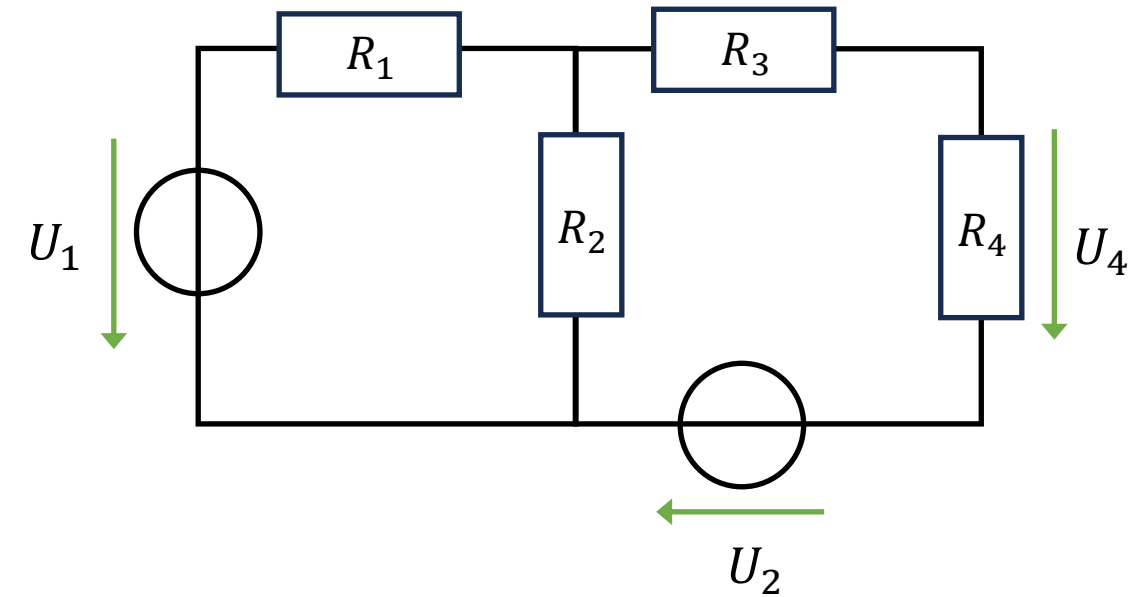


=>

$$R_i$$

$$25 + \frac{10}{3} = \frac{85}{3} \Omega$$

EPFL Exemple Thévenin



$$U_1 = 10 \text{ V}$$

$$U_2 = 3 \text{ V}$$

$$R_1 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = 5 \text{ k}\Omega$$

Appliquons le principe de Thévenin pour déterminer U_4 en fonction de R_4 .

Le **Théorème de Norton** pour les réseaux électriques établit que tout circuit linéaire est équivalent à une source de courant idéale i , en parallèle avec une simple résistance. L'énoncé de ce théorème a été publié en 1926 par l'ingénieur **Edward Lawry Norton**.



Edward Lawry Norton (1898-1983)

EPFL Théorème de Norton

Soit N un réseau électrique linéaire vu de deux point (dipôle)

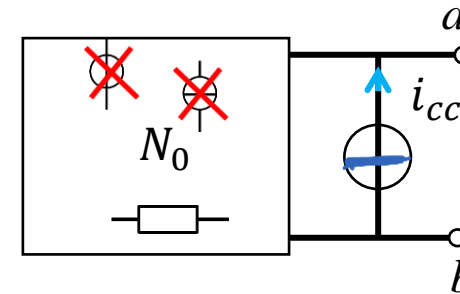
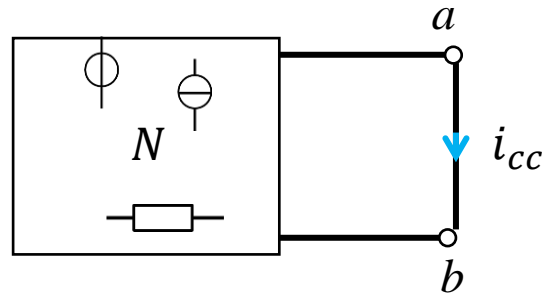
- Ce réseau est composé uniquement de sources et de résistances

