

# Titrages acidobasiques de mélanges contenant une espèce forte et une espèce faible : successifs ou simultanés ?

## Introduction.

L'étude de titrages acidobasiques de mélanges de deux ou plusieurs acides (ou bases) est un exercice courant [1-4]. Les solutions considérées résultent le plus souvent soit du mélange de deux espèces faibles (deux acides ou deux bases), soit de l'association d'une espèce forte et d'une espèce faible. La question usuellement abordée est alors celle de la successivité ou de la simultanéité des titrages des deux acidités ou basicités.

On peut rappeler que dans le cas du mélange de deux espèces faibles associées à deux  $pK_a$  notés  $pK_{a1}$  et  $pK_{a2}$ , avec  $pK_{a1} < pK_{a2}$ , il est usuellement démontré [1,2] que le critère  $pK_{a2} - pK_{a1} > 4$  aboutit au dosage successif des deux espèces<sup>1</sup>, et donc à la constatation d'une équivalence partielle exploitable.

Dans le cas d'un mélange d'une espèce forte avec une espèce faible, il est pressenti que les grandeurs thermodynamiques telles les constantes d'acidités  $K_a$ , ou les constantes d'équilibre des réactions de titrage  $K_a/K_e$  [1] sont à considérer afin de conclure quant au caractère successif des titrages. Toutefois aucun critère quantitatif n'est ni démontré, ni présenté afin de conclure de façon rigoureuse. Certains collègues tendent à "appliquer" plus ou moins intuitivement le critère établi pour les mélanges d'espèces faibles, en injectant  $pK_{a1} = 0$  (correspondant à l'acide fort) pour les mélanges d'acides, et  $pK_{a2} = 14$  (correspondant à la base forte) pour les mélanges de bases.

Cet article traite de la démonstration de critères quantitatifs permettant de conclure quant à la successivité ou simultanéité des titrages pH-métriques de deux acides (ou bases), l'un(e) fort(e) et l'autre faible en mélange.

## 1. Réaction « totale » (quantitative)

Dans cet article toute réaction acidobasique support des titrages sera bien entendu considérée comme "totale". En notant C l'ordre de grandeur de la concentration des réactifs engagés (espèces dosées et titrantes), le tableau 1 résume les conditions à respecter afin que toute réaction de titrage soit assimilable à une réaction "totale" [5], pour une température de 25 °C.

## 2. Critère général de successivité

Il est généralement considéré [1,2] que deux titrage de deux espèces en mélange sont successifs, si et seulement si lorsque le taux d'avancement du titrage de la première espèce est de 99 %, celui du titrage de la seconde espèce est inférieur à 1 %. Dans ce cas on constate usuellement une équivalence partielle repérable expérimentalement, et donc analytiquement exploitable.

<sup>1</sup> En considérant qu'une espèce devient négligeable au critère de 1%.

Tableau 1 : Critères de réaction "totale"

Titration	Réaction de titrage <sup>2</sup>	Constante d'équilibre K	Critère de réaction "totale"
Acide fort / base forte	$H_3O^+ + OH^- = 2 H_2O$	$\frac{1}{K_e}$	$C > 10^{-5} mol.L^{-1}$
Acide faible (AH) / base forte	$AH + OH^- = A^- + H_2O$	$\frac{K_a (AH/A^-)}{K_e}$	$KC > 10^4$
Base faible (B) / acide fort	$B + H_3O^+ = BH^+ + H_2O$	$\frac{1}{K_a (BH^+/B)}$	$KC > 10^4$
Acide faible (AH) / base faible (B)	$AH + B = A^- + BH^+$	$\frac{K_a (AH/A^-)}{K_a (BH^+/B)}$	$K > 10^4$

### 3. Titrages d'un mélange comportant un acide fort et un acide faible

#### 3.1. Titration d'un mélange d'un acide fort et d'un acide faible par une base forte

Soit une solution contenant un acide fort et un acide faible AH de constante d'acidité  $K_a$ . Considérons le titrage de ce mélange par une base forte. Envisageons la position du titrage, où une quantité de matière en ions hydroxyde égale à 99 % de la quantité de matière en acide fort initialement présent, a été introduite. Notons  $C_1$  et  $C_2$  les concentrations formelles en acide fort et en acide faible, dans cette solution, après mélange des réactifs et avant toute réaction chimique. La solution équivalente [6] résultant du transfert de protons entre les espèces fortes, conduit à une solution telle que  $[H_3O^+] = 10^{-2} C_1$  et  $[AH] = C_2$ .

