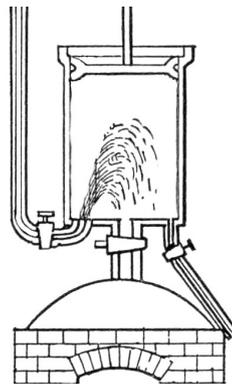


Cours 5

Liquides et vapeurs



Who you are and what you would are out of my welkin,
I might say 'element', but the word is over-worn.
FESTE, the clown, to Viola – *Twelfth Night, III i*

~ nota bene ~

- Ces diapositives servent de support en classe ; elles n'ont pas vocation de remplacer un polycopié (ou un bon livre!)
- Certaines diapositives paraîtront inévitablement ambiguës ; attention à ne pas les interpréter sans l'aide des documents de cours.

Vos retours d'opinion sont les bienvenus :

olivier.cleynen@ariadacapo.net

Ces documents de cours sont téléchargeables
à l'adresse

<http://thermo.ariadacapo.net/>

Ce document est publié
sous licence Creative Commons.



Certains documents sont le fruit du travail des auteurs indiqués
au bas des diapositives, et publiés sous licence compatible.

Le reste est ©2009-2014 CC by-sa Olivier Cleynen

Vous êtes invité/es à copier, modifier, et ré-utiliser ce

document sous quelques conditions simples :

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.fr>

5.0 Introduction :

à quoi ce cours va-t-il servir ?

~ le cours qui fait des bulles ~

liquide-vapeur

is the new

gaz parfait

Objectif :

quantifier *l'énergie* et ses transferts
dans (l'eau et) les gaz réels

HOH HOH HOH

5.1 Ébullition et liquéfaction

5.1.1 Qu'est-ce qu'un liquide ?



Un liquide est juste un fluide

(dense, presque incompressible,
sujet à la tension de surface)

ce sont les mêmes molécules, se déplaçant
différemment.

5.1.2 Changements de phase

Gazeux

Liquide

Solide

bof

La « phase »

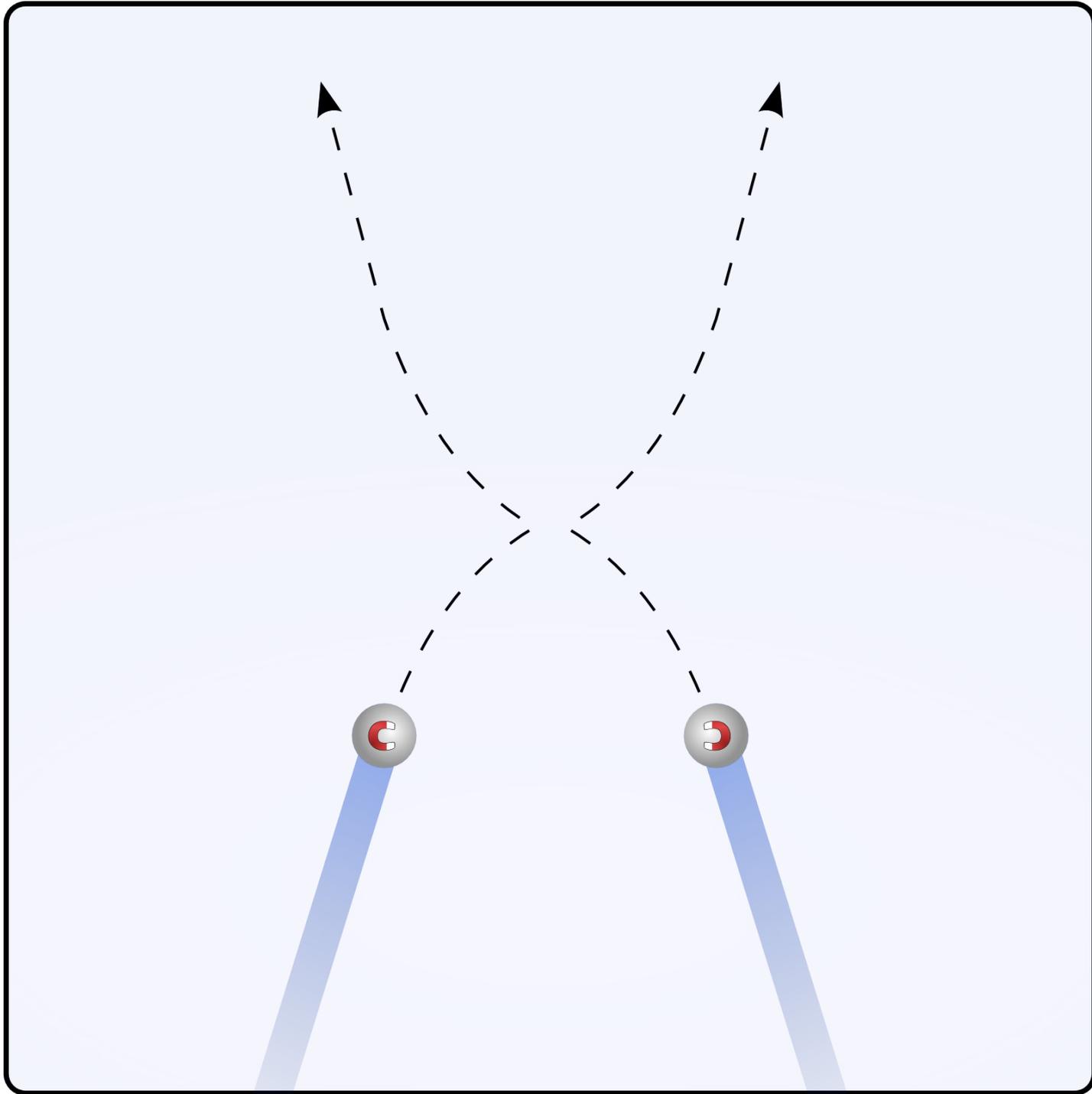
- Changement brutal d'une propriété :
« changement de phase »
- Traditionnellement : liquide, gazeuse, solide
- Mais leurs frontières ne sont pas toujours bien nettes !
ex : eau liquide pressurisée à 300 bars → chauffée à 600°C →
détendue à 1 bar... pas d'ébullition.

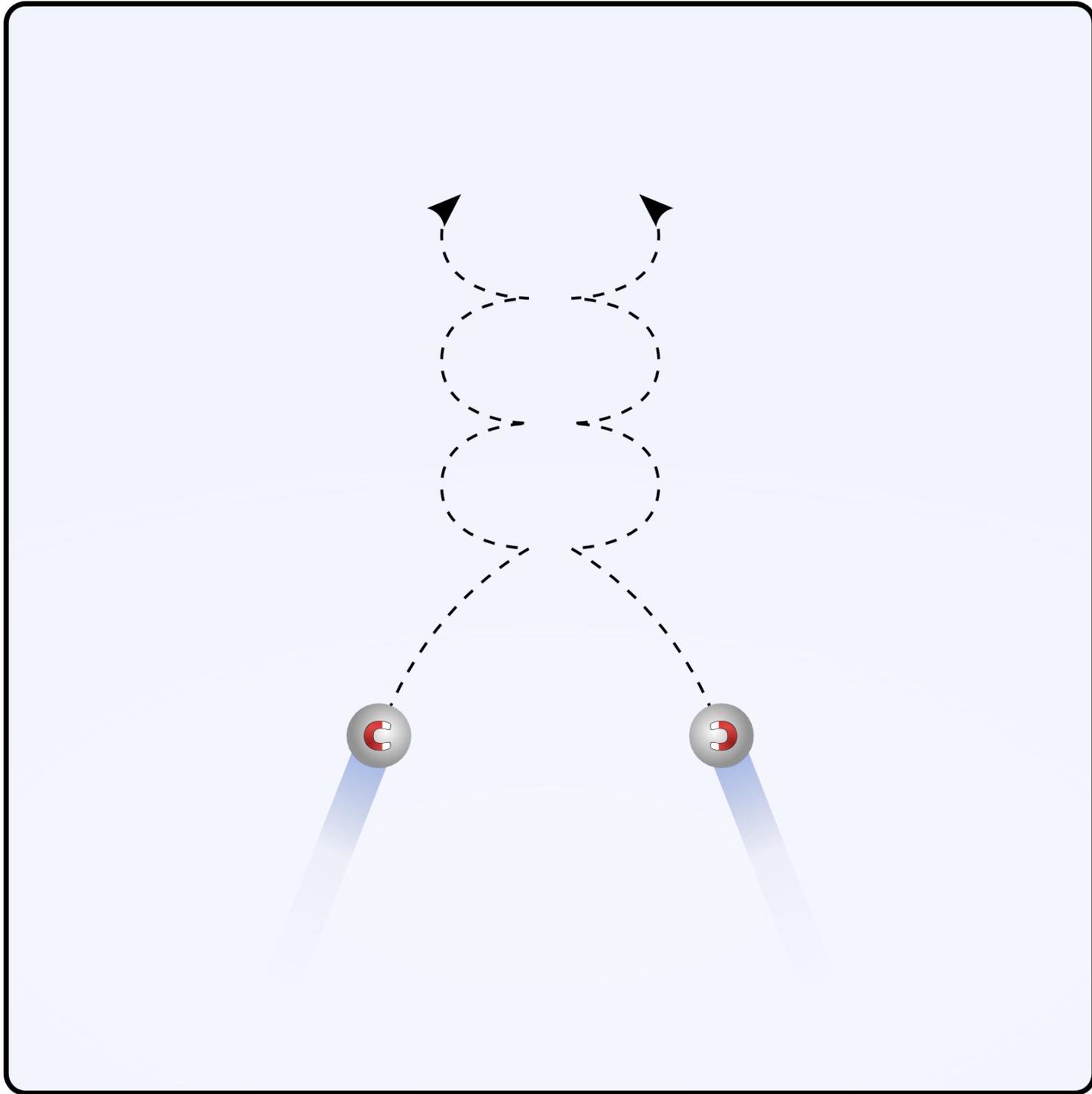
Dans ce cours :

Liquides

Vapeurs

5.1.3 Comment se représenter l'ébullition et la liquéfaction ?





5.1.4 Pourquoi utiliser de l'eau ?

~ oui pourquoi d'abord ? ~

Utiliser un liquide/vapeur pour :

- Capturer de la chaleur (sous forme liquide)
puis effectuer un travail (sous forme gazeuse)
→ Centrales électriques
- Permettre une chute de température sans travail
→ Réfrigérateurs
- Obtenir de grands débits avec des températures modérées (historiquement)



5.2 Description qualitative des propriétés de l'eau

5.2.1 Les limites du gaz parfait

Tous les gaz se liquéfient !

Tous les liquides s'évaporent !

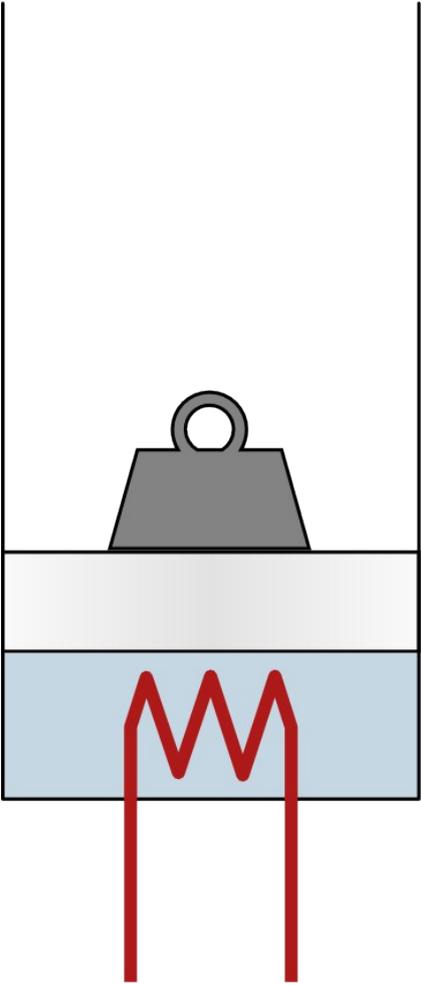
Seuils : pression et température *critiques*

Quelques températures et pressions critiques

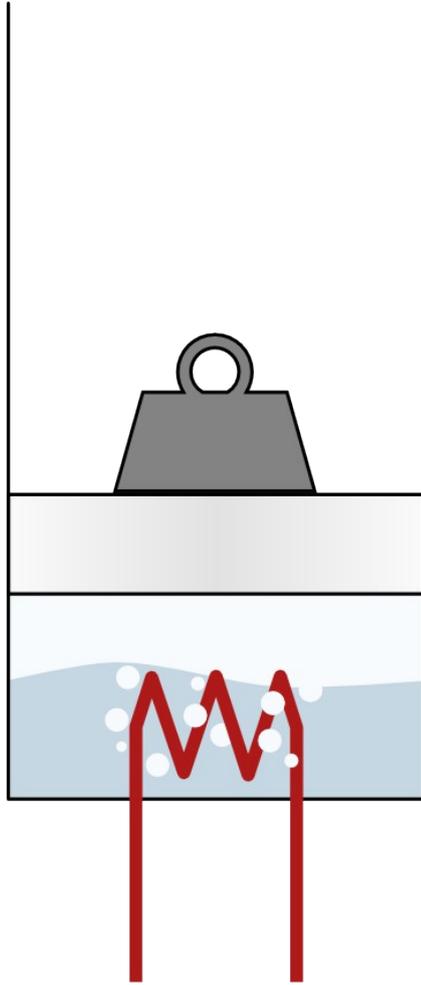
		T_{cr} (K)	p_{cr} (MPa)
Air	–	132	3,8
Chlore	Cl_2	417	7,71
Dioxyde de carbone	CO_2	304,2	7,39
Eau	H_2O	647,1	22,06
Hélium	He	5,3	0,23
Oxygène	O_2	154,8	5,08
R-134a	CF_3CH_2F	374,2	4,059
Xénon	Xe	289,8	5,88

5.2.2

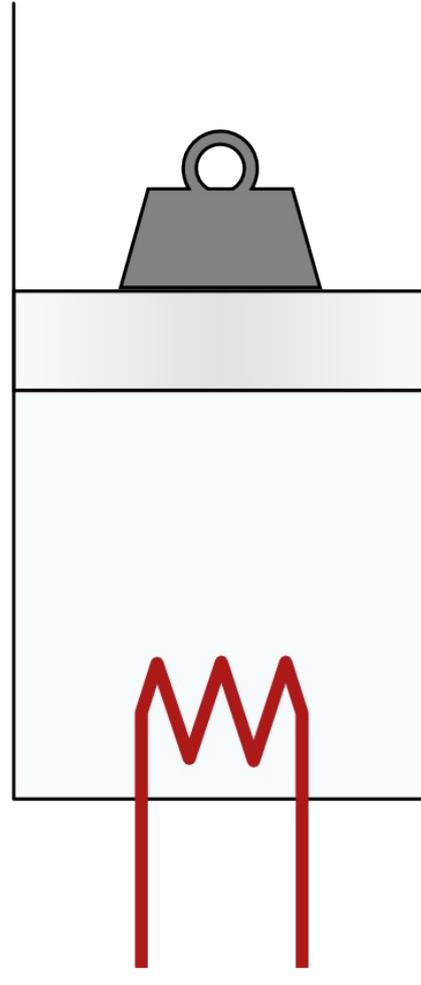
Le diagramme température-volume (T - v)