Soit i_{cc} : courant sortant de la borne positive de N lorsque celui-ci est en court circuit

- Le courant allant de la borne a à la borne b

Nous définissons N_0 , le dipôle N lorsque toutes les sources de N sont mises à nul

Dipôle N est équivalent à N_0 en parallèle avec une source de courant i_{cc}

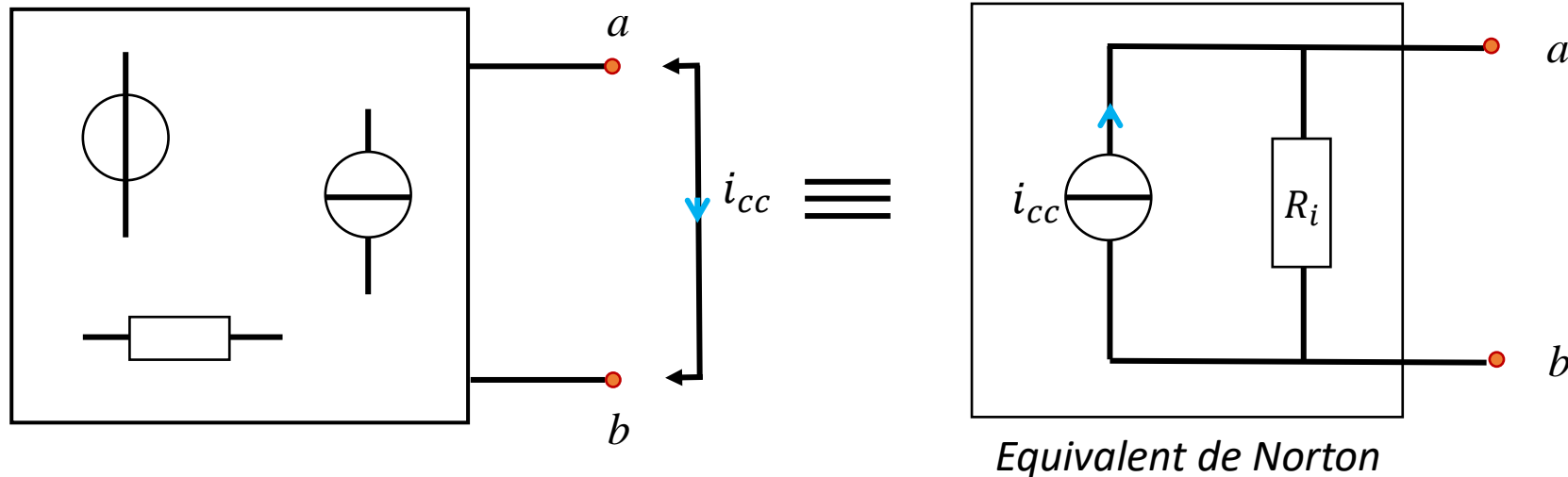


EPFL Principe de Norton

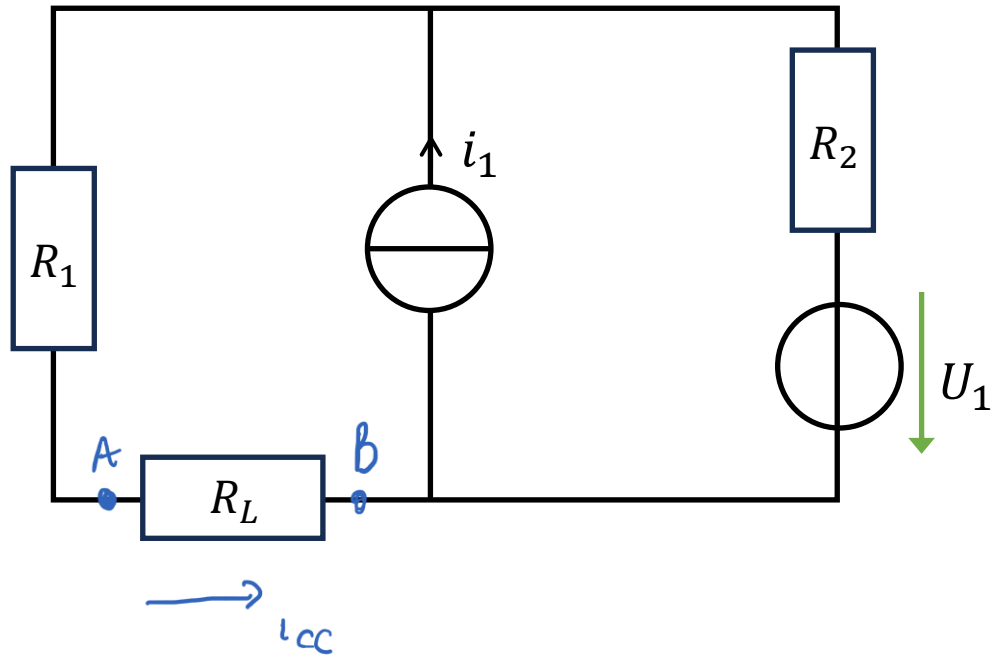
Soit R_i : la résistance équivalente de N_0 (résistance interne)