Rajoutons l'hypothèse usuellement satisfaite lors de titrages classiques (solutions relativement concentrées)

$$\sqrt{K_a C_2} > 10\sqrt{K_e}$$

alors la réaction prépondérante (RP) de la solution équivalente est la solvolysse de l'acide faible [6], et la concentration en base conjuguée  $A^-$  peut-être évaluée en procédant à un tableau d'avancement sur cette RP

	AH	+	H <sub>2</sub> O	=	H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	+	A <sup>-</sup>	$K_a$
<i>initial</i>	$C_2$				$10^{-2} C_1$		0	
<i>équilibre</i>	$C_2 - x$				$10^{-2} C_1 + x$		x	

L'application de la relation de Guldberg et Waage à cet équilibre fournit<sup>3</sup>

<sup>2</sup> Cet article traitant des solutions aqueuses, afin d'alléger les écritures, les indices précisant l'état de référence thermodynamique "(aq)" et "(l)" ne sont pas mentionnés.

<sup>3</sup> Dans ce document, nous développerons les activités des solutés dans l'échelle des concentrations, en supposant les coefficients d'activité ( $\gamma$ ) proches de l'unité. De plus, afin d'alléger les écritures nous emploierons la notation usuelle simplifiée  $a_i = C_i$  qui présuppose que toutes les concentrations sont implicitement exprimées en mol.L<sup>-1</sup>. D'où l'absence de terme C° dans les écritures.

$$K_a = \frac{x(10^{-2}C_1 + x)}{C_2 - x} \quad (1)$$

soit

$$x^2 + (10^{-2}C_1 + K_a) - K_a C_2 = 0 \quad (2)$$

La concentration  $[A^-]$  est donc la racine positive du polynôme :

$$x = \frac{-(10^{-2}C_1 + K_a) + \sqrt{(10^{-2}C_1 + K_a)^2 + 4K_a C_2}}{2} \quad (3)$$

et la traduction du critère de successivité précédemment énoncé fournit

$$x = \frac{-(10^{-2}C_1 + K_a) + \sqrt{(10^{-2}C_1 + K_a)^2 + 4K_a C_2}}{2} < 10^{-2}C_2 \quad (4)$$

soit

$$\sqrt{(10^{-2}C_1 + K_a)^2 + 4K_a C_2} < 0,02 C_2 + (10^{-2}C_1 + K_a)$$

d'où

$$(10^{-2}C_1 + K_a)^2 + 4K_a C_2 < (0,02 C_2)^2 + (10^{-2}C_1 + K_a)^2 + 2(0,02 C_2)(10^{-2}C_1 + K_a)$$

soit

$$K_a < 10^{-4}(C_1 + C_2) + 10^{-2}K_a$$

ce qui conduit au critère de titrages successifs rigoureux

$$C_1 + C_2 > 9900 K_a \quad (5)$$

qui peut être "simplifié", en proposant un arrondi, en

$$C_1 + C_2 > 10^4 K_a \quad (6)$$

Ainsi, il peut être démontré un critère de titrages successifs dans le cas d'un mélange d'un acide fort et d'un acide faible titrés par une solution de base forte. Ce critère est fonction à la fois des concentrations des deux types d'acides présents, et de la force de l'acide faible via la constante de la réaction de solvolysse  $K_a$ .