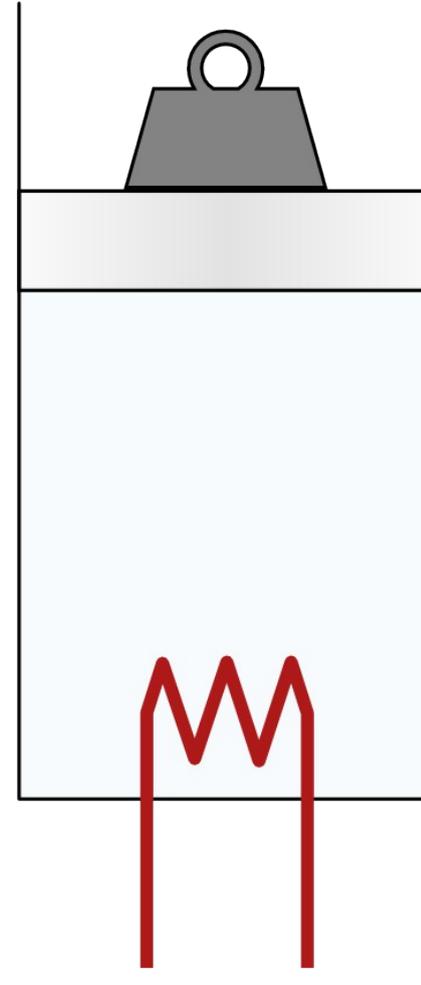
A



B



C

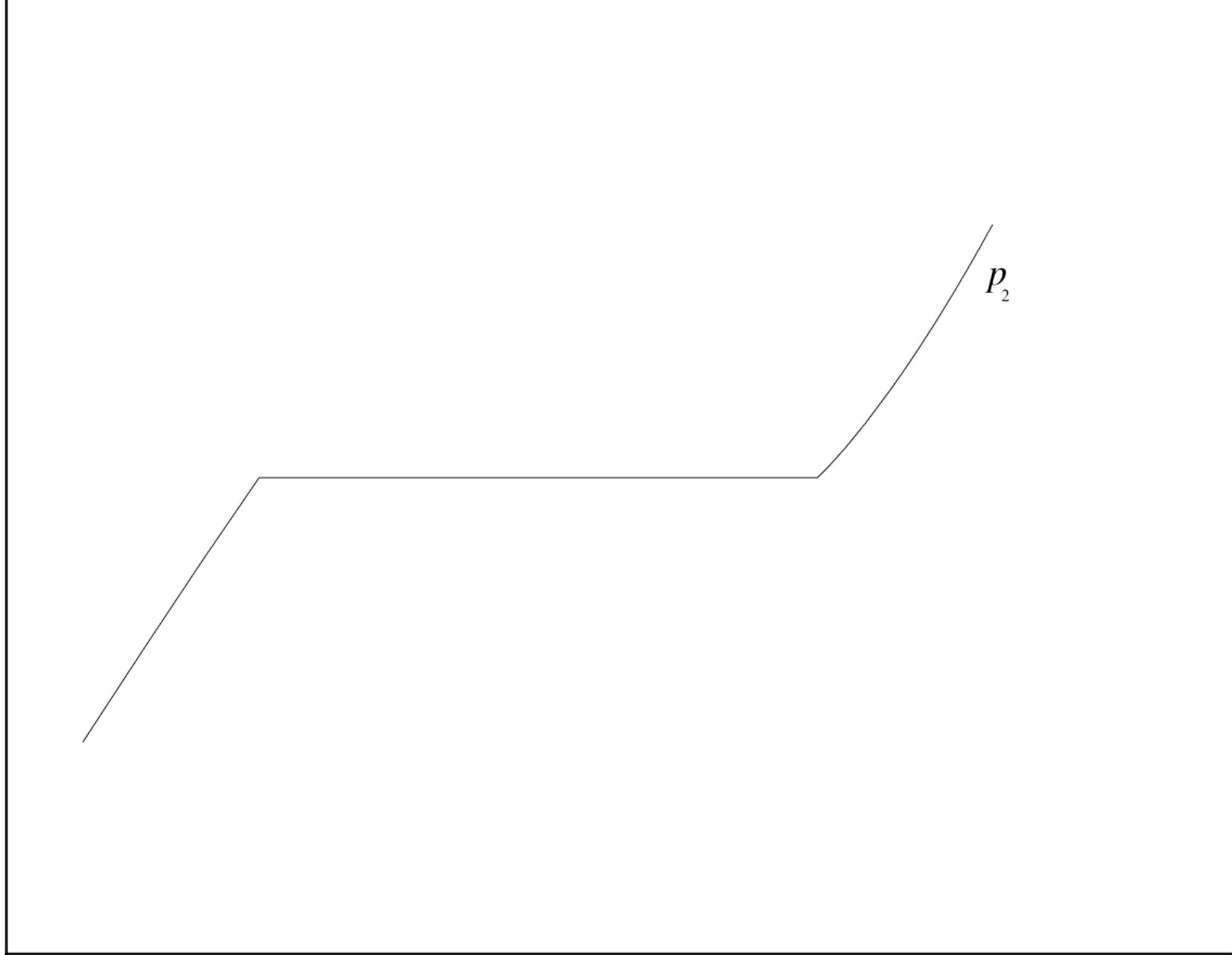


D

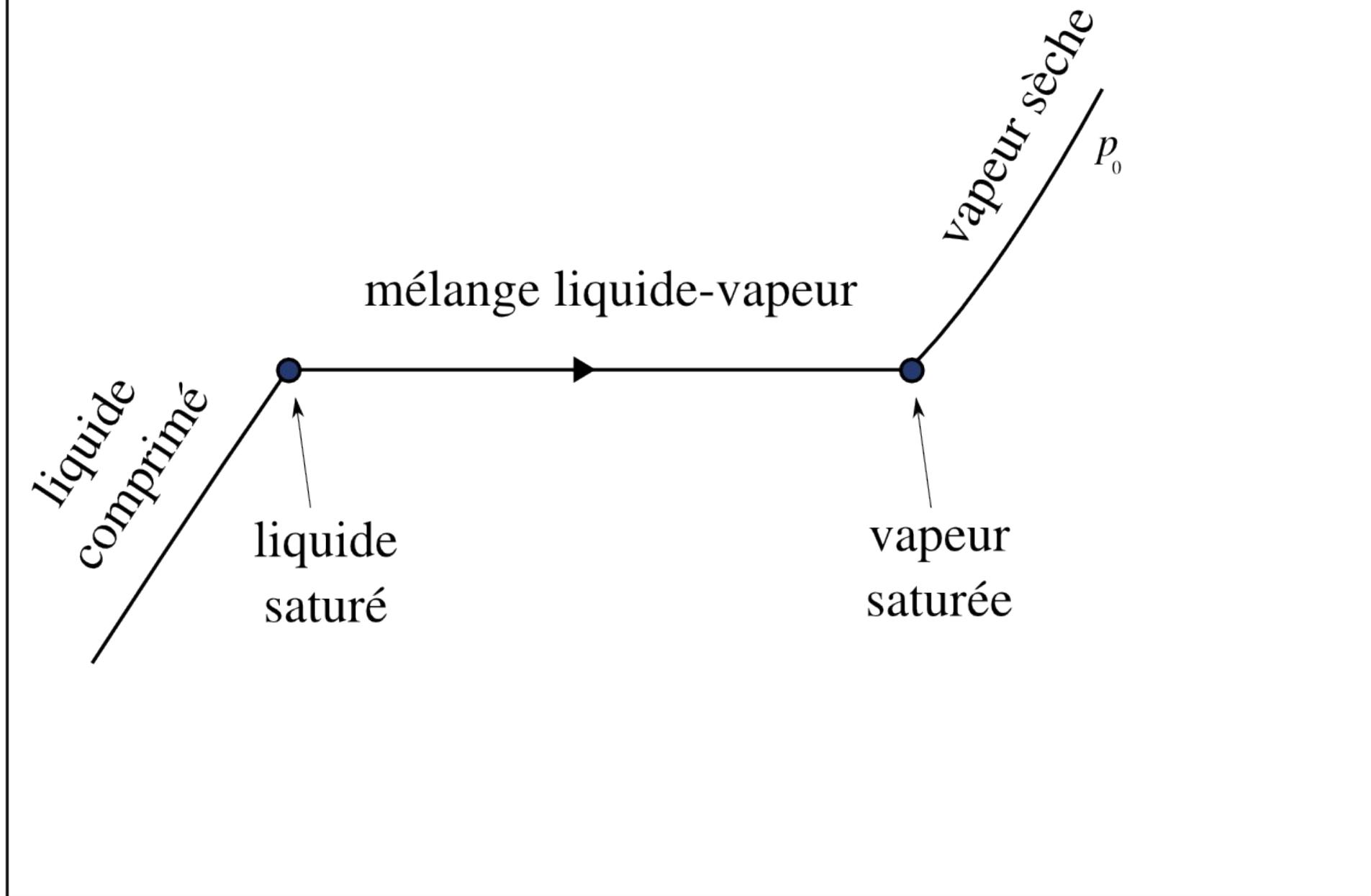
T



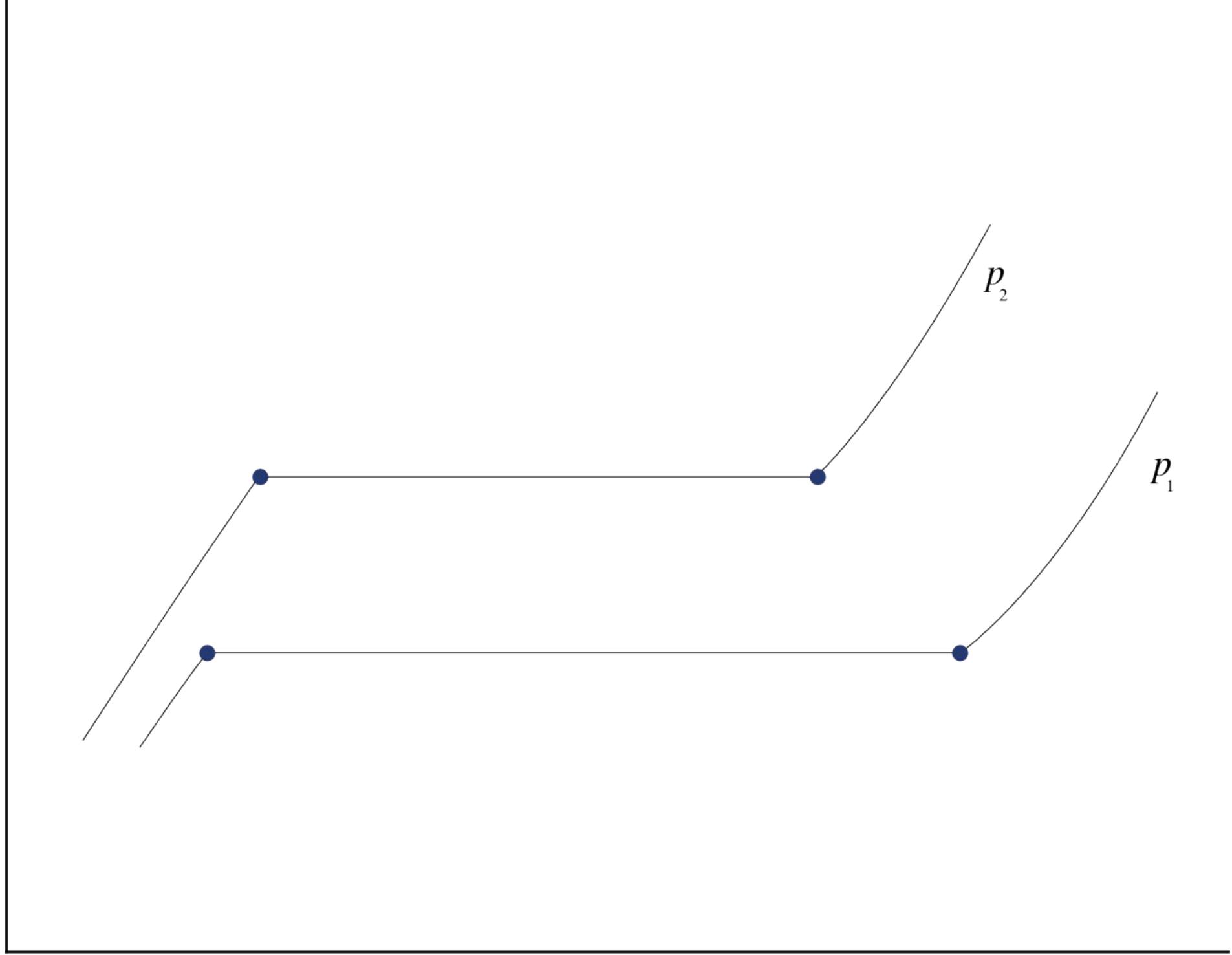
$v (\log)$

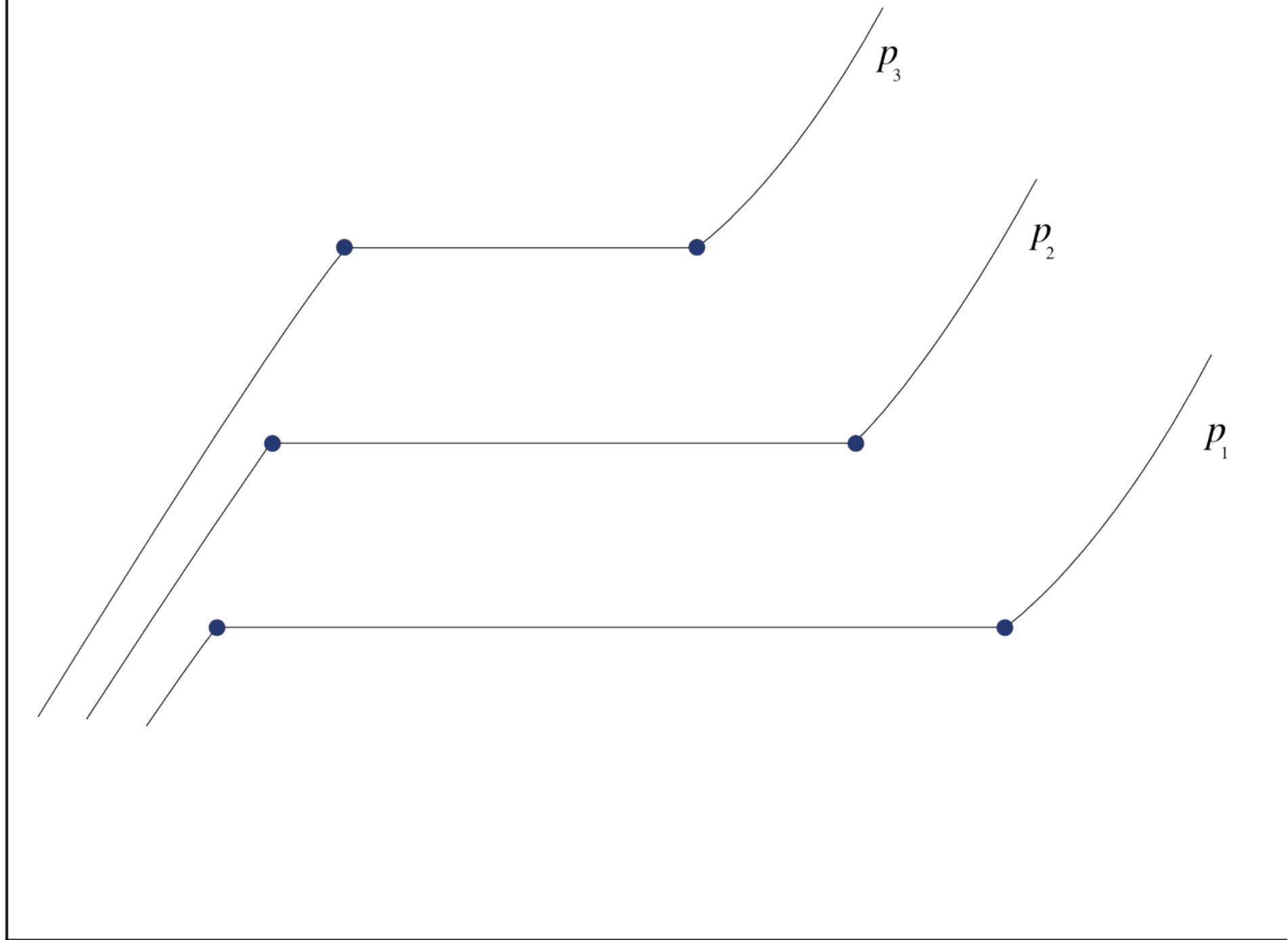
T  p_2 v (\log)