- La résistance équivalente du dipôle N vue de ces bornes, lorsque toutes les sources idéales sont éteintes

Le dipôle N est équivalent au dipôle composé d'une source de courant i_{cc} en parallèle avec une résistance R_i

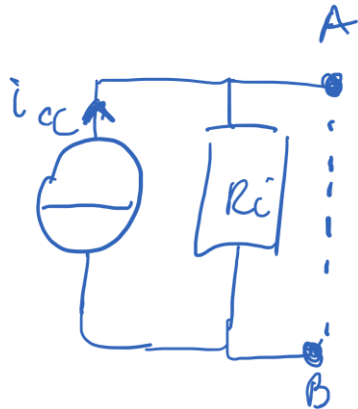


EPFL Exemple Norton

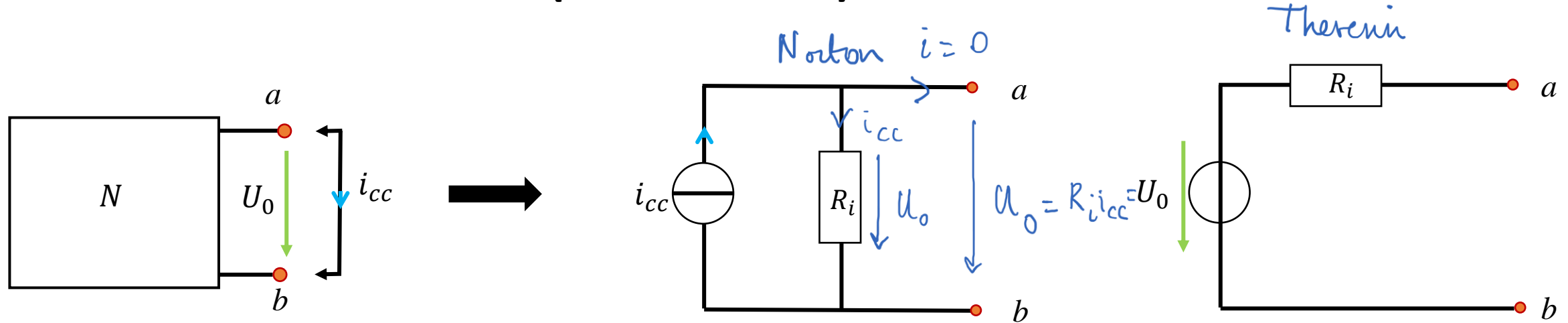


$$i_1 = 5 \text{ mA}$$
$$U_1 = 10 \text{ V}$$

$$R_1 = 10 \text{ k}\Omega$$
$$R_2 = 2 \text{ k}\Omega$$



EPFL Résistance interne (de Thévenin)



Les équivalents Thévenin/Norton d'un circuit N ont la même résistance interne R_i