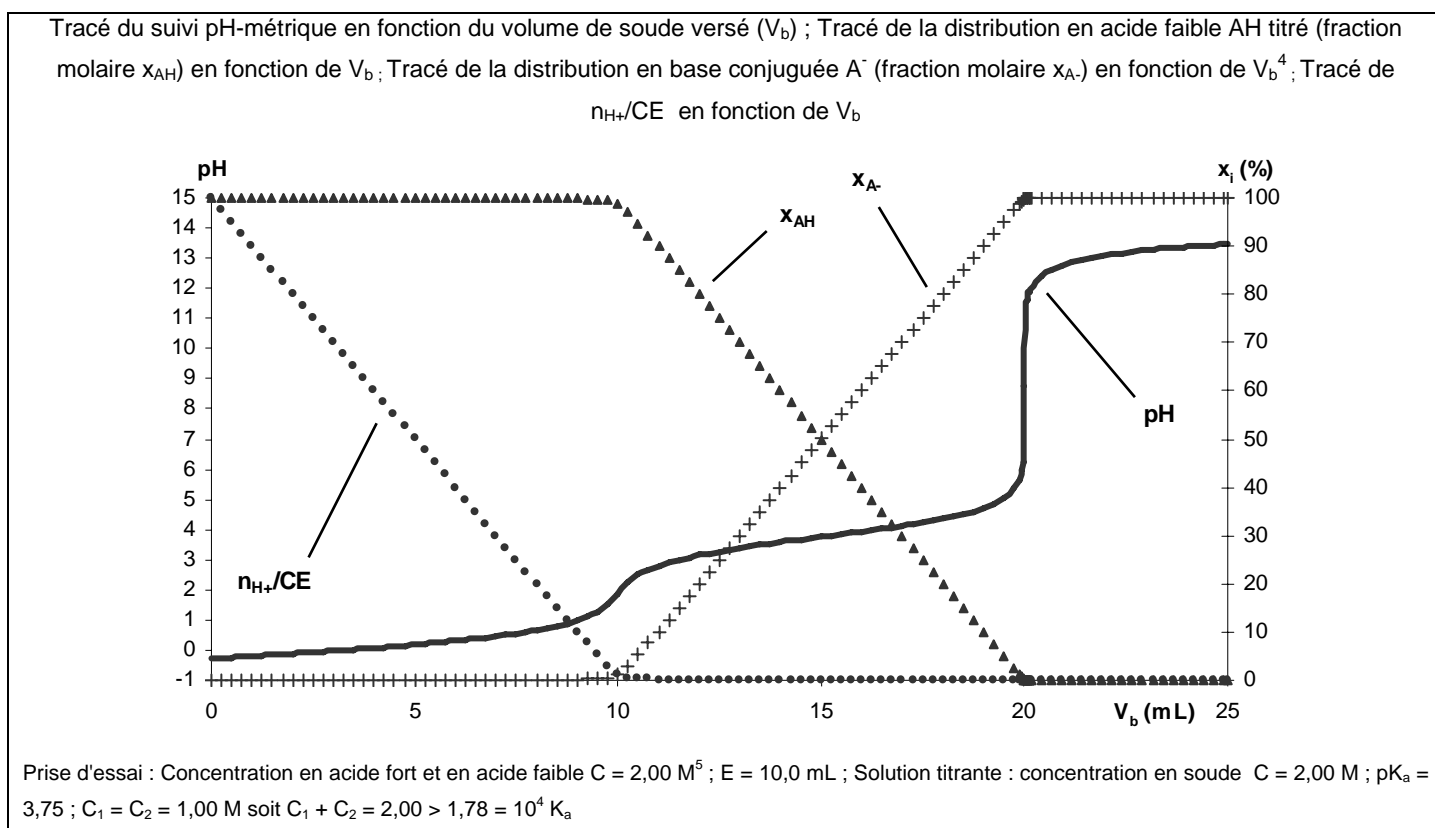
Cette relation montre qu'un tel mélange possède une équivalence partielle remarquable si et seulement si :

- la concentration totale en acides est relativement (suffisamment) élevée
- et/ou

- l'acide faible est relativement "faible"

On peut remarquer que ce critère est loin de la seule sélection basée sur la comparaison des constantes d'équilibre des réactions de titrage de l'acide fort ( $1/K_e$ ) et de l'acide faible ( $K_a/K_e$ ) [1]. L'importance du facteur concentration est également à noter. Cette démonstration établit que l'application plus ou moins "intuitive" du critère correspondant aux mélanges d'acides faibles (aboutissant à la conclusion que seuls les acides faibles associés à un  $pK_a$  supérieur à 4) n'est pas valide. Toutefois elle permet de mettre en évidence la difficulté de dissocier les titrages d'un acide faible relativement "fort" et d'un acide fort.

Les figures 1, 2 et 3 présentent des exemples de titrages simulés par le logiciel Dozzaqueux [7] version 3.06. Les figures 1 et 2 permettent de mettre en évidence l'influence du facteur concentration (*cf* relation (6)) afin de savoir si les titrages des deux espèces sont successifs ou simultanés. La figure 1 illustre de plus la possibilité de titrer un acide relativement "fort" isolément de l'acide fort à condition de travailler à de fortes concentrations. La mise en parallèle des figures 2 et 3 permet de visualiser l'impact de la force de l'acide faible, via son  $K_a$  (*cf* relation (6)), à concentration constante. Les courbes de distribution illustrent bien, pour chaque titrage la simultanéité ou la successivité des dosages.