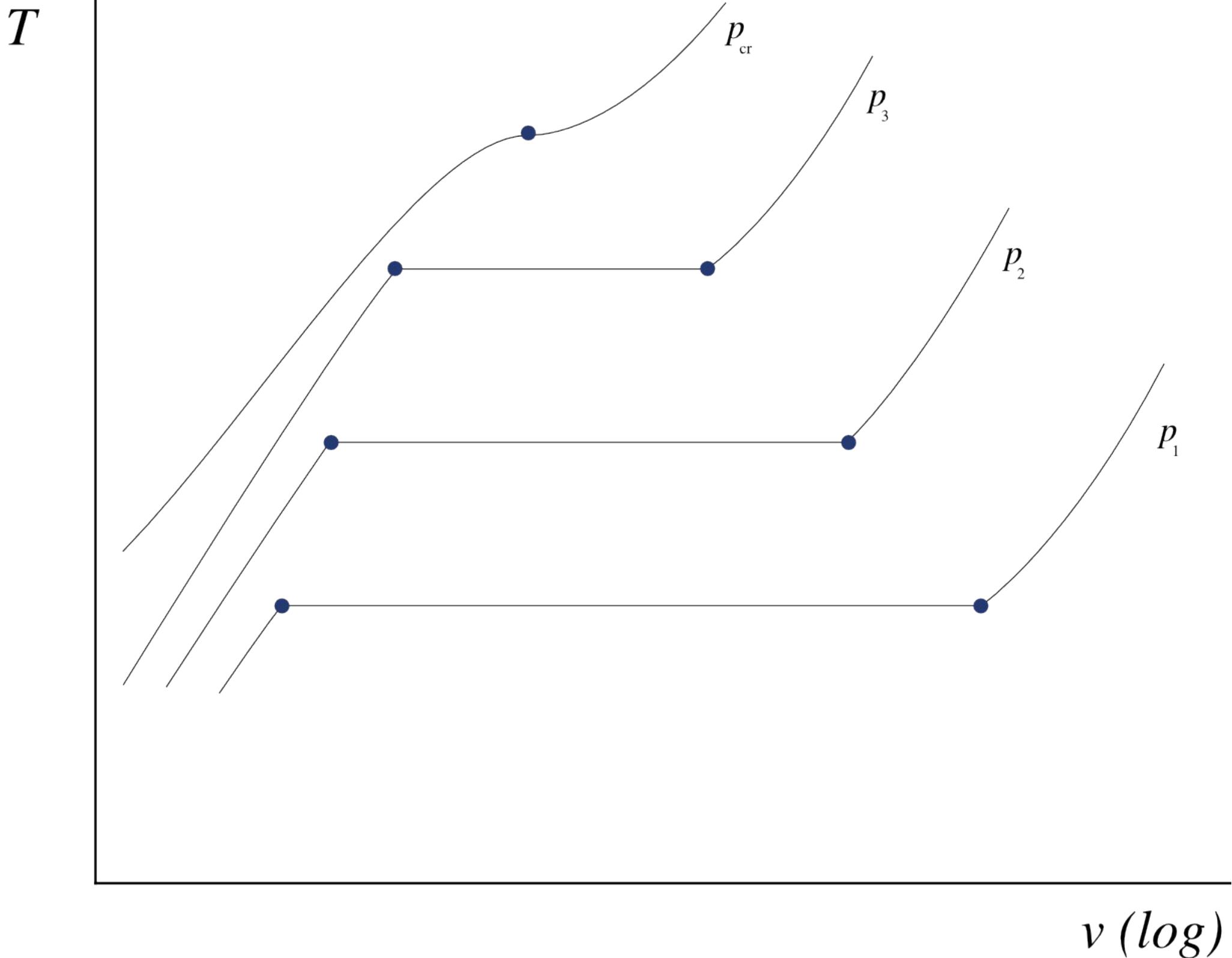
T

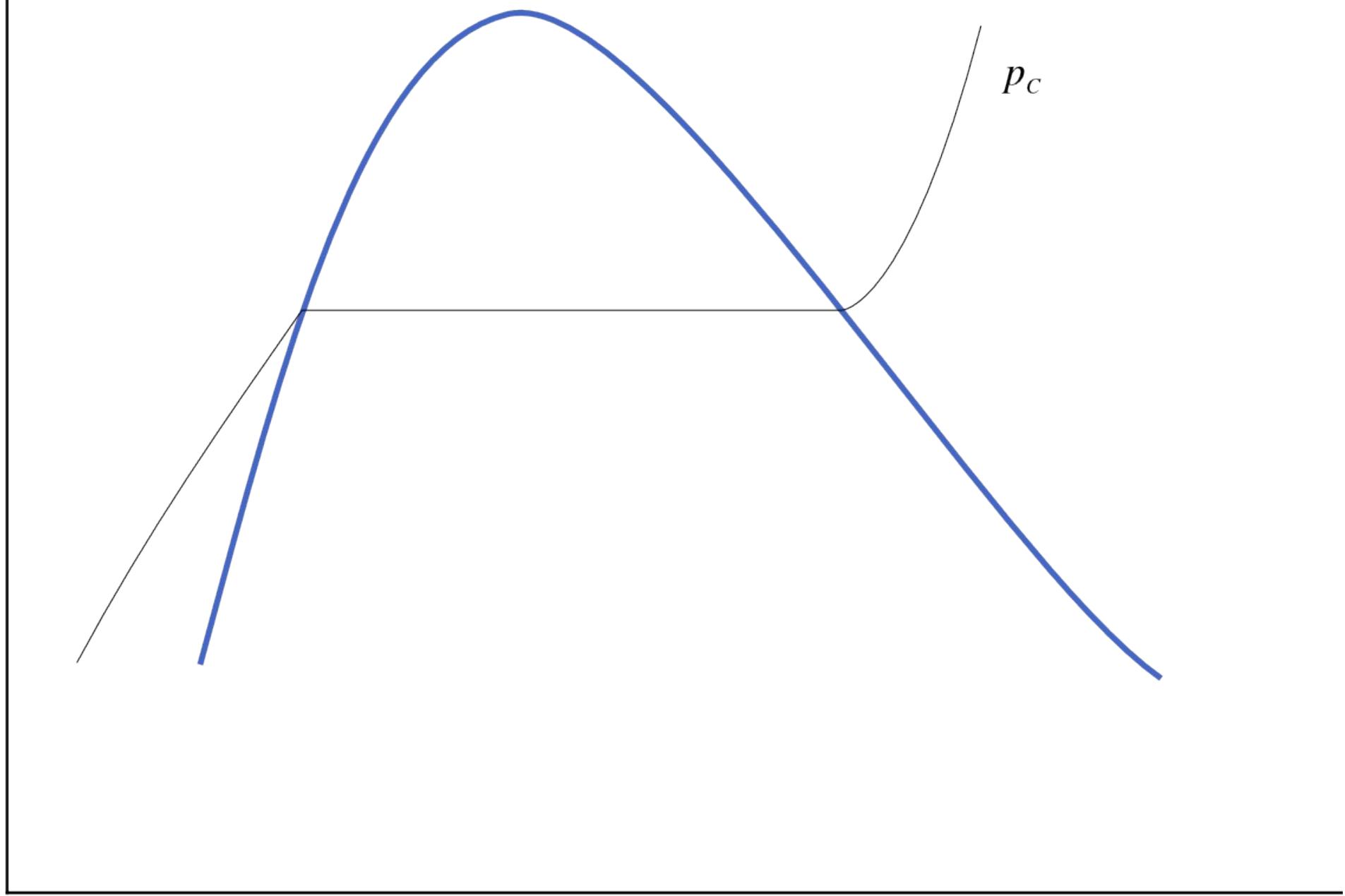


v (log)

T  p_2 p_1 $v (\log)$

T  $v (\log)$



T  p_c v (\log)

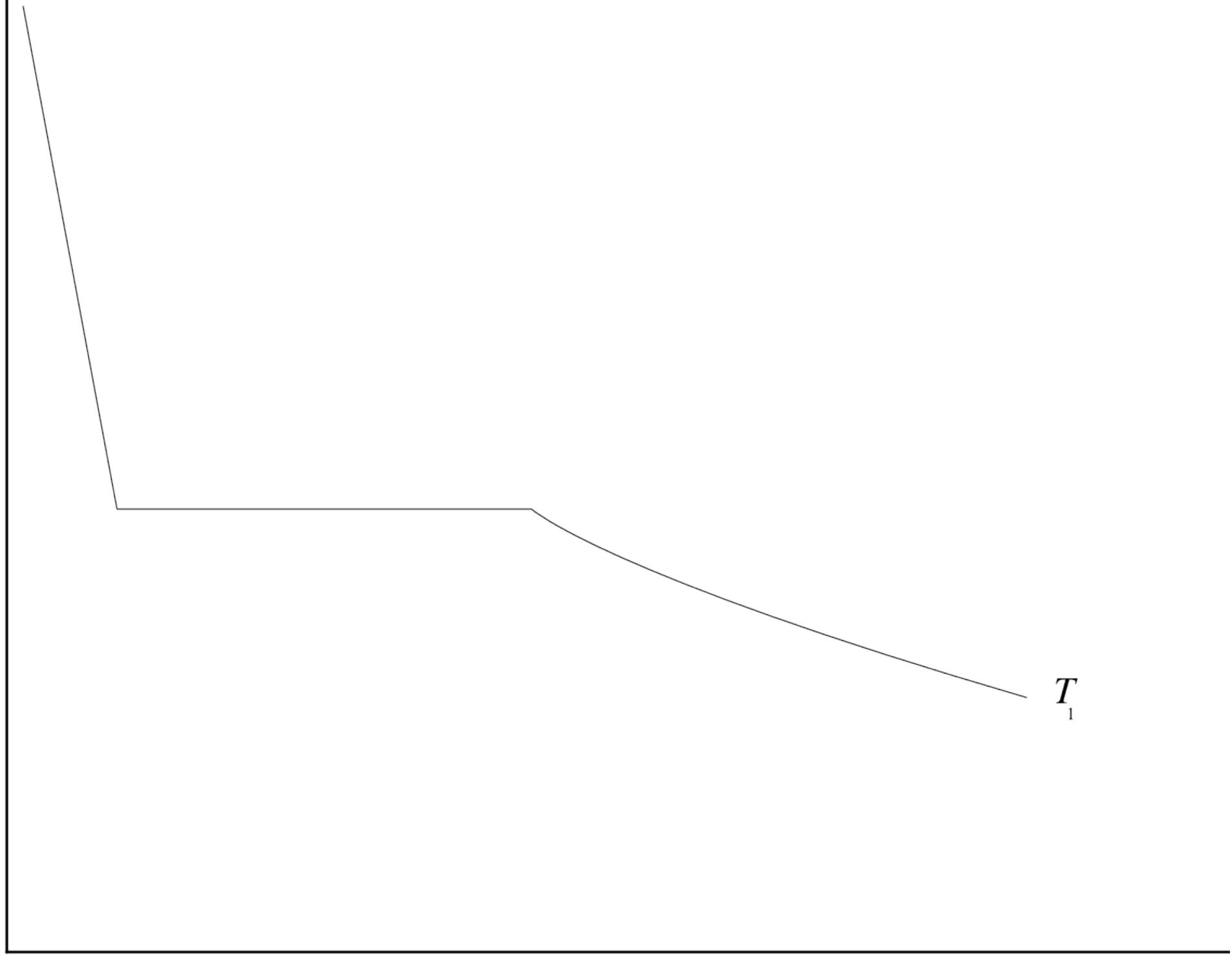
5.2.3 Le diagramme pression-volume ($p-v$)

~ back to basics ~

p

$v (\log)$

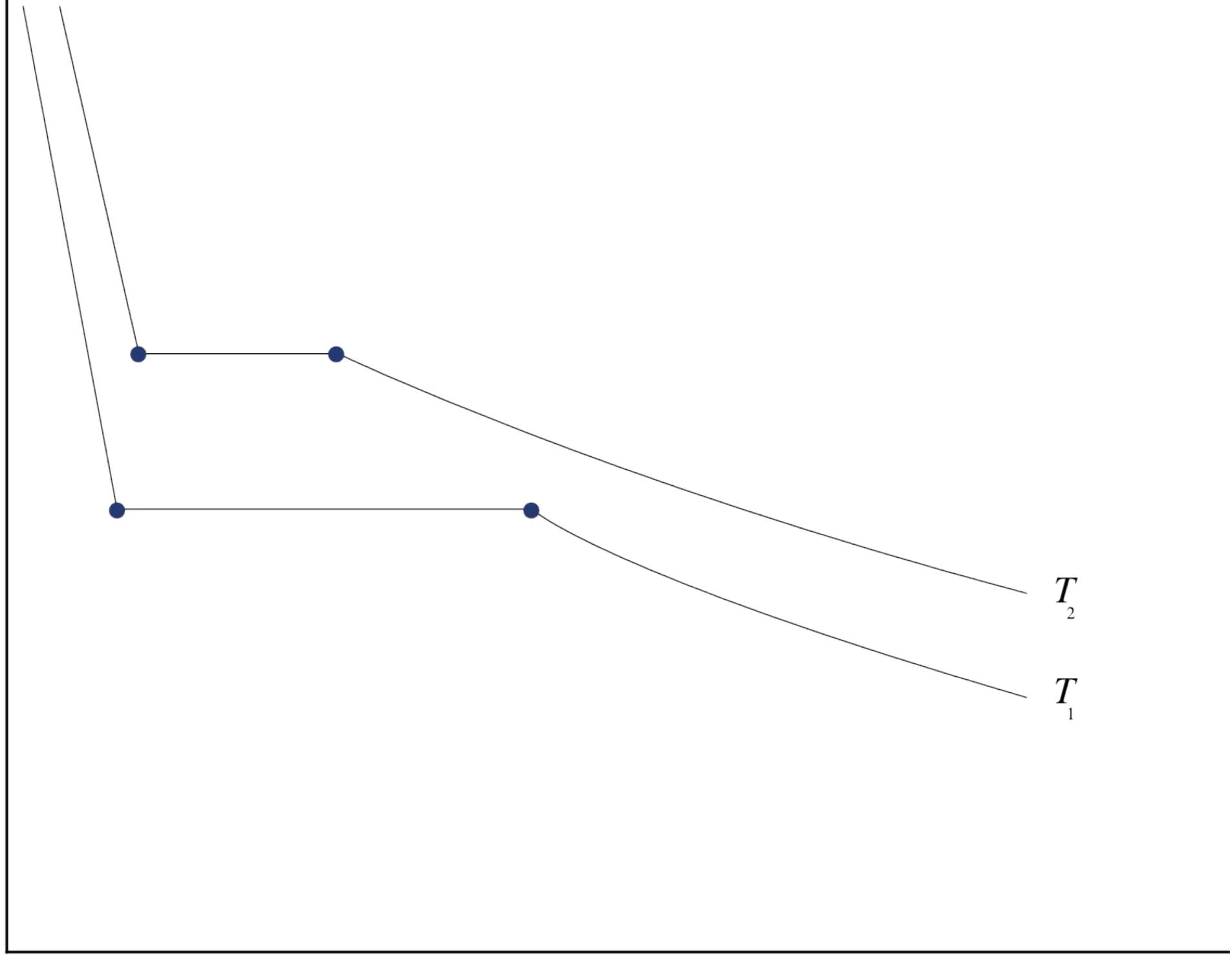
p



T_1

v (log)

