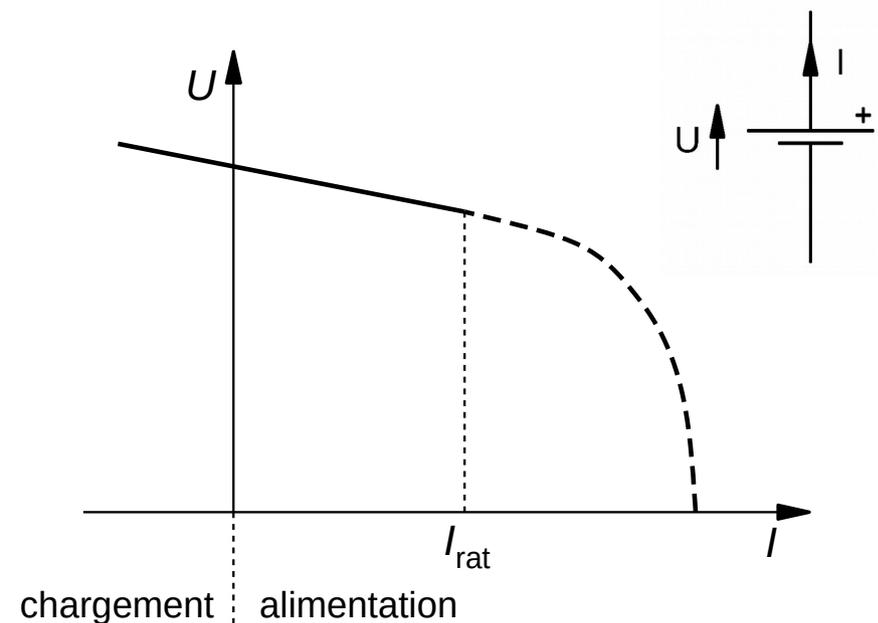


Caractéristiques des dipôles actifs

- Les caractéristiques courant-tension des dipôles actifs ne sont jamais symétriques
 - ♦ Le comportement du dipôle **dépend du sens de la tension** à ses bornes (**polarité**)
- Des vrais dipôles actifs **ne sont pas linéaires**
 - ♦ Pourtant, on essaie toujours de les représenter comme tels (au moins dans une partie choisie de la caractéristique), car ça simplifie les calculs
- Exemple : pile
 - ♦ Jusqu'au courant nominal (et même plus), la relation entre courant et tension est basiquement **linéaire**
 - ♦ Si on dépasse le **courant nominal** I_{rat} , on risque de **détruire** la pile
 - ♦ Il y a des sources à caractéristique similaire mais qui n'ont pas cette limitation, p.ex. la cellule photoélectrique



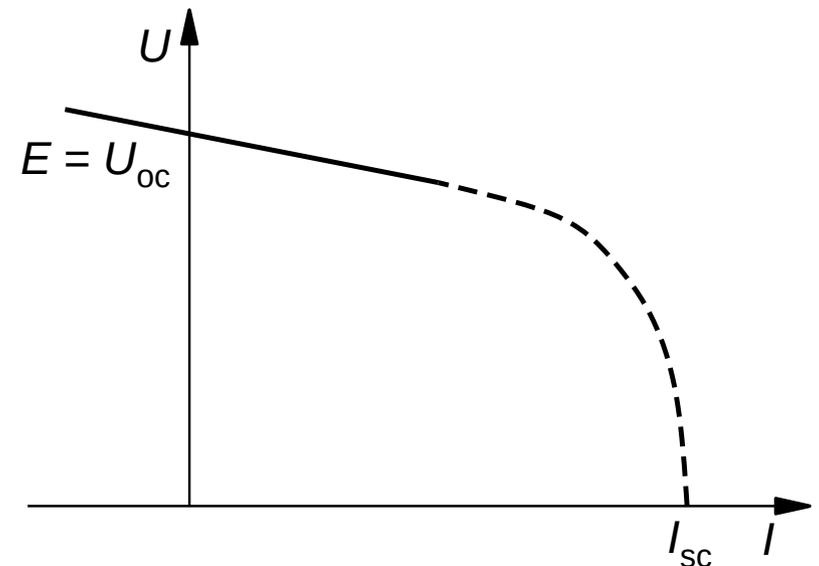
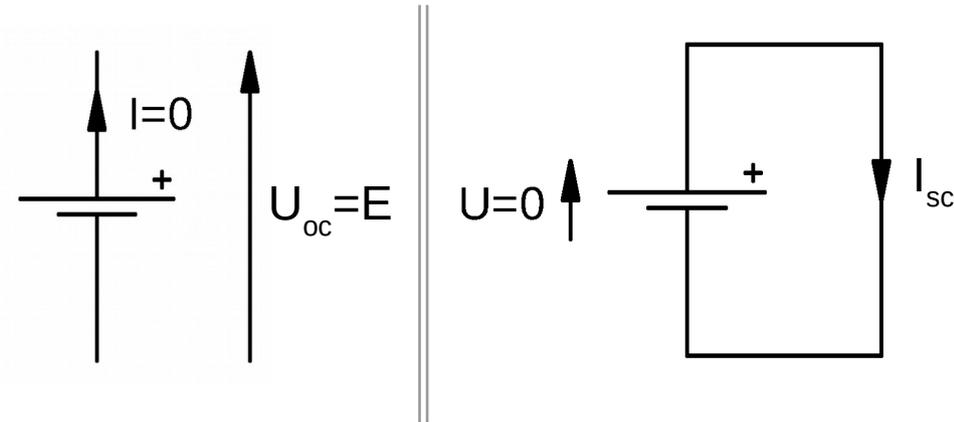
Paramètres de la caractéristique d'un dipôle actif