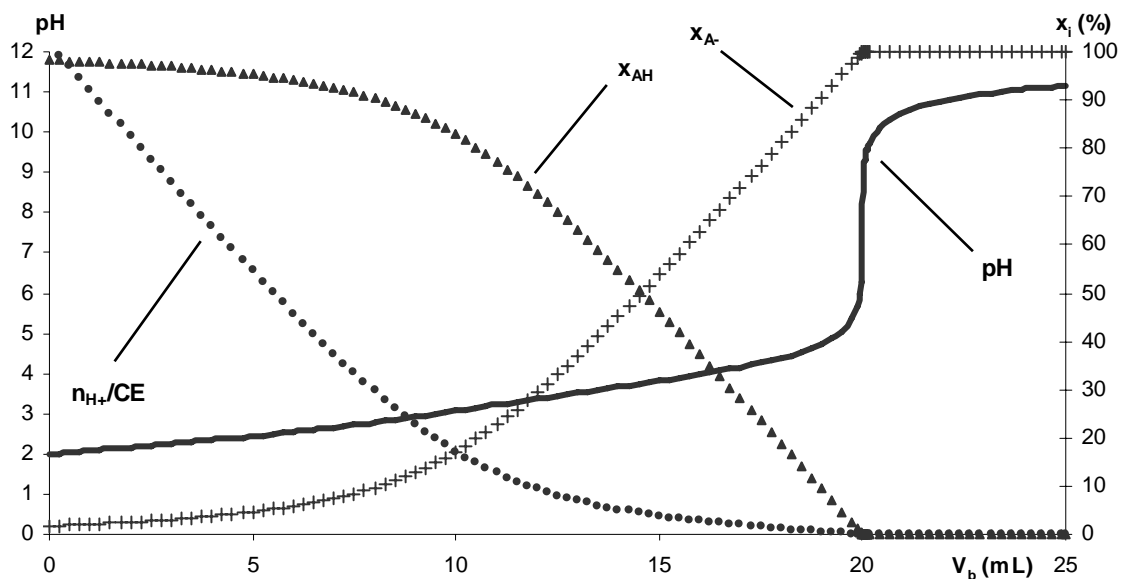


**Figure 1 :** Titrage d'une solution contenant de l'acide chlorhydrique et de l'acide méthanoïque relativement concentrés par une solution de soude

<sup>4</sup> Modélisation réalisée sans tenir compte des éventuels complexes  $\text{NaHCOO}_{(aq)}$  et  $\text{Na}(\text{HCOO})_2^-$  [7].

<sup>5</sup> On utilise l'abréviation M :  $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ .

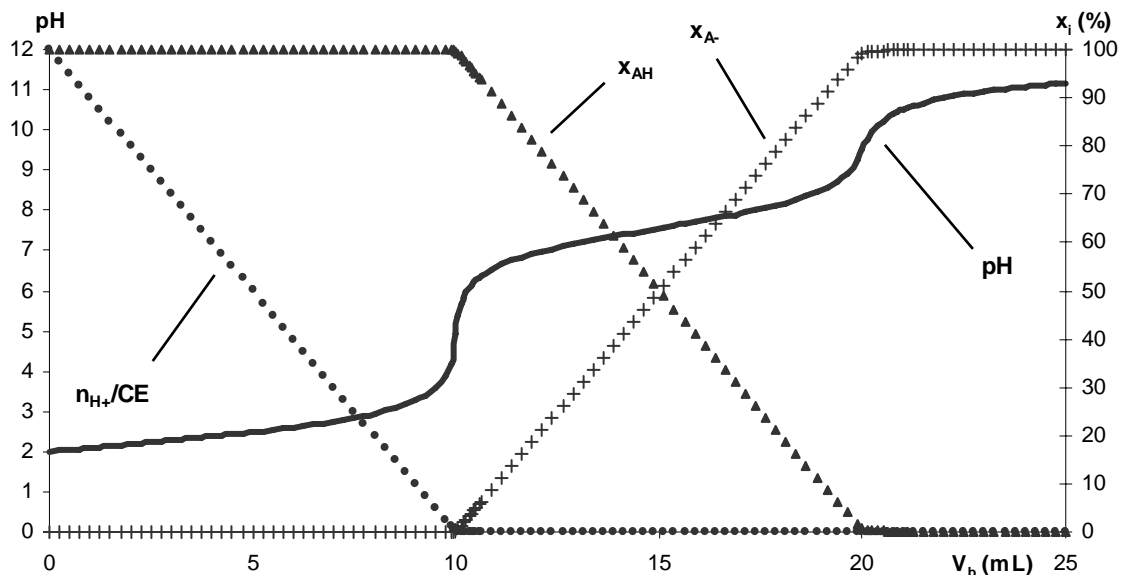
Tracé du suivi pH-métrique en fonction du volume de soude versé ( $V_b$ ) ; Tracé de la distribution en acide faible AH titré (fraction molaire  $x_{AH}$ ) en fonction de  $V_b$  ; Tracé de la distribution en base conjuguée  $A^-$  (fraction molaire  $x_{A^-}$ ) en fonction de  $V_b$ <sup>6</sup> ; Tracé de  $n_{H^+}/CE$  en fonction de  $V_b$