p

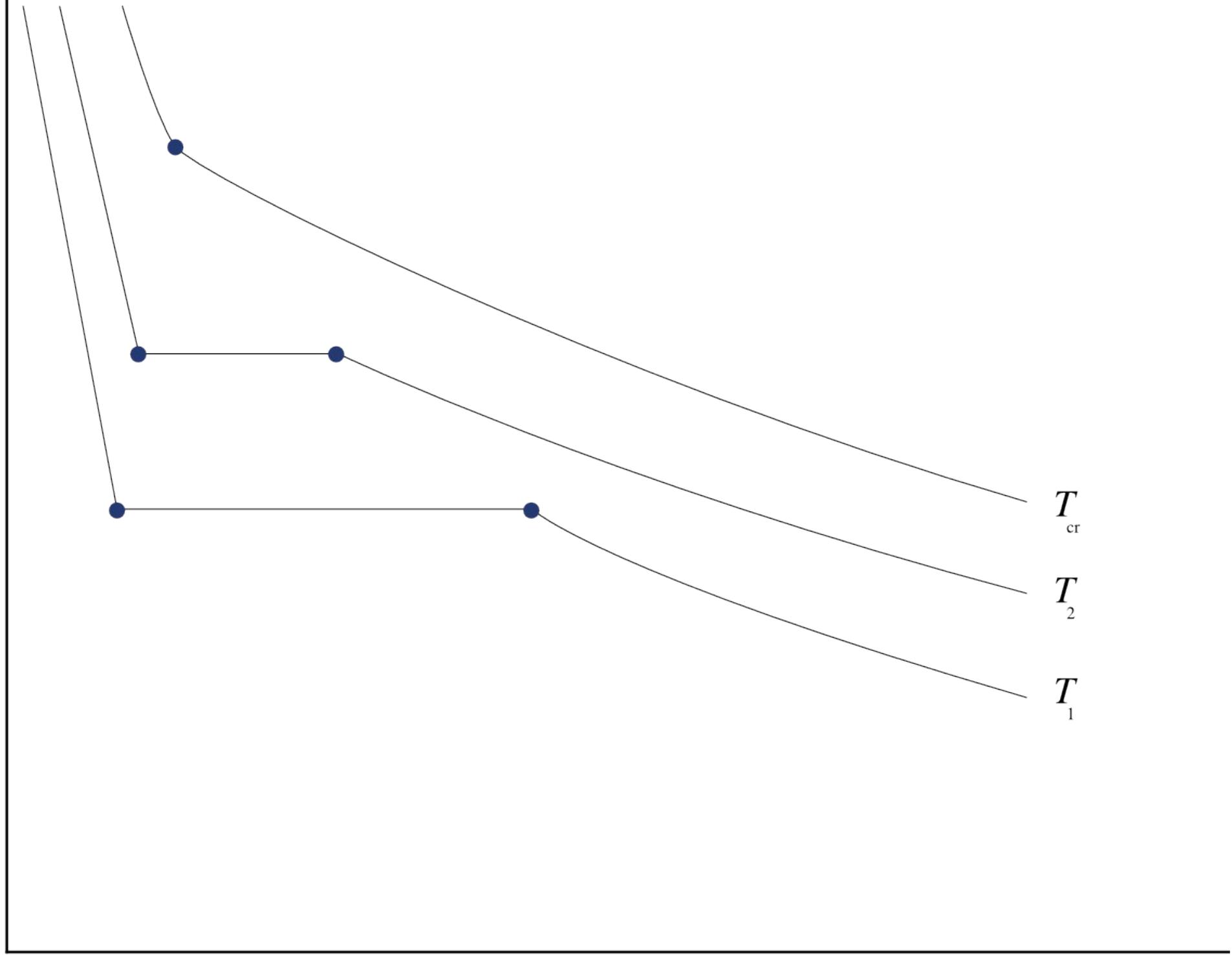


T_2

T_1

v (log)

p



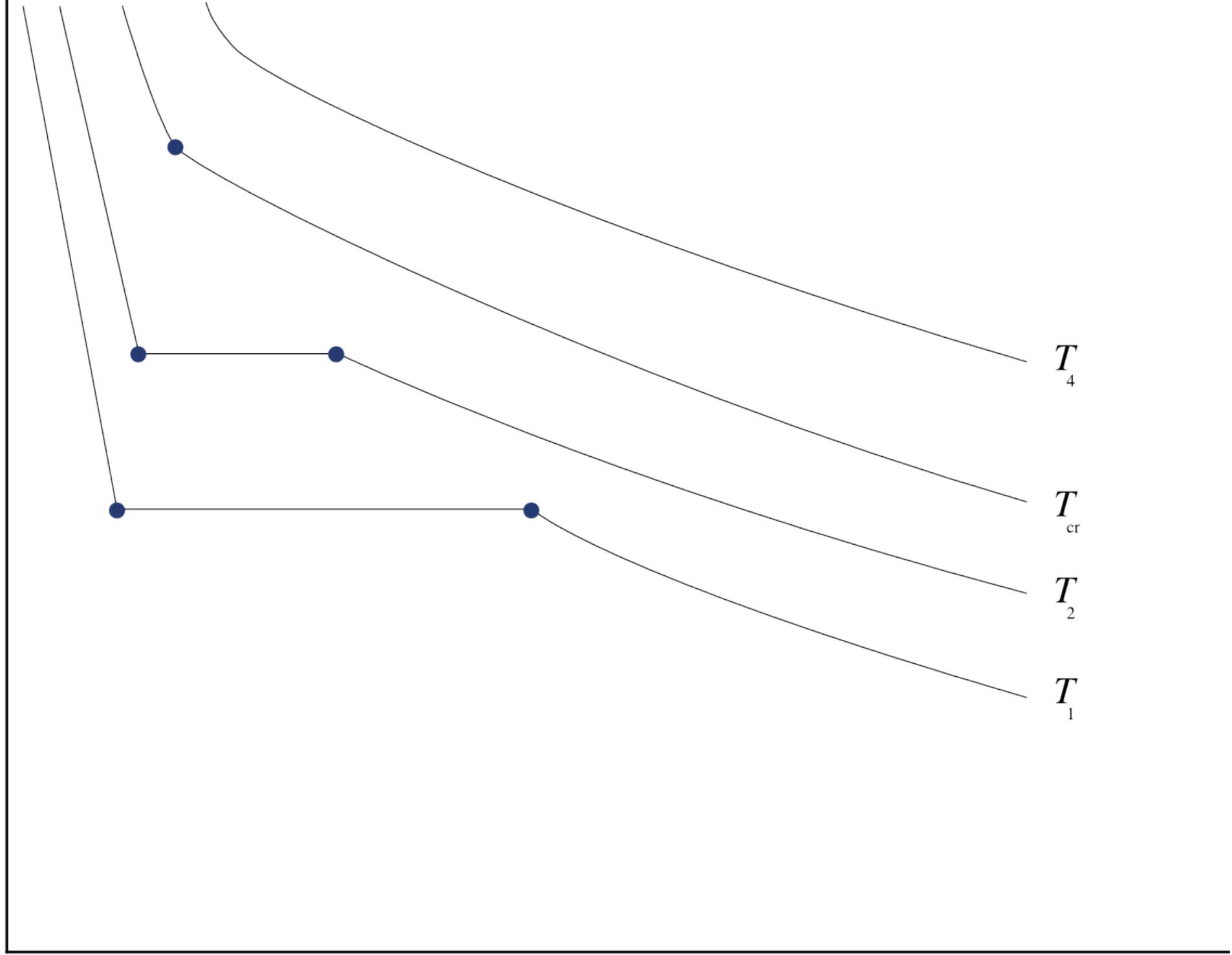
T_{cr}

T_2

T_1

v (\log)

p



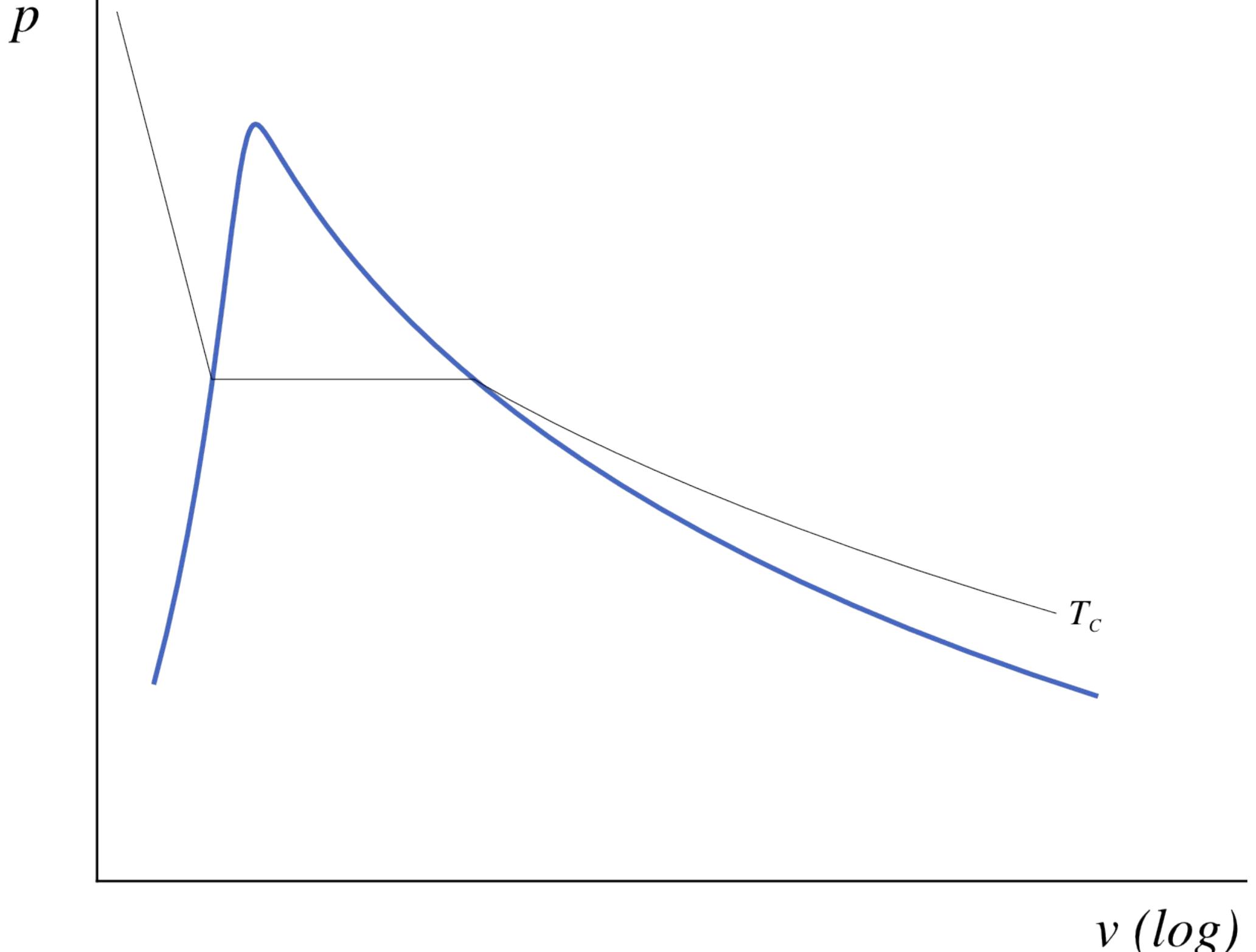
T_4

T_{cr}

T_2

T_1

$v (\log)$

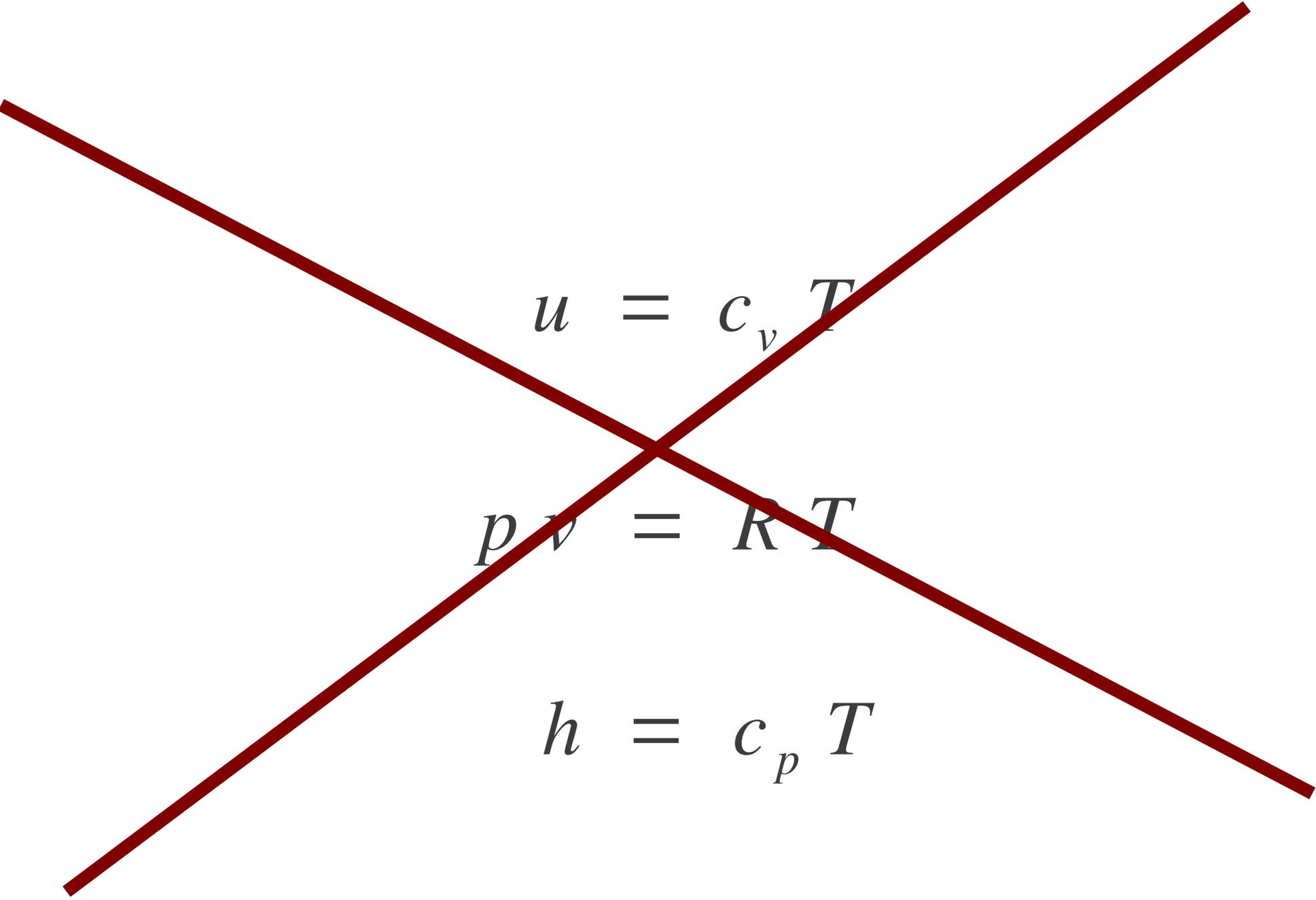


5.2.4 Pièges pour l'étudiant/e

Nos trois principales formes d'énergie

u $p v$ h

ne sont **plus du tout** proportionnelles à la
température


$$u = c_v T$$

$$p v = R T$$

$$h = c_p T$$

Si vous *calculez* une température avec un
liquide/vapeur,
vous êtes en train de vous tromper !