- U_{oc} – tension à **vide** (en circuit ouvert)

- ♦ on la mesure lorsqu'on laisse les bornes de la pile à vide (ouvertes en air), c.-à-d. on n'y connecte rien
- ♦ correspond à $I = 0$
- ♦ appelé aussi **force électromotrice**, notée E

- I_{sc} – courant **en court-circuit**

- ♦ on le mesure lorsqu'on court-circuite la pile, c.-à-d. on connecte ses deux bornes ensemble
- ♦ correspond à $U = 0$



Modèle linéaire de la pile

- Valable dans une plage limitée du courant : où la relation entre courant et tension est linéaire
- En région linéaire, on peut exprimer la tension comme

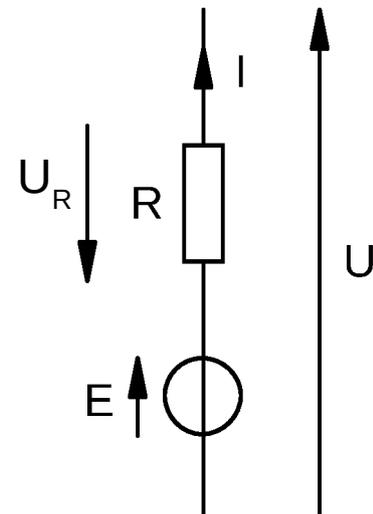
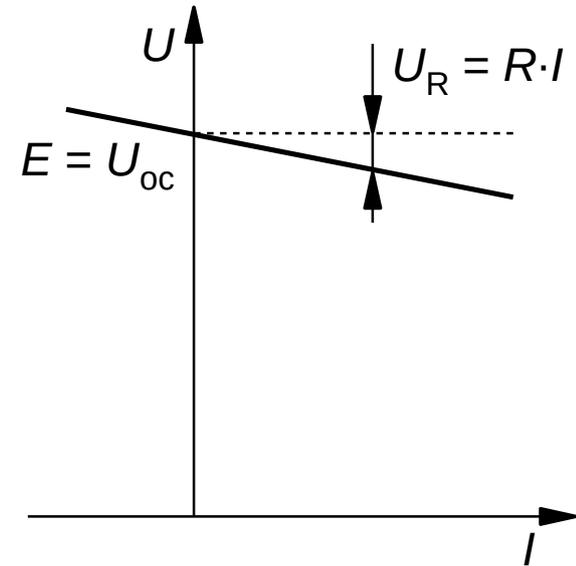
$$U = U_{oc} - k \cdot I$$

où k est un coefficient constant

- Notons que $[k] = 1 \Omega$, alors ça représente une résistance

$$U = E - R I = E - U_R$$

- ♦ Le terme RI correspond à une tension U_R développée aux bornes d'une résistance R parcourue par le courant de la pile I
- Cette formule décrit donc un **schéma électrique** →
 - ♦ À noter le sens opposé de U_R par rapport à E , ce qui reste en accord avec le sens du courant I
 - ♦ Notons qu'à vide, on va bien mesurer $U = U_{oc} = E$, car $I = 0$ donc $U_R = 0$ (selon la loi d'Ohm)



Dipôle actif linéaire

- Un **dipôle actif linéaire** possède une caractéristique :
 - ♦ linéaire pour n'importe quel courant et tension
 - ♦ mais qui – au contraire d'un dipôle passif – ne passe pas par l'origine