Prise d'essai : Concentration en acide fort et en acide faible  $C = 10,0$  mM ;  $E = 10,0$  mL ; Solution titrante : concentration en soude  $C = 10,0$  mM ;  $pK_a = 3,75$  ;  $C_1 = C_2 = 5,00$  mM soit  $C_1 + C_2 = 0,01 < 1,78 \times 10^{-4} K_a$

**Figure 2 :** Titrage d'une solution contenant de l'acide chlorhydrique et de l'acide méthanoïque relativement dilués par une solution de soude

Tracé du suivi pH-métrique en fonction du volume de soude versé ( $V_b$ ) ; Tracé de la distribution en acide faible AH titré (fraction molaire  $x_{AH}$ ) en fonction de  $V_b$  ; Tracé de la distribution en base conjuguée  $A^-$  (fraction molaire  $x_{A^-}$ ) en fonction de  $V_b$  ; Tracé de  $n_{H^+}/CE$  en fonction de  $V_b$



Prise d'essai : Concentration en acide fort et en acide faible  $C = 10,0$  mM ;  $E = 10,0$  mL ; Solution titrante : concentration en soude  $C = 10,0$  mM ;  $pK_a = 7,55$  ;  $C_1 = C_2 = 5,00$  mM soit  $C_1 + C_2 = 0,01 > 2,8 \times 10^{-4} = 10^{-4} K_a$

**Figure 3 :** Titrage d'une solution contenant de l'acide chlorhydrique et de l'acide hypochloreux par une solution de soude

<sup>6</sup> Modélisation réalisée sans tenir compte des éventuels complexes  $NaHCOO_{(aq)}$  et  $Na(HCOO)_2_{(aq)}$  [7].

### 3.2. Titrage d'un mélange d'un acide fort et d'un acide faible par une base faible

Soit une solution contenant un acide fort et un acide faible AH, associé à la constante d'acidité  $K_a$ . Considérons le titrage (peu usuel, mais envisageable) de ce mélange par une base faible B, de constante d'acidité  $K_a'$ . Envisageons la position du titrage, où une quantité de matière en base B égale à 99 % de la quantité de matière en acide fort initialement présent, a été introduite. Notons  $C_1$  et  $C_2$  les concentrations formelles en acide fort et en acide faible, dans cette solution, après mélange des réactifs et avant toute réaction chimique. La solution équivalente [6] résultant du traitement du transfert de protons entre l'acide fort et la base titrante, conduit à une solution telle que  $[H_3O^+] = 10^{-2} C_1$ ,  $[AH] = C_2$  et  $[BH^+] = 0,99 C_1$ .

Rajoutons l'hypothèse usuellement satisfaite lors de titrages impliquant des solutions relativement concentrées

$$\sqrt{K_a C_2} > 10\sqrt{K_e}$$

ainsi qu'une base titrante relativement "forte" (ie acide conjugué  $BH^+$  nettement plus faible que l'acide dosé AH)

$$\sqrt{K_a C_2} > 10\sqrt{K_a' \times 0,99 C_1}$$

alors la réaction prépondérante (RP) de la solution équivalente est également la solvolysse de l'acide faible AH [6], et la concentration en base conjuguée  $A^-$  peut-être évaluée en procédant à un tableau d'avancement sur cette RP

	AH	+	H <sub>2</sub> O	=	H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	+	A <sup>-</sup>	$K_a$
<i>initial</i>	$C_2$				$10^{-2} C_1$		0	
<i>équilibre</i>	$C_2 - x$				$10^{-2} C_1 + x$		x	