5.2.5 L'eau dans la vie courante



L'eau dans la vie courante

- Attention à ne pas confondre l'eau liquide (visible) et sa vapeur (invisible)
 - Buée, condensation, brouillard, nuages etc → liquide
 - La vapeur d'eau est quasi-invisible
- La liquéfaction des fluides peut être catalysée

5.3 Quantification des propriétés de l'eau

*~ le chapitre le moins sexy
de toute la thermodynamique ~*



5.3.1 Liquide comprimé et vapeur sèche

°C	$\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$
T	ν	u	h	s
$p = 1,6 \text{ MPa}$				
$(T_{sat} = 201,37 \text{ °C})$				
10	0,001	42	43,6	0,1509
20	0,001001	83,8	85,4	0,2962
50	0,001011	209,1	210,7	0,7031
100	0,001043	418,6	420,3	1,306
200	0,001156	850,4	852,3	2,3305
300	0,15866	2 781,5	3 035,4	6,8863
500	0,22029	3 120,1	3 472,6	7,5409
600	0,24999	3 293,9	3 693,9	7,81
700	0,2794	3 473,5	3 920,5	8,0557
800	0,30865	3 659,5	4 153,3	8,2834
900	0,3378	3 852,1	4 392,6	8,4965
1 000	0,36687	4 051,2	4 638,2	8,6974
1 100	0,39589	4 256,6	4 890	8,8878
1 200	0,42487	4 467,9	5 147,7	9,0689
1 500	0,51169	5 133,7	5 952,4	9,5656
2 000	0,65615	6 326,8	7 376,6	10,272

Exemple

- À 18 bar et 800°C, quel volume occupent 2 kg d'eau ?

Exemple

- Combien d'énergie cette eau perd-elle lorsqu'elle évolue depuis 800°C et 18 bar jusqu'à 50°C et 4 bar ?

Exemple

- Une petite turbine fonctionne avec un débit de vapeur de 3 kg/s et une perte de chaleur de 300 kW.
 - À l'entrée la vapeur est à 800°C et 18 bar ;
 - À la sortie la vapeur est à 1 bar et 500°C.
- Quelle est la puissance développée sous forme de travail ?

Exemple

- Quelle est l'énergie interne spécifique de l'eau à 18 bar et 585°C ?

5.3.2 Points de saturation

Exemple

- À quelle température bout l'eau à une pression de 4 bar ?

Exemple

- Quelle est l'augmentation de volume lorsqu'on vaporise l'eau à 155°C ?

Vous reprendrez bien un exemple ?

- Combien faut-il de chaleur pour vaporiser entièrement (et lentement) 5 l d'eau liquide saturée à 4 bar ?

5.3.3 Le mélange liquide-vapeur

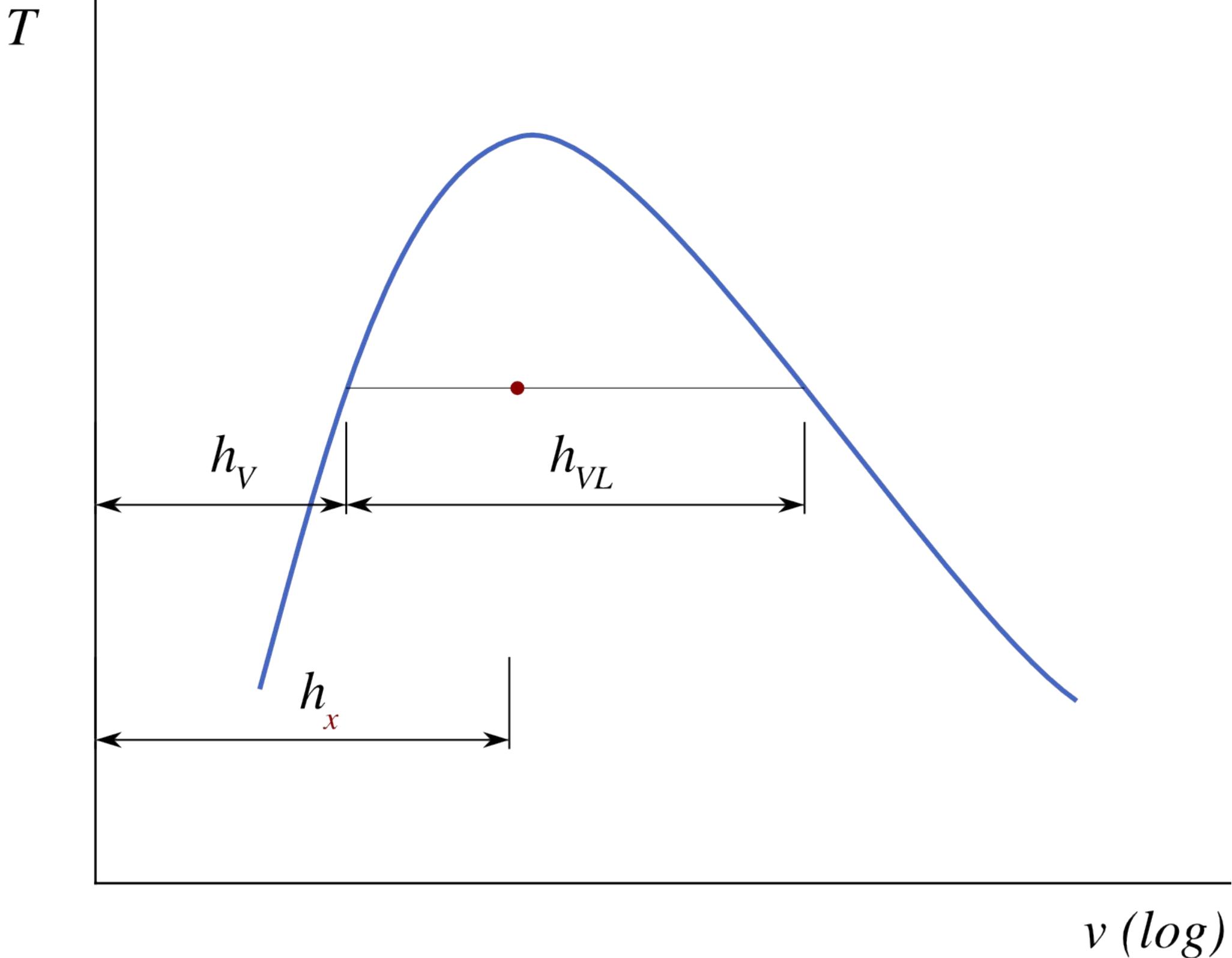
Le titre

est la proportion de vapeur saturée
dans un mélange liquide-vapeur

h

u

v



$$\begin{aligned}h_x &= (1-x) h_L + x h_V \\ &= h_L + x (-h_L + h_V)\end{aligned}$$

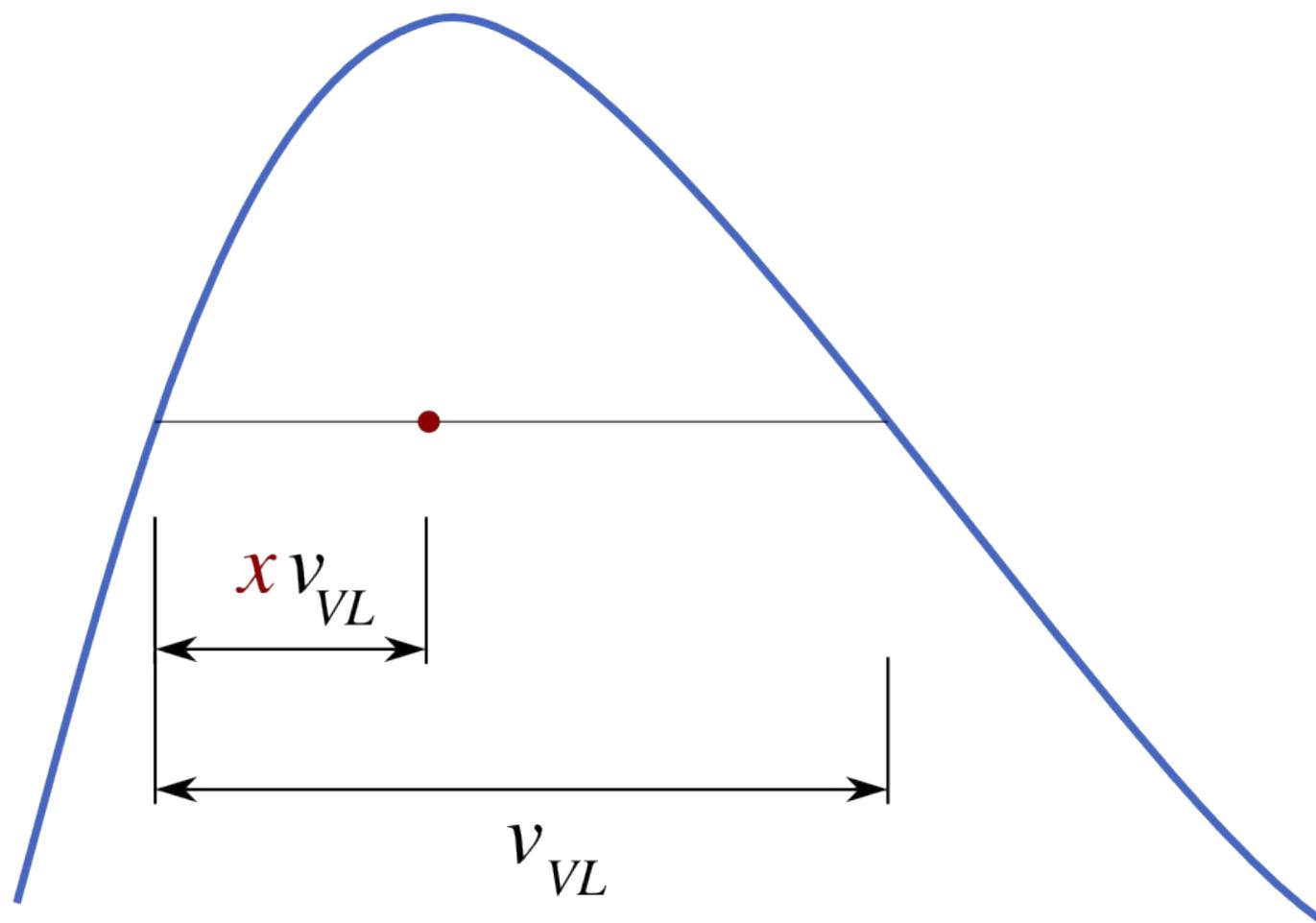
$$h_{LV} \equiv h_V - h_L$$

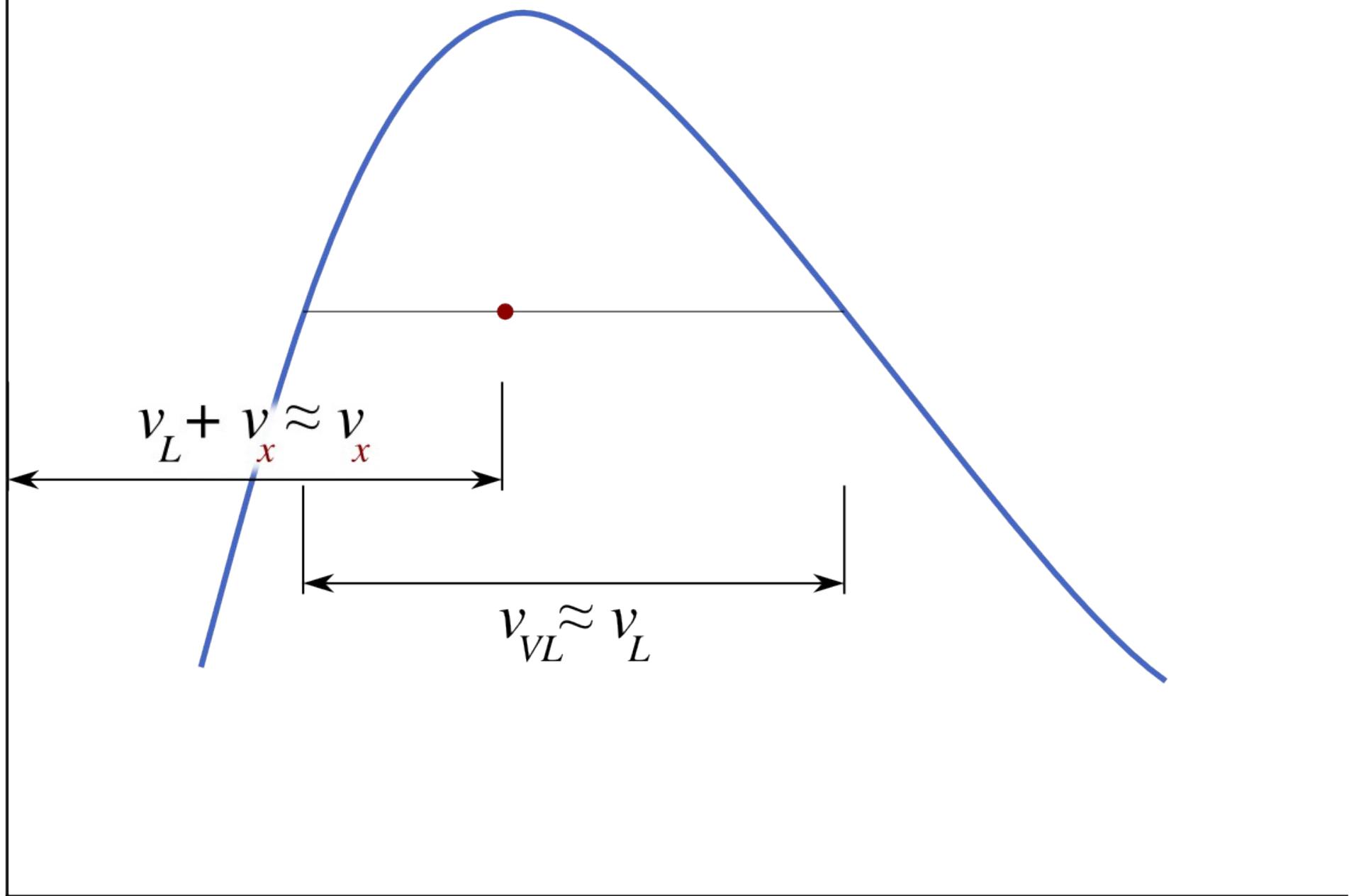
$$h_x = h_L + x h_{LV}$$

$$u_x = u_L + x u_{LV}$$

$$v_x = (1-x) v_L + x v_V$$

$$v_x \approx x v_V$$

T  v (log)

T  v (log)

Chic encore un exemple

- Quels sont l'énergie interne et le volume occupé par une masse de 2 kg d'eau au trois-quarts vaporisée, à 165°C ?

Exemple

- Quel est le titre de l'eau à 3,5 bar dont l'enthalpie est de 2 000 kJ/kg ?