- L'équation de la caractéristique :

$$U = -a \cdot I + b$$

$$U_{oc} = -a \cdot 0 + b \Rightarrow b = U_{oc}$$

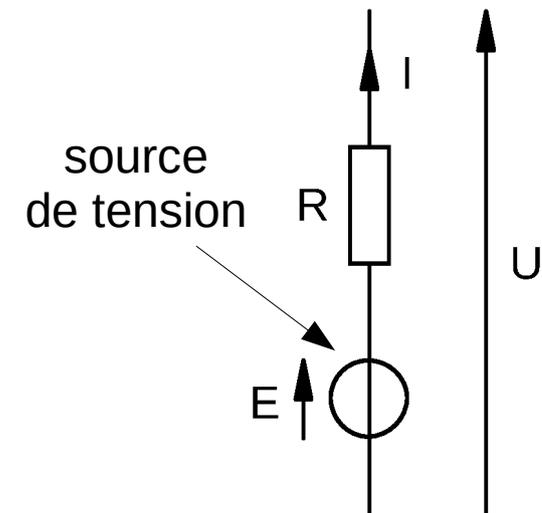
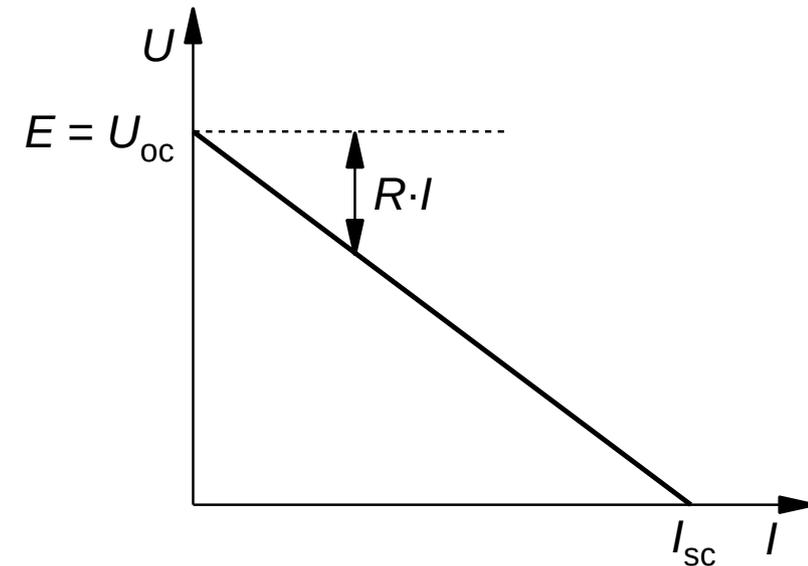
$$0 = -a \cdot I_{sc} + b \Rightarrow a = \frac{b}{I_{sc}} = \frac{U_{oc}}{I_{sc}} = R$$

finalement :

$$U = E - RI$$

$$\text{avec } E = U_{oc} \text{ et } R = \frac{U_{oc}}{I_{sc}}$$

- où R est appelée **résistance interne**



Représentation alternative d'un dipôle actif linéaire

- L'équation peut être réarrangée

$$U = E - R I \quad E = U_{oc} \quad R = \frac{U_{oc}}{I_{sc}}$$

$$U = U_{oc} - \frac{U_{oc}}{I_{sc}} I$$

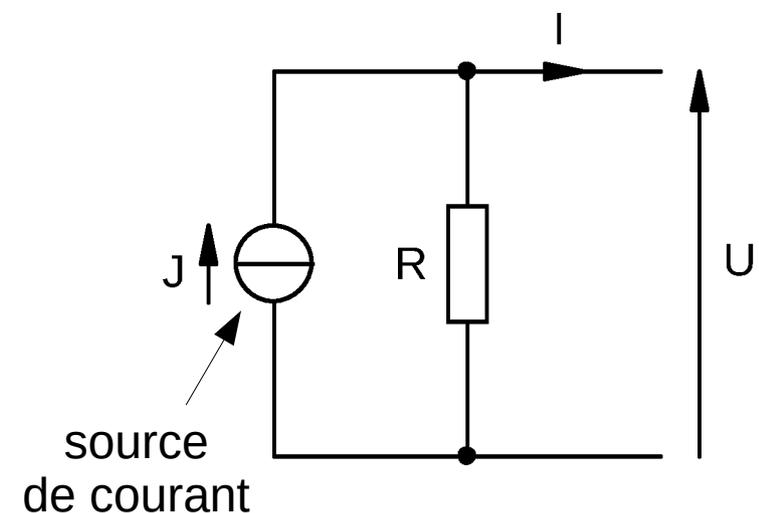
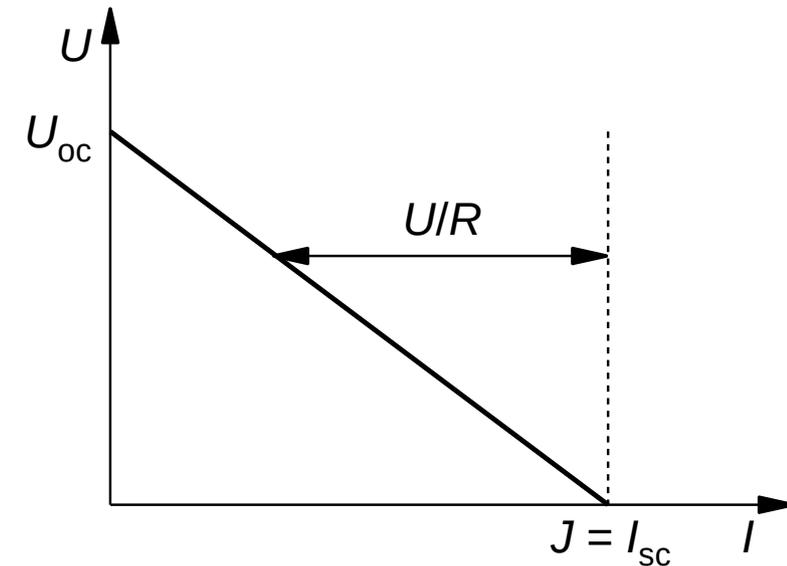
$$\frac{U_{oc}}{I_{sc}} I = U_{oc} - U$$