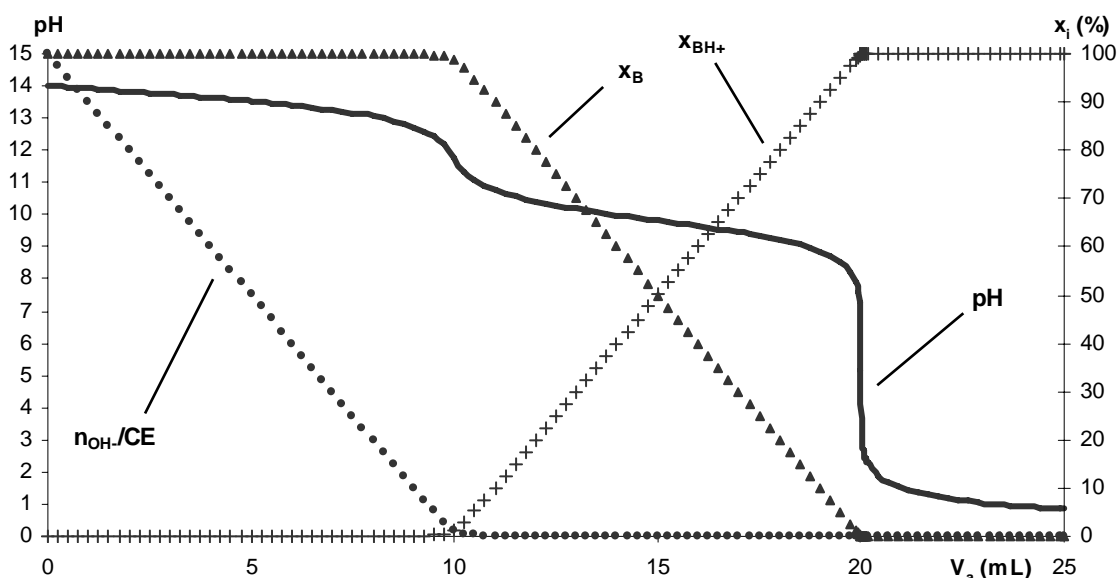
Ceci aboutit au même traitement qu'au paragraphe 3.1, et conduit à l'établissement du critère (5)/(6).

## 4. Titrages d'un mélange comportant une base forte et une base faible.

### 4.1. Titrage d'un mélange d'une base forte et d'une base faible par un acide fort.

Soit une solution contenant une base forte et une base faible B, associée à la constante d'acidité  $K_a$ . Considérons le titrage de ce mélange par un acide fort. Envisageons la position du titrage, où une quantité de matière en ions oxonium égale à 99 % de la quantité de matière en base forte initialement présente, a été introduite. Notons  $C_1$  et  $C_2$  les concentrations formelles en base forte et en base faible, dans cette solution, après mélange des réactifs et avant toute réaction chimique. La solution équivalente [6] résultant du traitement du transfert de protons entre les espèces fortes, conduit à une solution telle que  $[OH^-] = 10^{-2} C_1$  et  $[B] = C_2$ .

Tracé du suivi pH-métrique en fonction du volume d'acide chlorhydrique versé ( $V_a$ ) ; Tracé de la distribution en base faible B titrée (fraction molaire  $x_B$ ) en fonction de  $V_a$  ; Tracé de la distribution en acide conjugué  $BH^+$  (fraction molaire  $x_{BH^+}$ ) en fonction de  $V_a$  ; Tracé de  $n_{OH^-}/CE$  en fonction de  $V_a$ <sup>7</sup>



Prise d'essai : Concentration en base forte et en base faible  $C = 1,00$  M ;  $E = 10,0$  mL ; Solution titrante : concentration en acide chlorhydrique  $C = 1,00$  M ;  $pK_a = 9,81$  ;  $C_1 = C_2 = 0,500$  M soit  $C_1 + C_2 = 1 > 0,65 = 10^4 K_e / K_a$

**Figure 4** : Titrage d'une solution contenant de la soude et de la triméthylamine relativement concentrées par une solution d'acide chlorhydrique

Rajoutons l'hypothèse usuellement satisfaite lors de titrages classiques (solutions relativement concentrées)

$$\sqrt{\frac{K_e}{K_a} C_2} > 10\sqrt{K_e}$$

alors la réaction prépondérante (RP) de la solution équivalente est la protonation de la base faible [6], et la concentration en acide conjugué  $BH^+$  peut-être évaluée en procédant à un tableau d'avancement sur cette RP