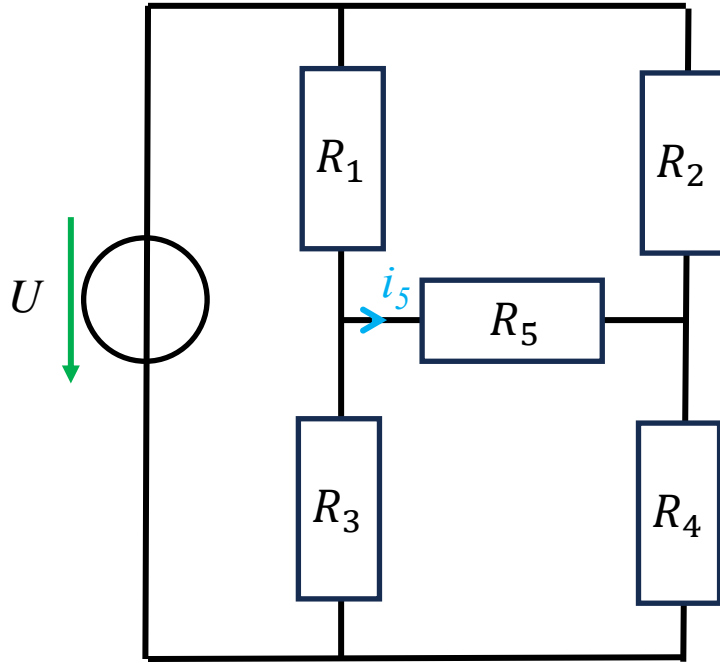
- La tension circuit ouvert et le courant court-circuit sont liés par la loi d'Ohm

$$U_0 = R_i i_{cc}$$

Pour trouver le circuit équivalent de Thévenin ou Norton:

- Soit : calculer U_0 **ou** i_{cc} , et calculer la résistance interne R_i séparément
- Soit : calculer U_0 **et** i_{cc} , et obtenir R_i en utilisant la loi d'Ohm

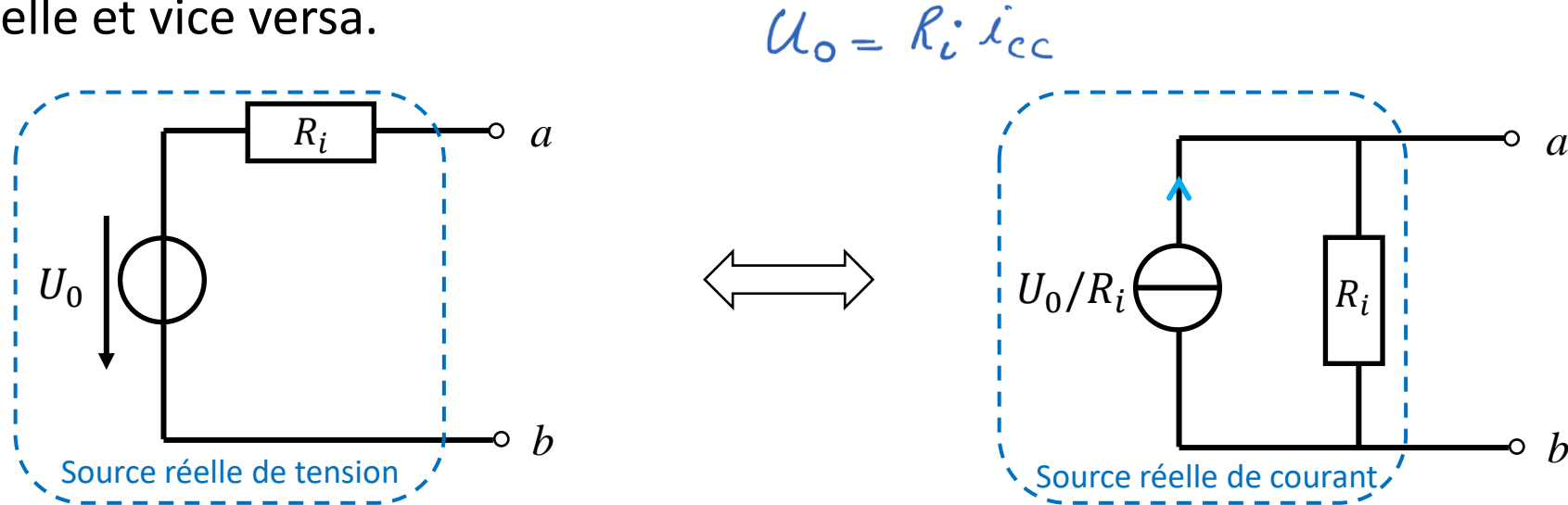
EPFL Exemple: calcul de circuit à l'aide d'équivalence



Equivalence source de tension – source de courant

EPFL Source de tension vs de courant

Norton et de Thévenin sont également utiles pour transformer source de tension réelle en source de courant réelle et vice versa.