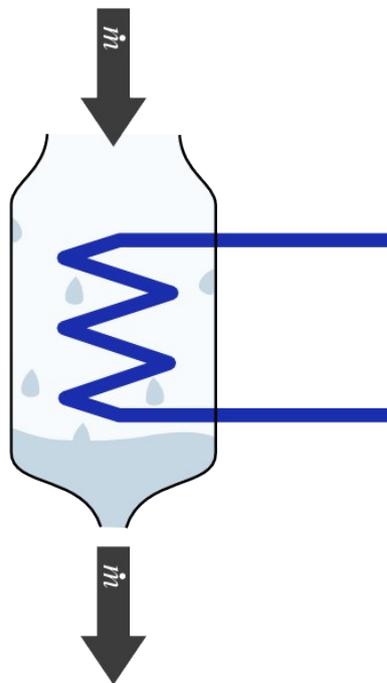
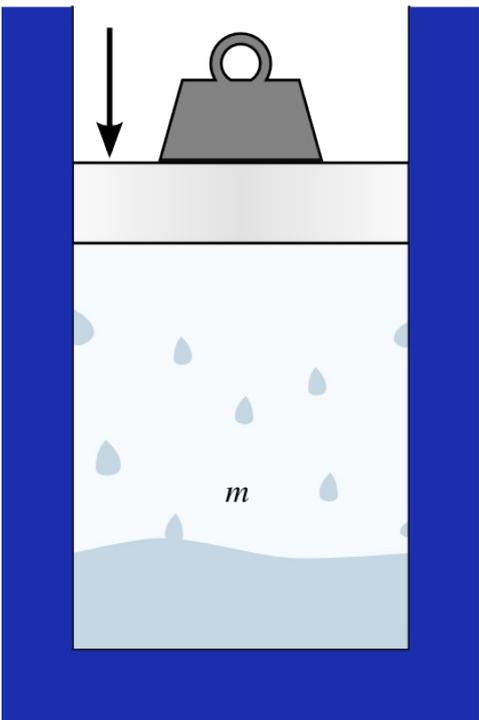
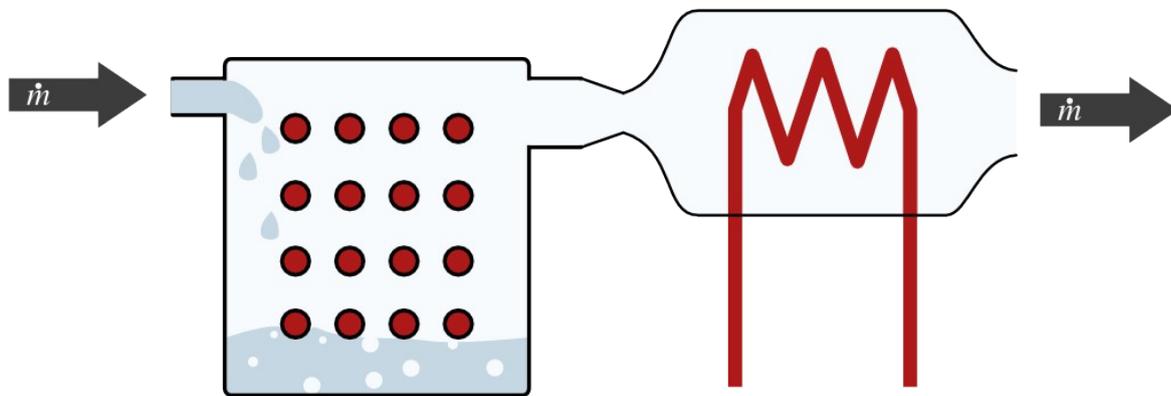
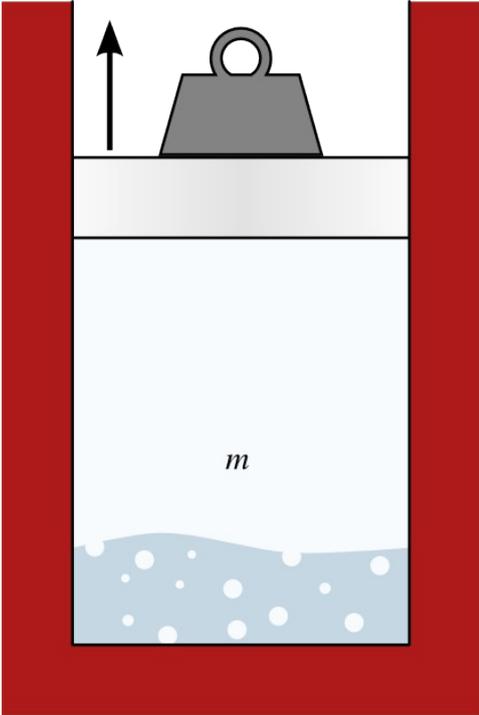
5.4 Transformations

élémentaires réversibles

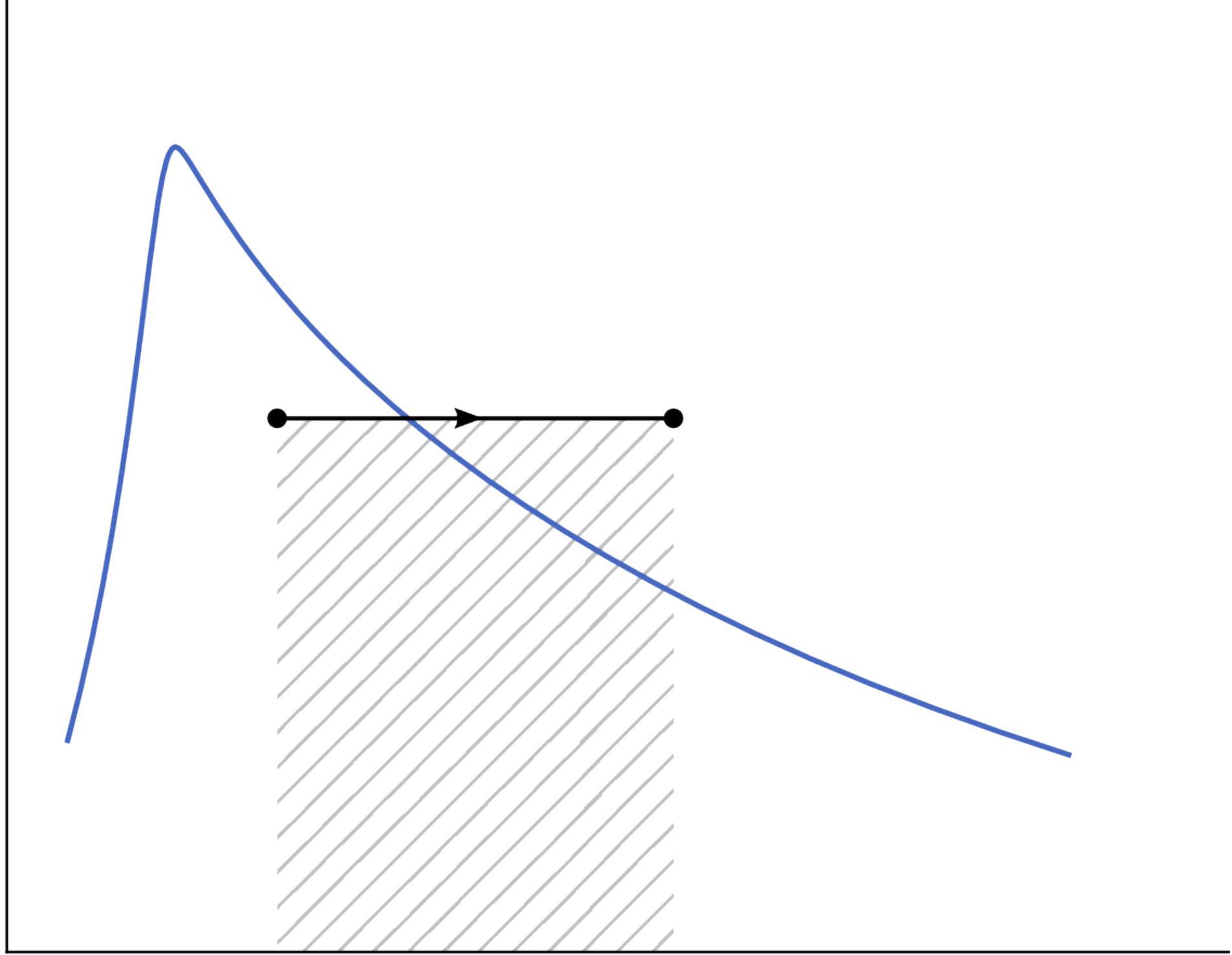
5.4.1 À quoi sert ce chapitre ?

~ à dessiner des petits cœurs ~

5.4.2 Évolutions à pression constante

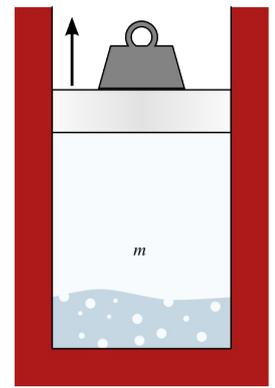


p



$v (\log)$

Pression constante, système fermé

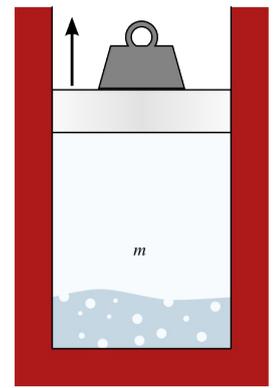


$$w_{1 \rightarrow 2} + q_{1 \rightarrow 2} = \Delta u$$

$$w_{1 \rightarrow 2} = - \int_1^2 p \, dv$$

$$w_{1 \rightarrow 2} = - p \, \Delta v$$

Pression constante, système fermé



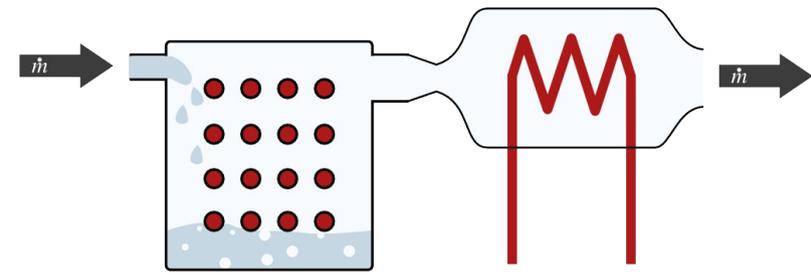
$$w_{1 \rightarrow 2} + q_{1 \rightarrow 2} = \Delta u$$

$$q_{1 \rightarrow 2} = \Delta u - w_{1 \rightarrow 2}$$

$$q_{1 \rightarrow 2} = \Delta h$$



Pression constante, système ouvert

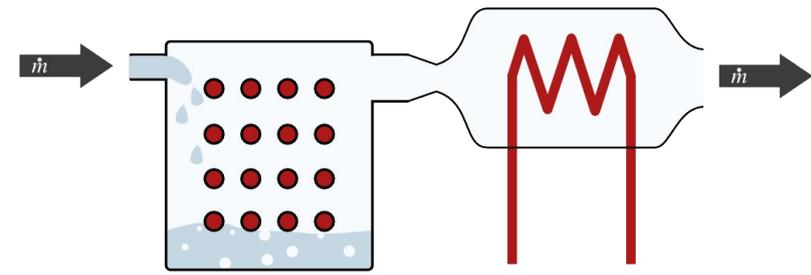


$$w_{1 \rightarrow 2} + q_{1 \rightarrow 2} = \Delta h$$

$$w_{1 \rightarrow 2} = \int_1^2 v \, dp$$

$$w_{1 \rightarrow 2} = 0$$

Pression constante, système ouvert

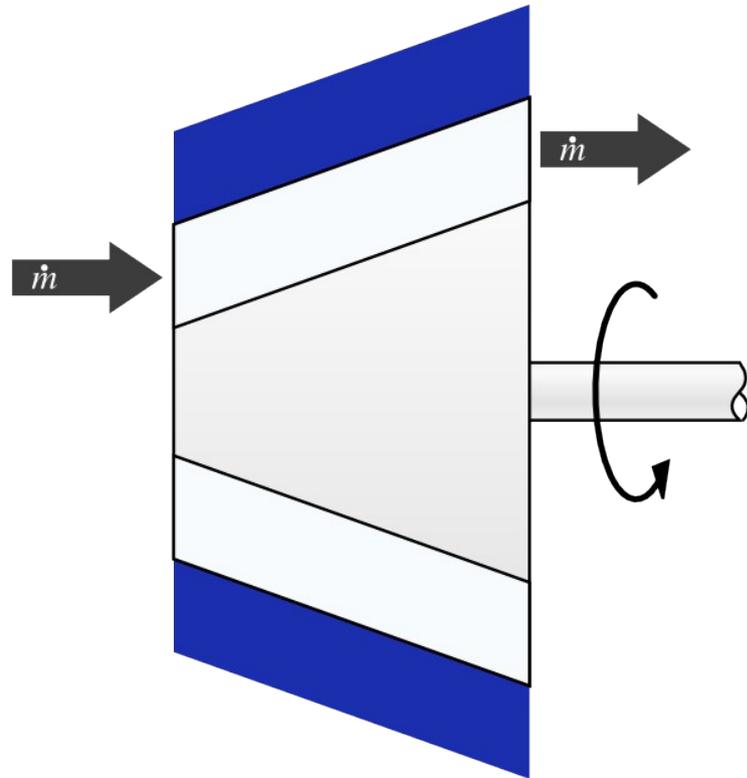
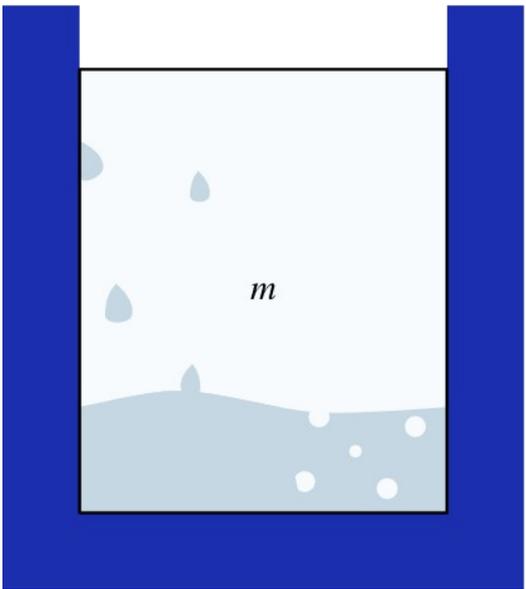
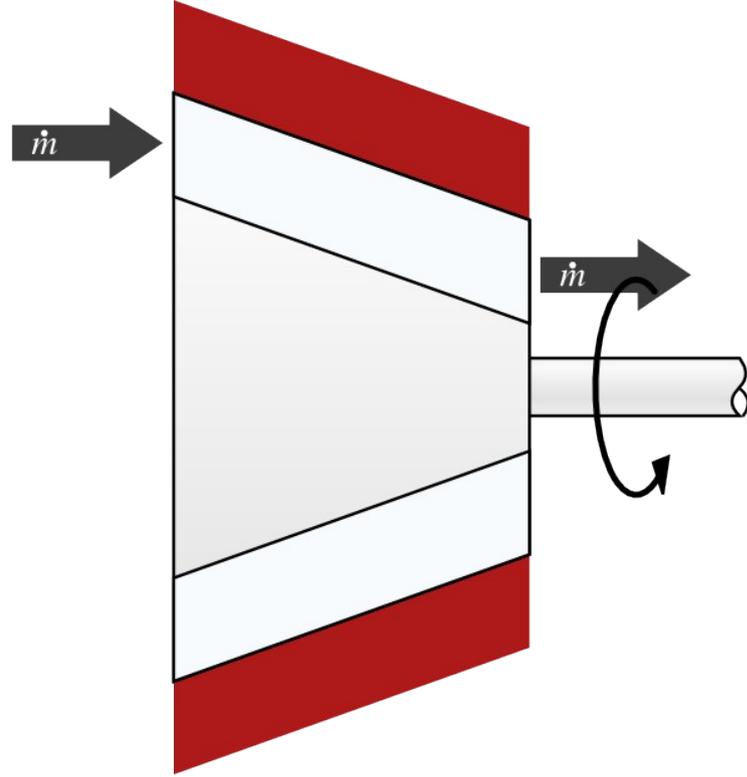
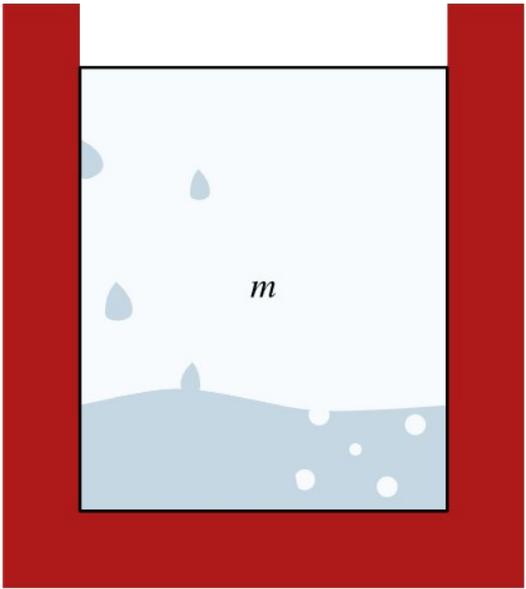