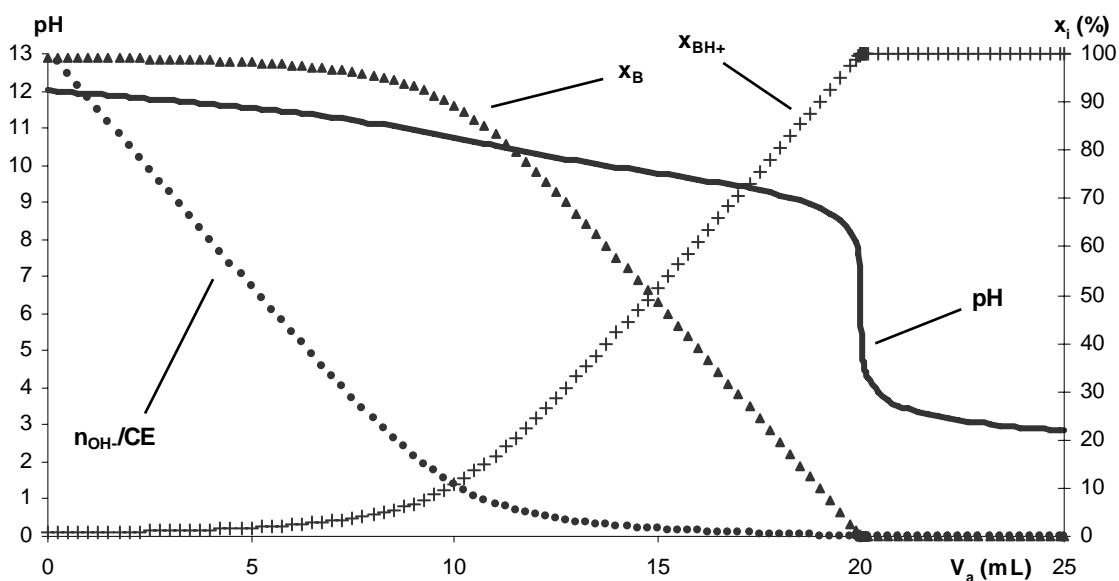
	B	+	H <sub>2</sub> O	=	OH <sup>-</sup>	+	BH <sup>+</sup>	$K_e/K_a$
<i>initial</i>	$C_2$				$10^{-2} C_1$		0	
<i>équilibre</i>	$C_2 - x$				$10^{-2} C_1 + x$		x	

L'application de la relation de Guldberg et Waage à cet équilibre fournit

$$\frac{K_e}{K_a} = \frac{x(10^{-2} C_1 + x)}{C_2 - x} \quad (1')$$

<sup>7</sup> Modélisation réalisée sans tenir compte des paires d'ions  $NaCl_{(aq)}$  et  $NaOH_{(aq)}$  [7].

Tracé du suivi pH-métrique en fonction du volume d'acide chlorhydrique versé ( $V_a$ ) ; Tracé de la distribution en base faible B titrée (fraction molaire  $x_B$ ) en fonction de  $V_a$  ; Tracé de la distribution en acide conjugué  $BH^+$  (fraction molaire  $x_{BH^+}$ ) en fonction de  $V_a$  ; Tracé de  $n_{OH^-}/CE$  en fonction de  $V_a$ <sup>8</sup>



Prise d'essai : Concentration en base forte et en base faible  $C = 10,0 \text{ mM}$ ;  $E = 10,0 \text{ mL}$  ; Solution titrante : concentration en acide chlorhydrique  $C = 10,0 \text{ mM}$  ;  $pK_a = 9,81$  ;  $C_1 = C_2 = 5,00 \text{ mM}$  soit  $C_1 + C_2 = 0,01 < 0,65 = 10^4 K_e / K_a$

**Figure 5** : Titrage d'une solution contenant de la soude et de la triméthylamine relativement diluées par une solution d'acide chlorhydrique

relation analogue à la relation (1), qui aboutit rigoureusement au critère

$$C_1 + C_2 > 9900 \frac{K_e}{K_a} \quad (5')$$

"simplifiable" en proposant un arrondi, en

$$C_1 + C_2 > 10^4 \frac{K_e}{K_a} \quad (6')$$

Relations équivalentes au couple (5)/(6), dépendantes des concentrations en espèces dosées (faible et forte), et de la force de la base faible titrée via la constante de l'équilibre de protonation  $K_e/K_a$ .