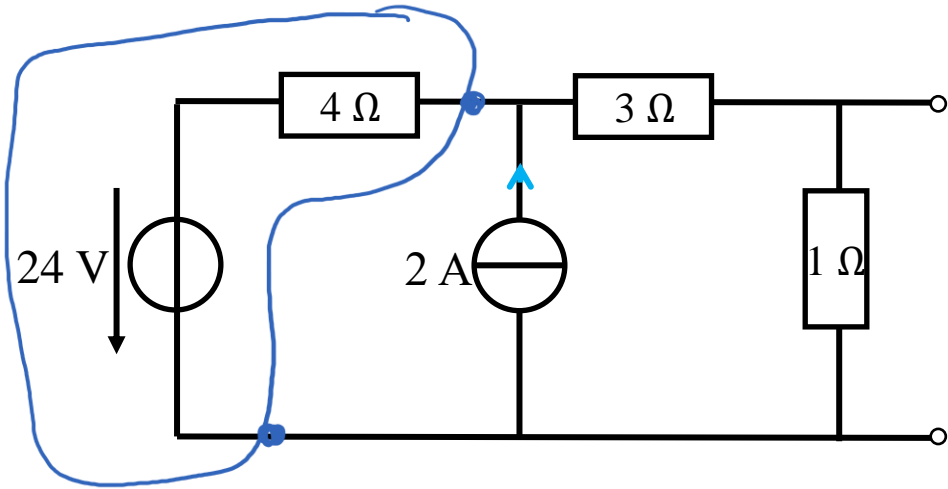
Permet de modifier le circuit pour faire apparaître:

- des sources de tension en série et des sources de courant en parallèle

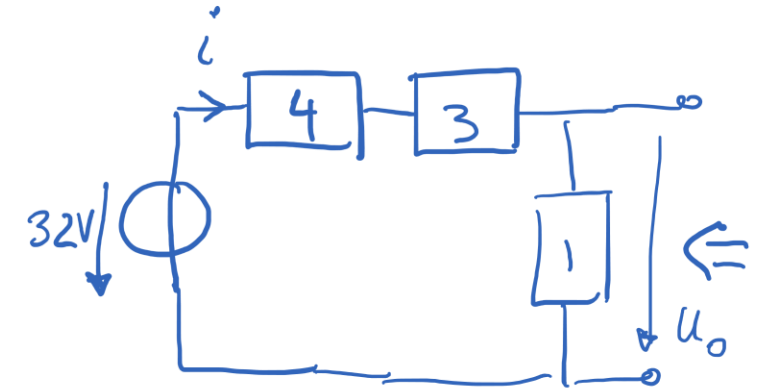
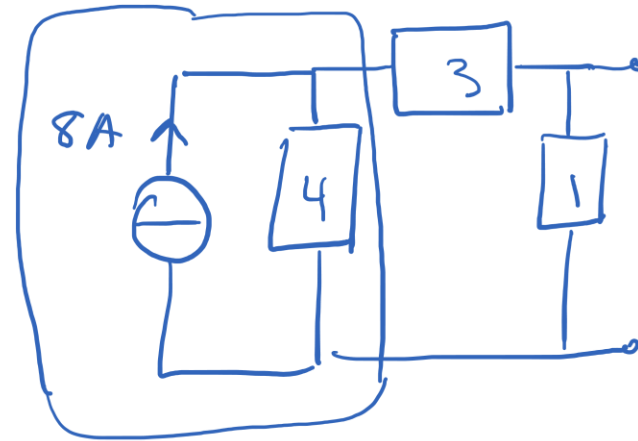
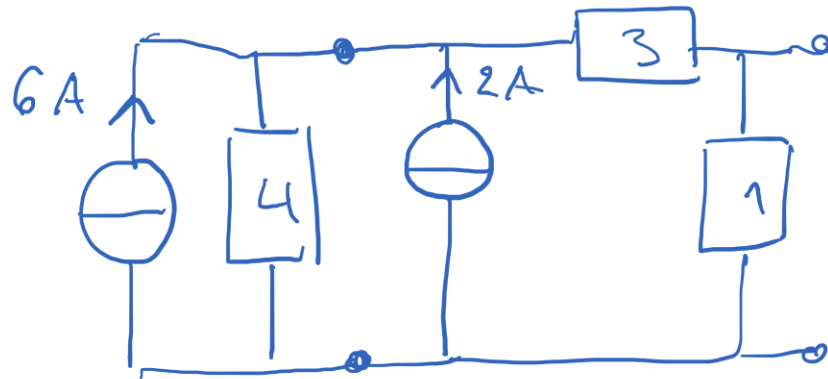
$$U_S = \sum_{k=1}^N U_k$$