$$w_{1 \rightarrow 2} + q_{1 \rightarrow 2} = \Delta h$$

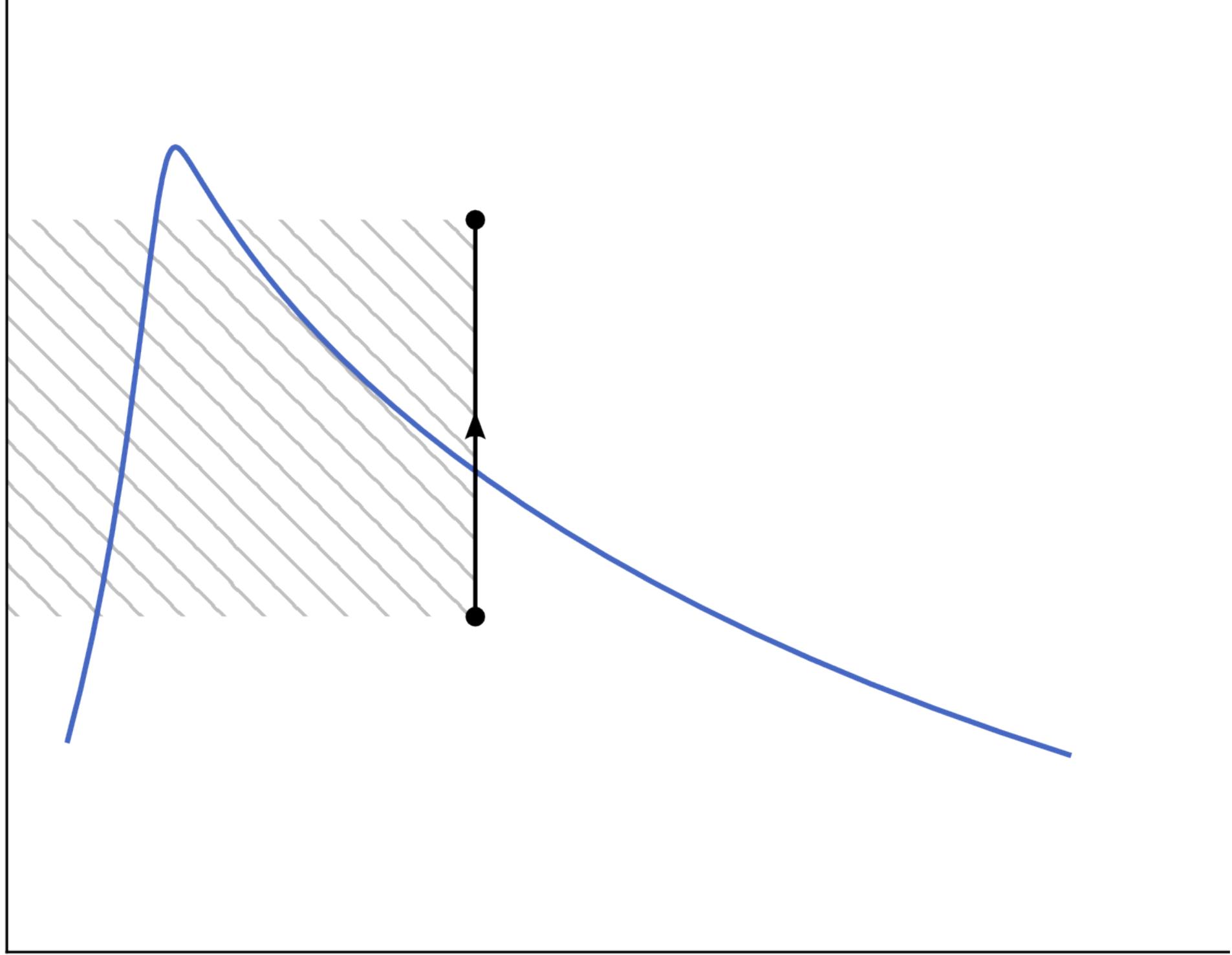
$$q_{1 \rightarrow 2} = \Delta h - w_{1 \rightarrow 2}$$

$$q_{1 \rightarrow 2} = \Delta h$$

5.4.3 Évolutions à volume constant

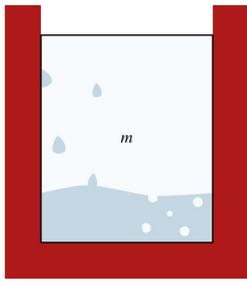


p



$v (\log)$

Volume constant, système fermé

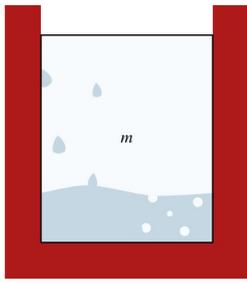


$$w_{1 \rightarrow 2} + q_{1 \rightarrow 2} = \Delta u$$

$$w_{1 \rightarrow 2} = - \int_1^2 p \, dv$$

$$w_{1 \rightarrow 2} = 0$$

Volume constant, système fermé



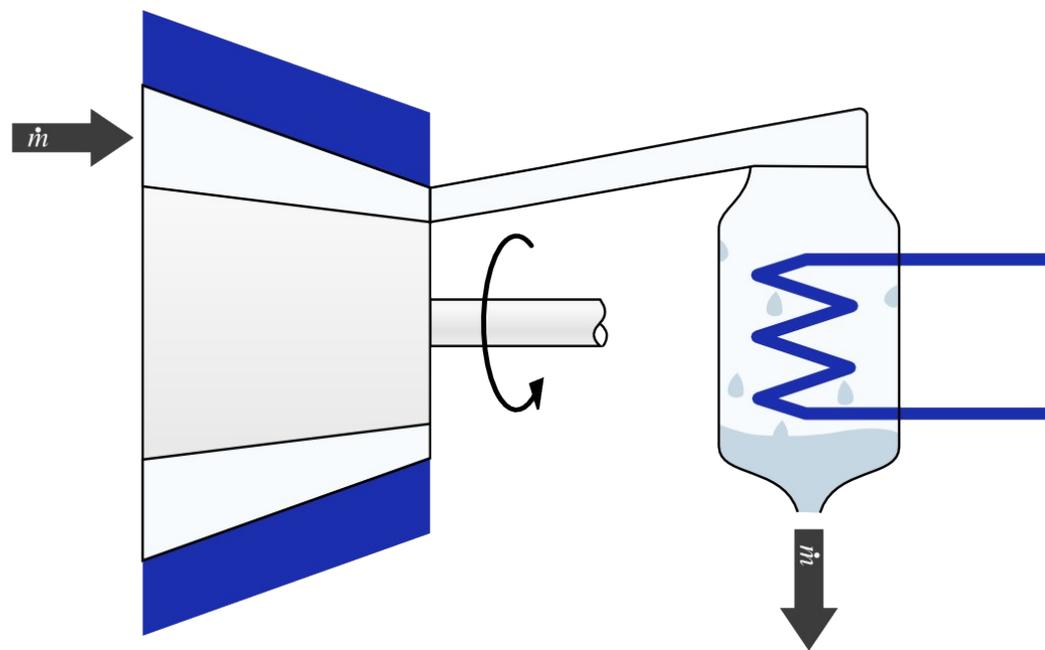
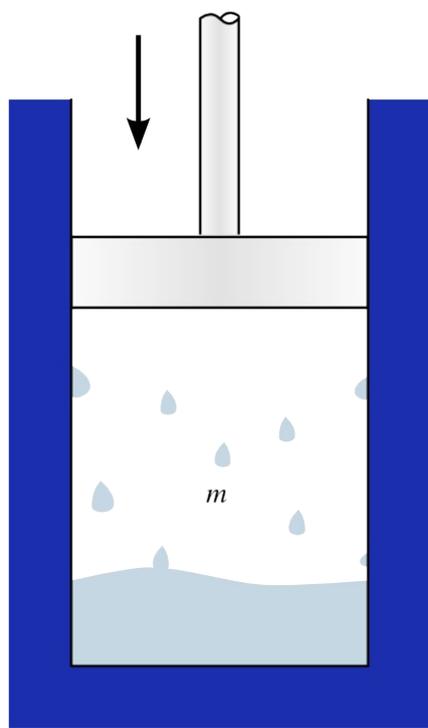
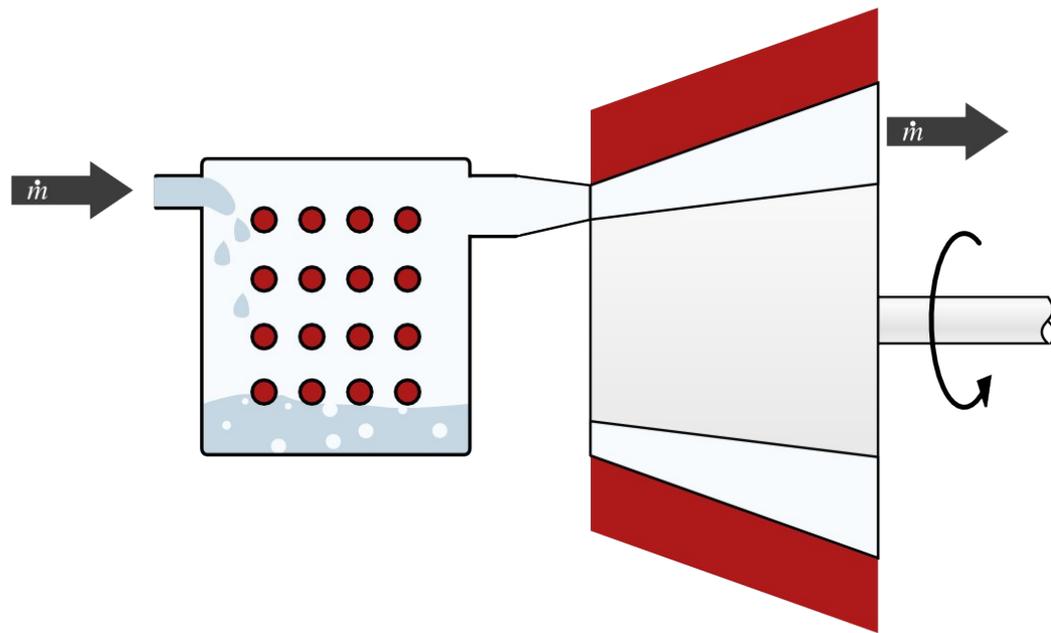
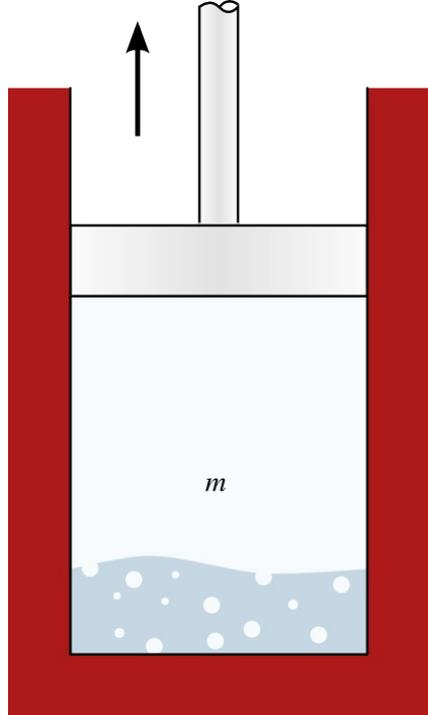
$$w_{1 \rightarrow 2} + q_{1 \rightarrow 2} = \Delta u$$

$$q_{1 \rightarrow 2} = \Delta u - w_{1 \rightarrow 2}$$

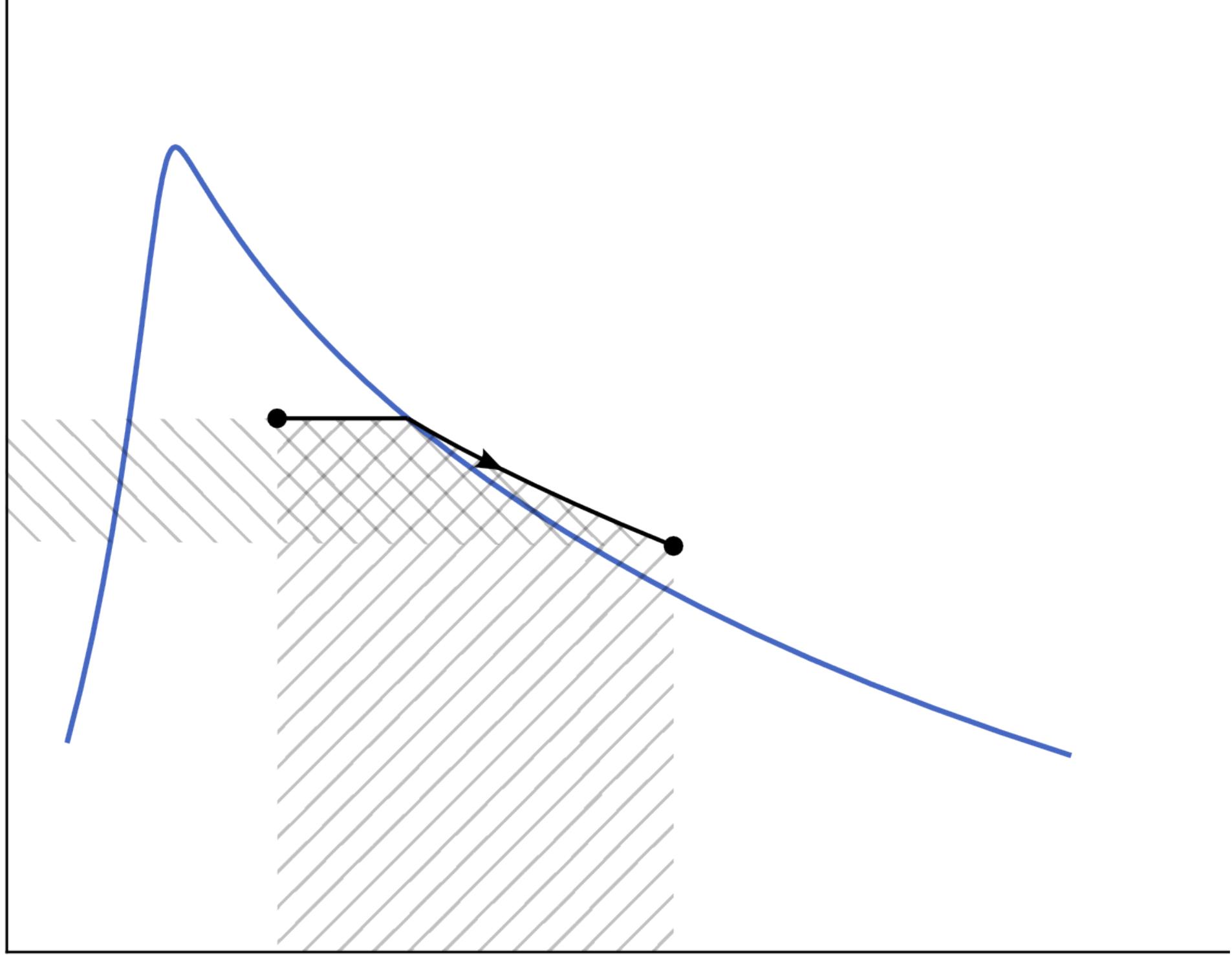
$$q_{1 \rightarrow 2} = \Delta u$$

5.4.4 Évolutions à température constante

~ les grands sabots de Carnot ~

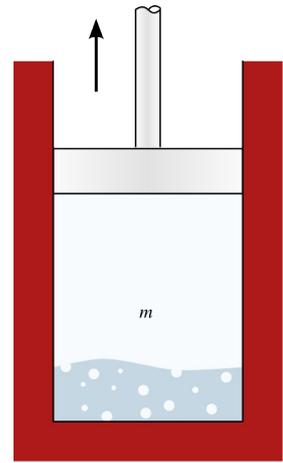


p



$v (\log)$

Température constante, système fermé



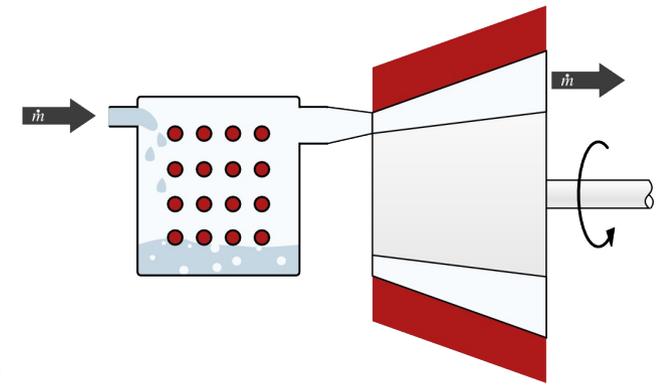
$$w_{1 \rightarrow 2} + q_{1 \rightarrow 2} = \Delta u$$