$$I = I_{sc} - \frac{I_{sc}}{U_{oc}} U$$

et finalement :

$$I = J - \frac{U}{R} \quad \text{avec } J = I_{sc} \quad \text{et } R = \frac{U_{oc}}{I_{sc}}$$

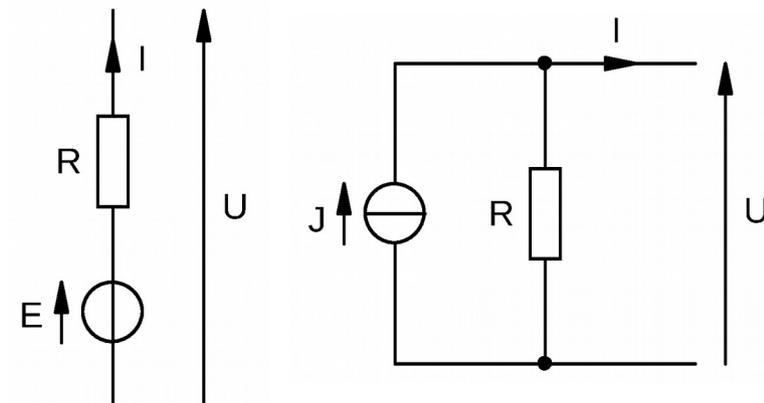
- Cette nouvelle forme aussi décrit un **schéma électrique équivalent** →
- Notons que la résistance interne est restée la même



Théorèmes de Thévenin et de Norton

- **Théorème de Thévenin :**
Tout **dipôle actif linéaire** peut être modélisé par une **source de tension parfaite avec une résistance en série**
- **Théorème de Norton :**
Tout dipôle actif linéaire peut être modélisé par une **source de courant parfaite avec une résistance en parallèle**
- Les schémas électriques qui en résultent sont appelés **modèle équivalent de Thévenin** et **modèle équivalent de Norton**
- Les deux modèles sont **équivalents** l'un à l'autre

$$U = E - RI \quad I = J - \frac{U}{R}$$
$$E = U + RI = U + R \left(J - \frac{U}{R} \right) = U + RJ - U = RJ$$
$$E = RJ \quad \text{ou} \quad J = \frac{E}{R}$$



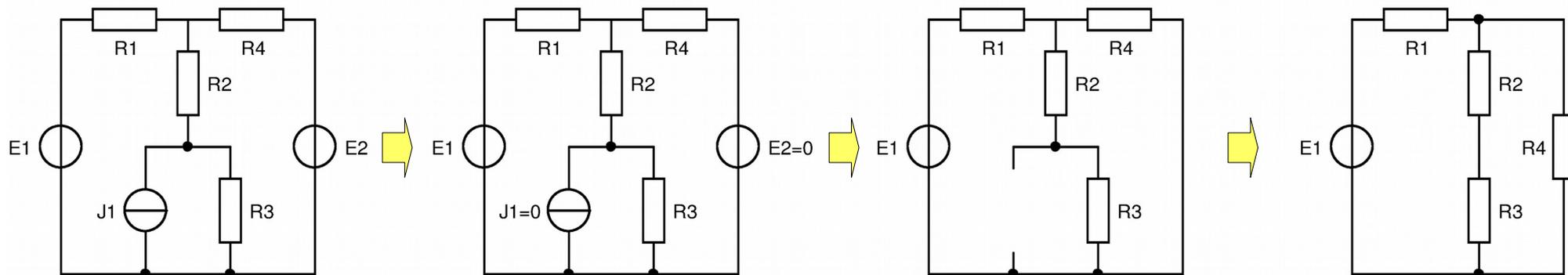
Exercice

- 3.3.1. En mesurant la tension aux bornes d'un accumulateur, on a obtenu 1,25 V lors de la décharge avec un courant de 300 mA et 1,18 V avec un courant de 1,5 A.
 - a) Déterminer les modèles équivalents de Thévenin et de Norton de cet accumulateur.
 - b) Calculer la tension avec laquelle cet accumulateur pourra alimenter un circuit consommant un courant de 2,4 A.
 - c) Calculer le courant et la tension aux bornes d'une charge résistive de 2,1 Ω si elle est alimentée par cet accumulateur.