$$i_S = \sum_{k=1}^N i_k$$

EPFL Exemple transformée de sources

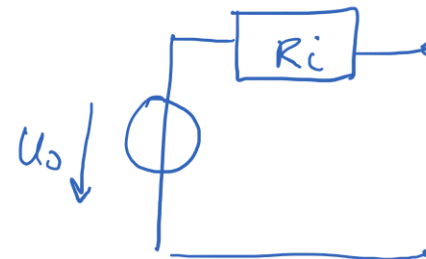


Déterminons les équivalents de Thévenin et Norton en transformant les sources réelles



$$\underline{R_i}: R_i = \frac{7}{8} \Omega$$

$$U_o: U_o = \frac{1}{8} 32 =$$

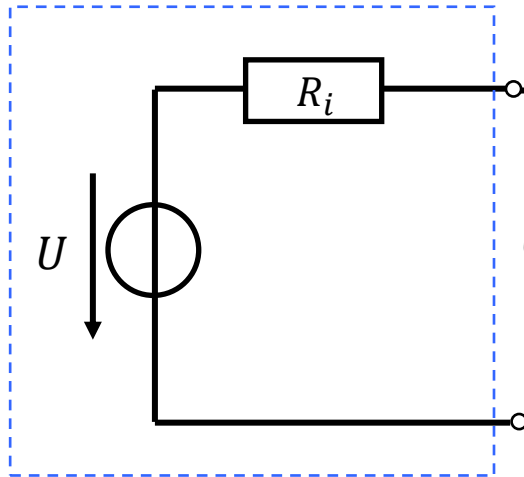


Adaptation de puissance

EPFL Adaptation d'un circuit

Il est souvent important de savoir déterminer la puissance maximale qui peut être transmise à une charge ayant une résistance R_L

Pour cela nous utilisons le principe de Thévenin:



Puissance délivrée: $P_L = U_L i$

Kirchhoff de la maille:
$$i = \frac{U}{R_i + R_L}$$

Loi d'Ohm:
$$U_L = R_L i$$

Nous pouvons donc en conclure que la puissance transmise est:

$$P_L = U_L i$$

$$P_L = R_L i^2$$

$$P_L = U^2 \frac{R_L}{(R_i + R_L)^2}$$

La puissance délivrée dépend de la résistance R_L .

La forme de $P = f(R_L)$ n'est pas triviale

Le rendement est donné par :

$$\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{fournie (source)}}} = \frac{U_L i}{U i}$$

$$\eta = \frac{R_L i^2}{(R_i + R_L) i^2} = \frac{R_L}{(R_i + R_L)}$$

Puissance maximale: adaptation d'un circuit

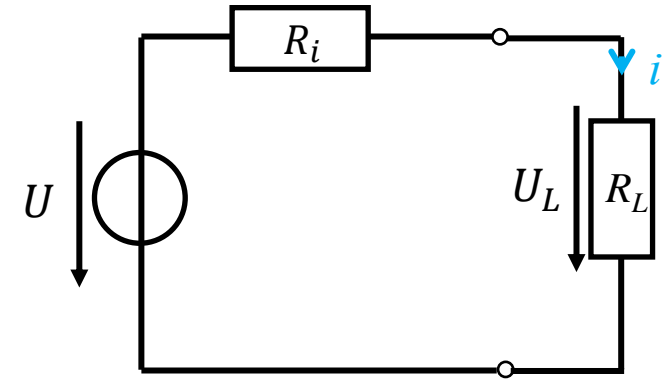
Cas extrêmes:

$$P_L = U^2 \frac{R_L}{(R_i + R_L)^2}$$

- $R_L \rightarrow 0$, alors $P_L \rightarrow 0$
- $R_L \rightarrow \infty$, alors $P_L \rightarrow 0$