$$w_{1 \rightarrow 2} = - \int_1^2 p \, dv \qquad q_{1 \rightarrow 2} = \Delta u - w_{1 \rightarrow 2}$$

$$w_{1 \rightarrow 2} = ??$$

$$q_{1 \rightarrow 2} = ??$$

Température constante, système ouvert



$$w_{1 \rightarrow 2} + q_{1 \rightarrow 2} = \Delta h$$

$$w_{1 \rightarrow 2} = \int_1^2 v \, dp$$

$$q_{1 \rightarrow 2} = \Delta h - w_{1 \rightarrow 2}$$

$$w_{1 \rightarrow 2} = ??$$

$$q_{1 \rightarrow 2} = ??$$

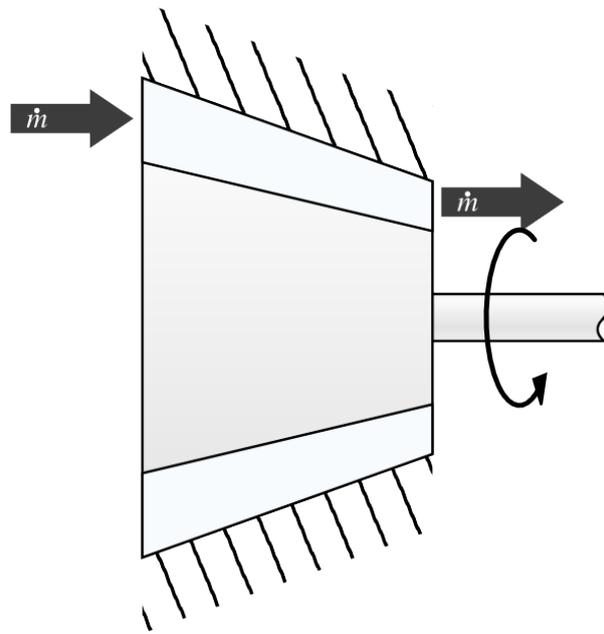
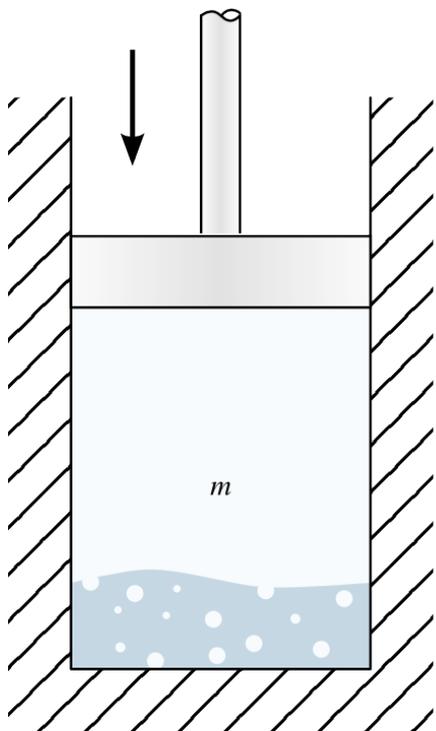
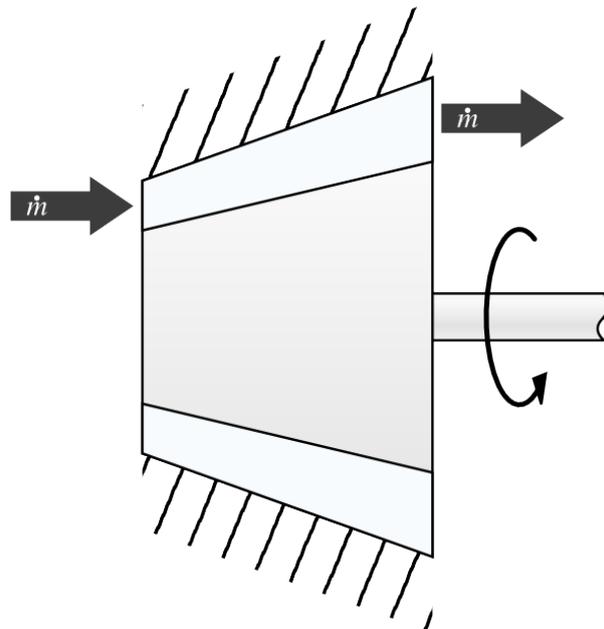
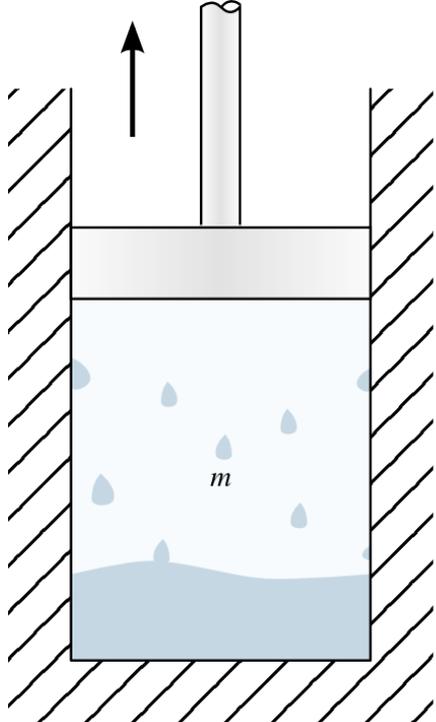
Tant que sous la courbe de saturation,

T constante \leftrightarrow p constante

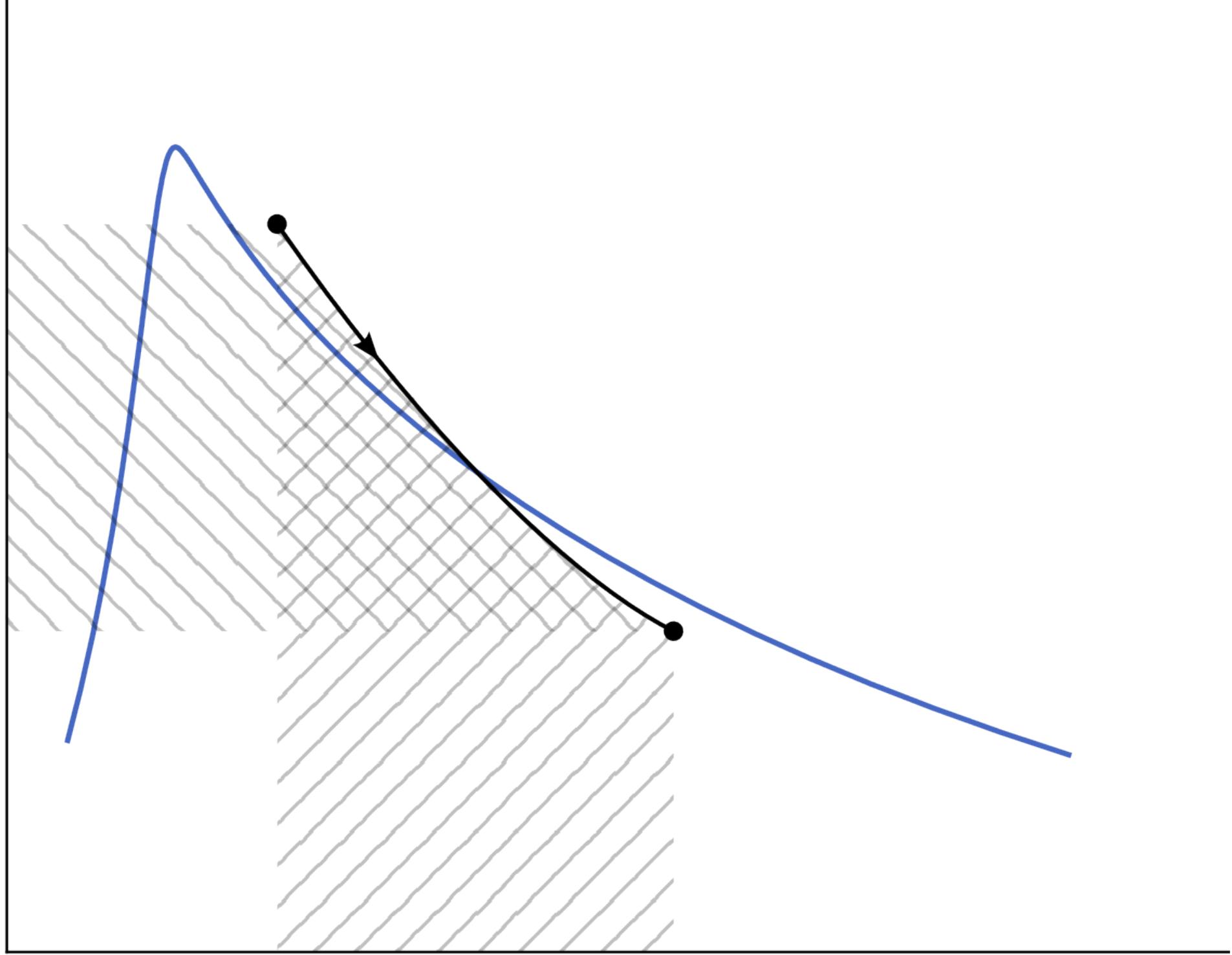
Au delà : impossible de quantifier q ou w

(pour l'instant)

5.4.5 Évolutions adiabatiques réversibles

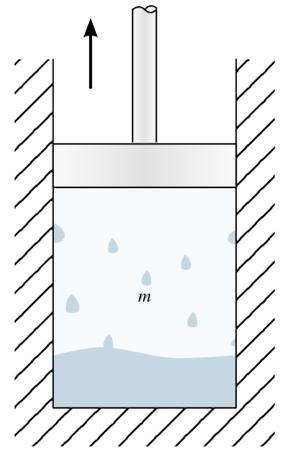


p



$v (\log)$

Adiabatique réversible, système fermé



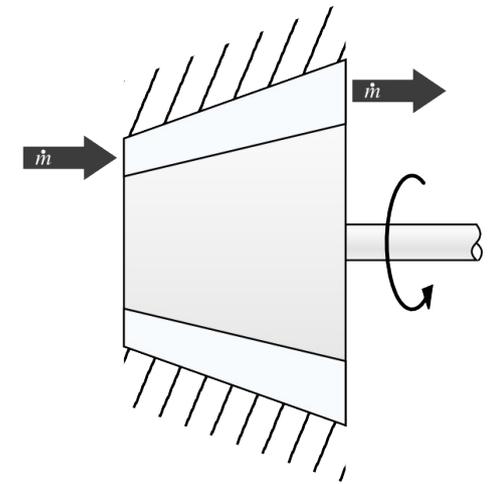
$$w_{1 \rightarrow 2} + q_{1 \rightarrow 2} = \Delta u$$

$$w_{1 \rightarrow 2} = - \int_1^2 p \, dv \qquad q_{1 \rightarrow 2} = \Delta u - w_{1 \rightarrow 2}$$

$$w_{1 \rightarrow 2} = ??$$

$$q_{1 \rightarrow 2} = ??$$

Adiabatique réversible, système ouvert



$$w_{1 \rightarrow 2} + q_{1 \rightarrow 2} = \Delta h$$

$$w_{1 \rightarrow 2} = \int_1^2 v \, dp$$

$$q_{1 \rightarrow 2} = \Delta h - w_{1 \rightarrow 2}$$

$$w_{1 \rightarrow 2} = ??$$

$$q_{1 \rightarrow 2} = ??$$

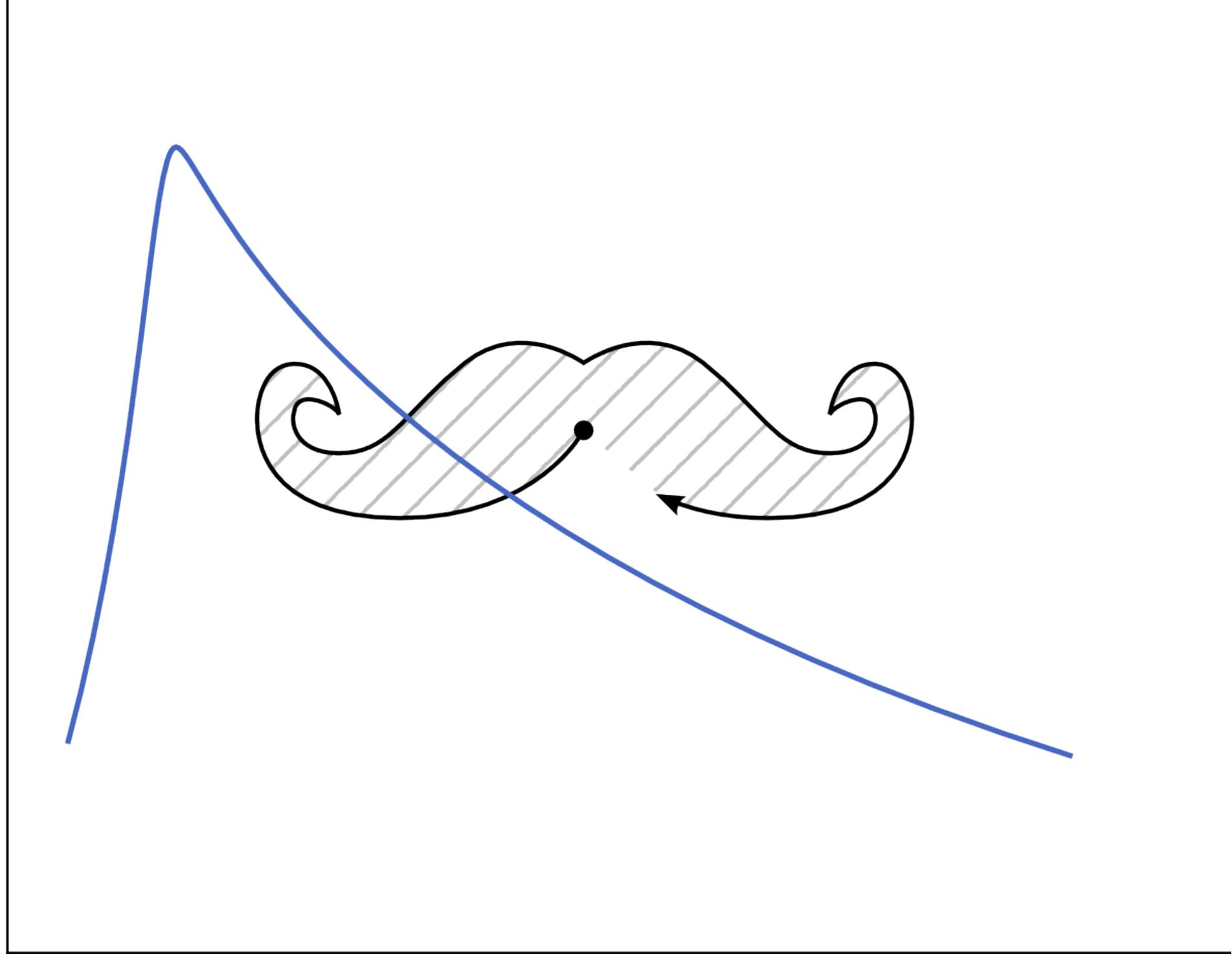
Adiabatique réversible :

Il nous manque une relation entre T , v et p

(ne serait-ce pas bien si nous avions une propriété qui resterait constante lorsque l'on suit une adiabatique réversible ?)

5.4.6 Évolutions arbitraires

p



v (log)