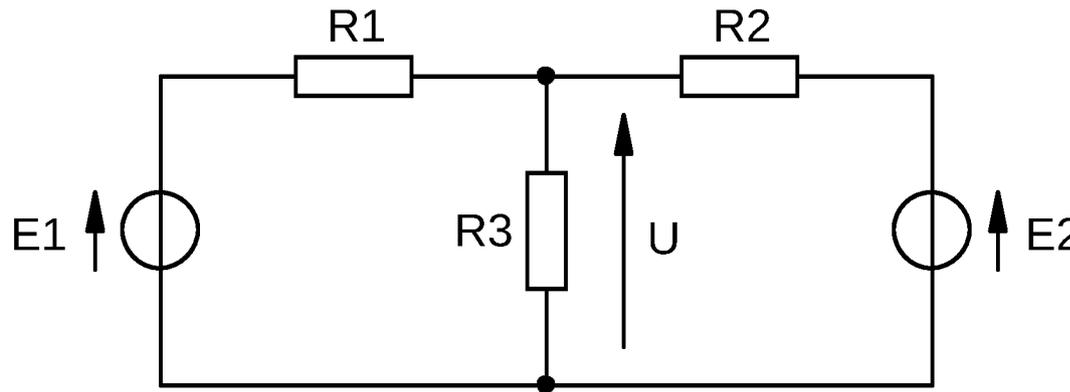
Principe de superposition

- La réponse dans une branche d'un circuit composé exclusivement d'éléments linéaires est égale à la **somme des réponses** aux excitations par chaque source considérée séparément
 - ♦ « Réponse » = courant ou tension entre les extrémités de la branche
- Considérer une source séparément, c'est éliminer toutes les autres
 - ♦ Éliminer une **source de tension**, c'est la remplacer avec un **court-circuit**
 - ▶ Ainsi, elle n'apportera au circuit aucune tension
 - ♦ Éliminer une **source de courant**, c'est la remplacer avec un **circuit ouvert**
 - ▶ Ainsi, elle n'apportera au circuit aucun courant
 - ♦ Exemple : considérer seule la source E1



Exercices

- 3.4.1. Dans le circuit ci-dessous, déterminer la tension U étant donné que : $E_1 = 5 \text{ V}$, $E_2 = 1,25 \text{ V}$, $R_1 = 3,3 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 1,2 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 5 \text{ k}\Omega$.



- 3.4.2. Il est donné un accumulateur caractérisé d'une tension à vide de $3,6 \text{ V}$ et d'une résistance interne de $135 \text{ m}\Omega$. Il alimente en parallèle un capteur du caractère résistif possédant une résistance de $10 \text{ }\Omega$ ainsi qu'un circuit intégré consommant un courant constant de 250 mA . Déterminer la tension d'alimentation du circuit intégré ainsi que le courant délivré par l'accumulateur.

Solution graphique de circuits à composants non linéaires

- Loi des mailles + loi d'Ohm :

$$U_s = U_R + U_D = IR_L + U_D$$

$$U_D = U_s - IR_L$$

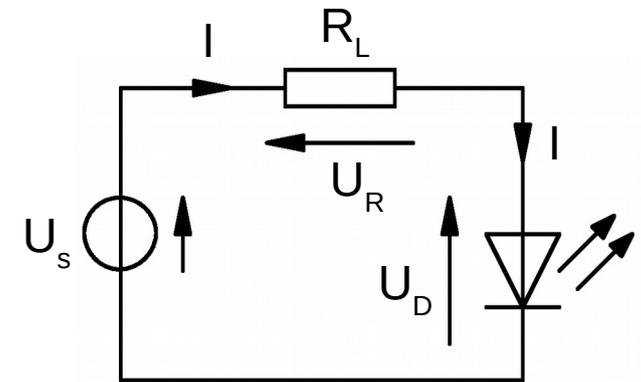
- À droite, on reconnaît l'équation d'une ligne droite appelée **droite de charge**

$$f_L(I) = U_s - IR_L$$

- À gauche, la tension de la diode, c'est aussi une fonction du même courant I

$$f_D(I) = U_D$$

- Selon la loi des mailles, la valeur du courant I sera telle que les valeurs des deux fonctions f_L et f_D soient égales
- On peut déterminer cette valeur en **traçant les deux fonctions** et en trouvant les coordonnées de leur **point d'intersection**