Valeur maximale quand $\frac{dP_L}{dR_L} = 0$

$$\frac{dP_L}{dR_L} = \frac{(R_i + R_L)^2 - 2R_L(R_i + R_L)}{(R_i + R_L)^4} = 0 \Rightarrow R_i = R_L$$



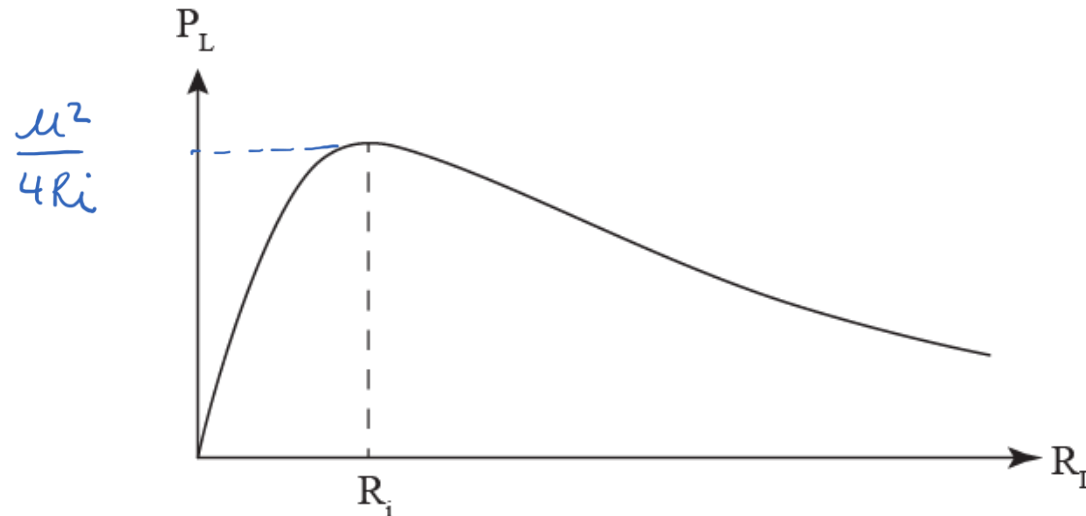
La puissance transmise à la charge est maximale lorsque celle-ci est égale à la résistance interne du circuit qui l'alimente

$$R_i = R_L$$

$$P_{L,max} = \frac{U^2}{4R_i}$$

Nous avons vu que le rendement est: $\eta = \frac{R_L}{R_i + R_L}$

En adaptation de puissance ($R_i = R_L$): $\eta = 0.5$



EPFL Adaptation d'un circuit

La puissance transmise à la charge est maximale lorsque celle-ci est égale à la résistance interne du circuit qui l'alimente

- On dit que le circuit est adapté

Remarque: dans ce cas la puissance dissipée en chaleur par la résistance interne est égale à la puissance absorbée par la charge

- Le rendement n'est donc que de 50%
- Cette situation est défavorable pour les circuits de puissance

Technique d'adaptation est utilisée pour le circuit traitant de l'information , en particulier à haute fréquence

- Puissances en jeu sont faibles
- En général la résistance du circuit de charge est de $50\ \Omega$

Théorème de Thévenin

- Dipôle N est équivalent au dipôle composé d'une source de tension U_0 (tension à vide) en série avec une résistance R_i (résistance interne)

Théorème de Norton

- Dipôle N est équivalent au dipôle composé d'une source de courant i_{cc} (courant court circuit) en parallèle avec une résistance R_i (résistance interne)

Adaptation de puissance

- Puissance transmise à une charge est maximale lorsque celle-ci est égale à la résistance interne du circuit l'alimentant