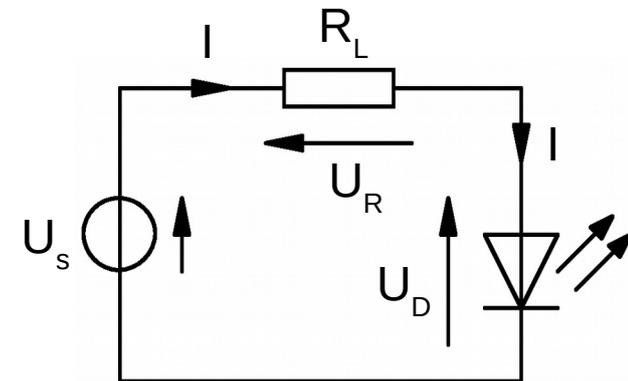
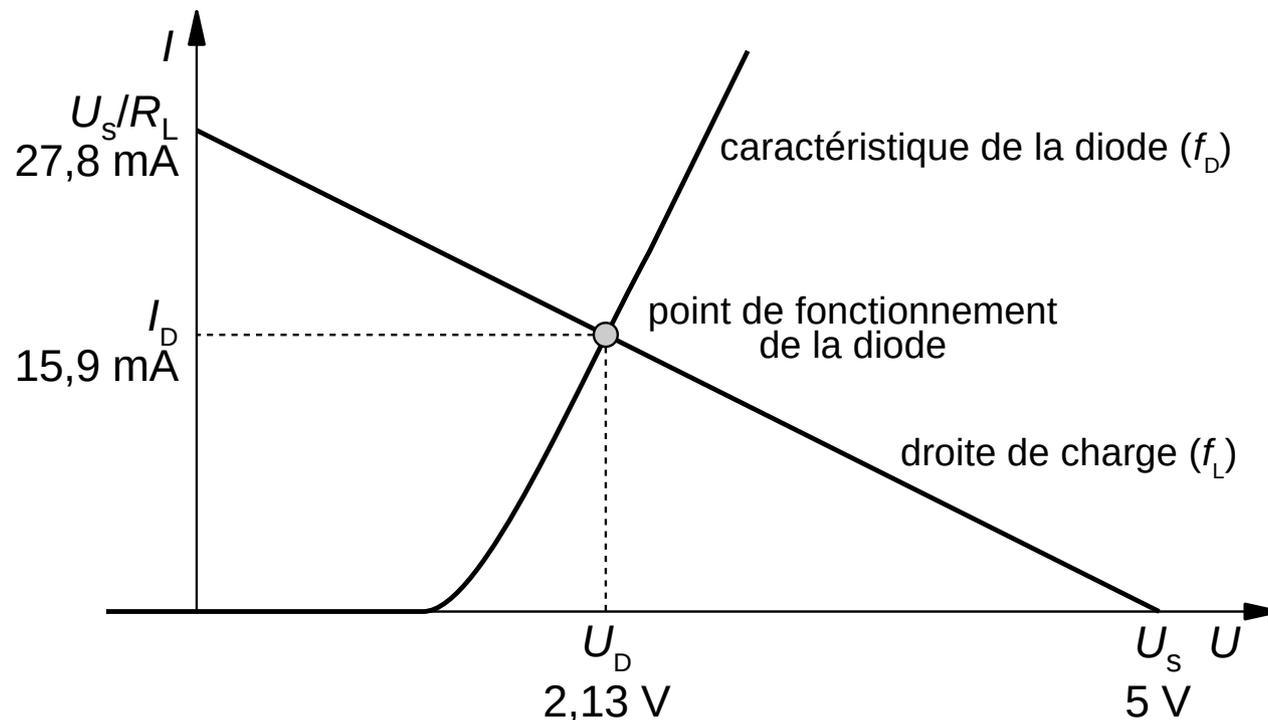
Solution graphique de circuits à composants non linéaire – exemple

- Pour tracer f_L , il est le mieux de déterminer ses points d'intersection avec les axes U et I

$$U_0 = f_L(0) = U_s - 0 \cdot R_L = U_s$$

$$0 = U_s - I_0 R_L \Rightarrow I_0 = \frac{U_s}{R_L}$$

- Pour $U_s = 5 \text{ V}$ et $R_L = 180 \Omega$:



Linéarisation d'un dipôle non linéaire

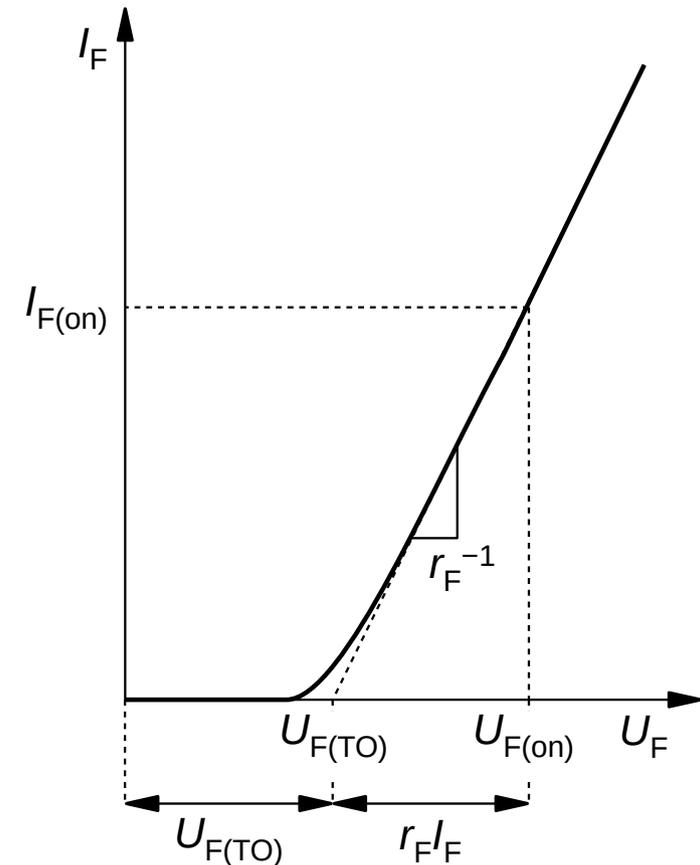
- Dans une plage donnée **à proximité de son point de fonctionnement**, tout dipôle non linéaire **peut être considéré linéaire**
 - ♦ L'étendue de cette plage sera très différente selon le cas : type du composant, ses paramètres et son point de fonctionnement actuel

- Diode en état passant

- ♦ Sa caractéristique est proche d'une droite dans une plage assez large du courant (par rapport à son courant nominal)
- ♦ L'équation de cette droite est

$$U_F = U_{F(TO)} + r_F I_F$$

- ♦ $U_{F(TO)}$ (ou V_T) : **tension de seuil**
 - ▶ Le modèle linéaire devient **moins précis** à l'approche de $U_{F(TO)}$ et complètement **incorrect** pour $U_F < U_{F(TO)}$
- ♦ r_F (ou R_s) : **résistance différentielle**
 - ▶ Elle représente $\Delta U / \Delta I$ et non U / I



Solution d'un circuit par linéarisation

- Paramètres de l'approximation linéaire :

$$r_F = \frac{\Delta U_F}{\Delta I_F} = \frac{U_2 - U_1}{I_2 - I_1} = 45,3 \Omega$$

$$U_1 = U_{F(To)} + r_F I_1 \Rightarrow U_{F(To)} = U_1 - r_F I_1 = 1,41 \text{ V}$$

- Loi des mailles :

$$U_s = U_R + U_D = I R_L + U_{F(To)} + r_F I$$

$$I = \frac{U_s - U_{F(To)}}{R_L + r_F} = 15,9 \text{ mA}$$

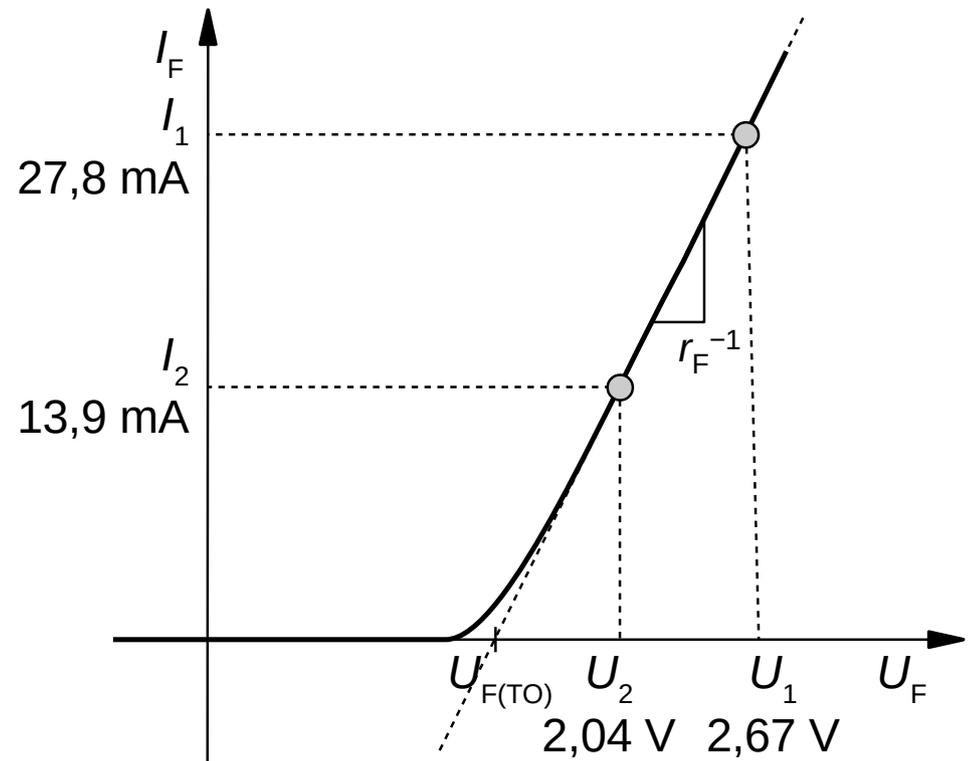
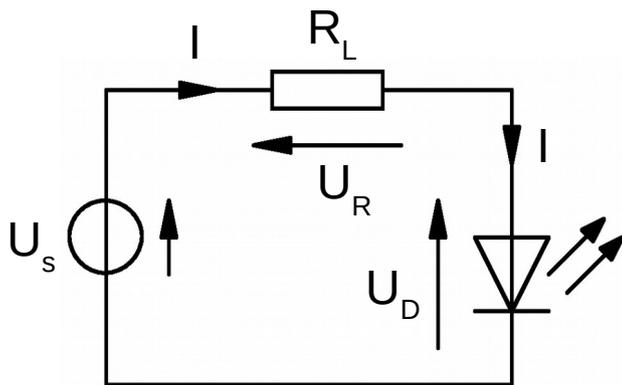
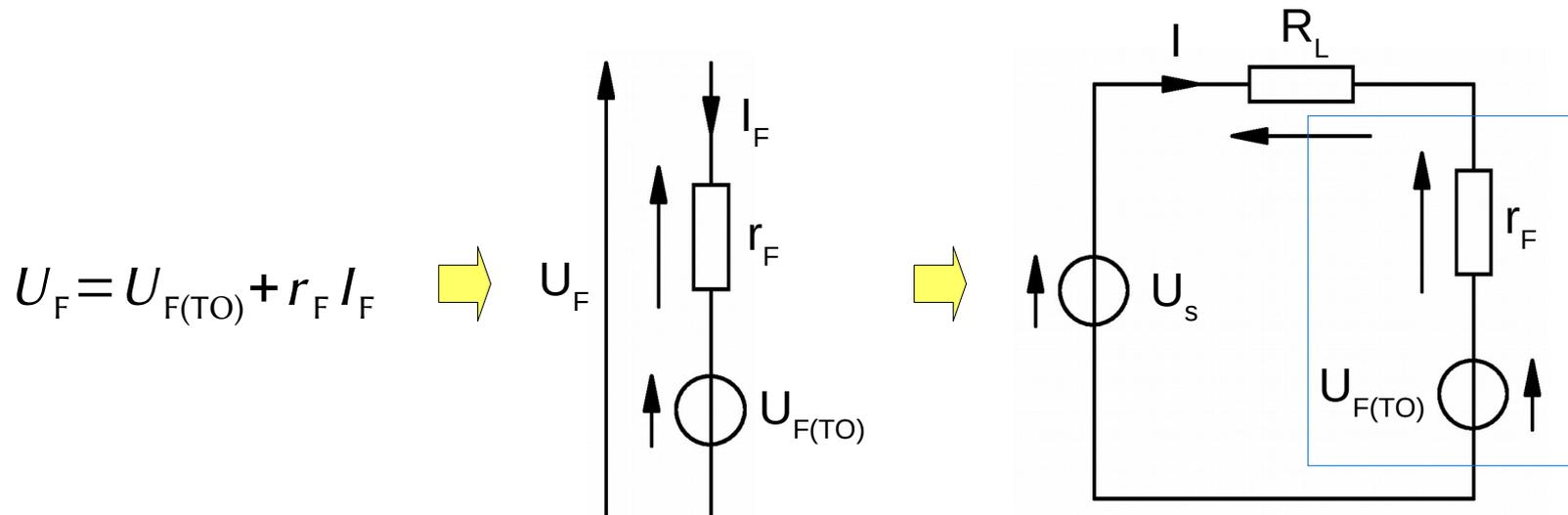


Schéma équivalent du modèle linéaire

- L'équation linéaire correspond également à un **schéma équivalent**
- On peut l'insérer dans le schéma en place de la diode



- Cela mène à la même équation de la loi des mailles :

$$U_s - I R_L - I r_F - U_{F(TO)} = 0$$

$$I = \frac{U_s - U_{F(TO)}}{R_L + r_F} = 15,9 \text{ mA}$$

- C'est le principe de fonctionnement des **logiciels simulateurs**

Limitations du modèle linéaire

- Supposons que U_s devient 1 V. Le modèle linéaire donne :

$$I = \frac{1 \text{ V} - 1,41 \text{ V}}{180 \Omega + 45,3 \Omega} = -1,82 \text{ mA}$$

- Pourtant la vraie solution est obtenue par l'analyse graphique
- Pourquoi cette différence ?

- ♦ Avec $U_s = 1 \text{ V}$, la diode ne se trouve pas en état passant, alors que le modèle ne décrit que ce mode

- ♦ Un logiciel simulateur doit disposer d'un modèle complet (tous les modes de fonctionnement) d'un composant. Ainsi, il est capable de déterminer le point de fonctionnement et un modèle linéaire valable à proximité de ce point.