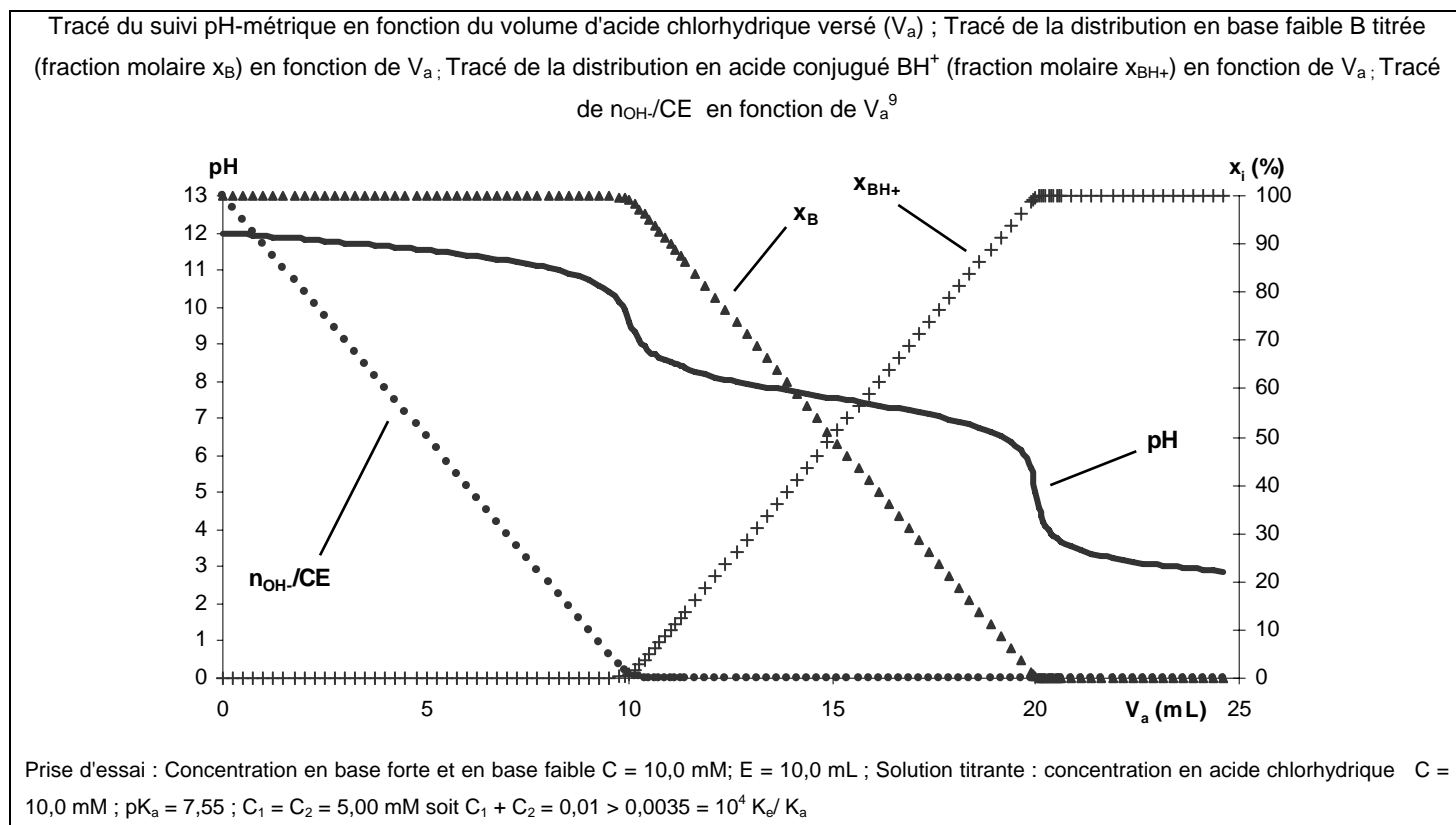
Cette relation montre ici également qu'un tel mélange possède une équivalence partielle remarquable si et seulement si :

- la concentration totale en bases est relativement (suffisamment) élevée
- et/ou
- la base faible est relativement "faible"

<sup>8</sup> Modélisation réalisée sans tenir compte des paires d'ions  $NaCl_{(aq)}$  et  $NaOH_{(aq)}$  [7].



L'importance du facteur concentration est à noter. Cette démonstration établit que l'application plus ou moins "intuitive" du critère correspondant aux mélanges d'espèces faibles (aboutissant à la conclusion que seules les bases faibles associées à un  $pK_a$  supérieur à 10) n'est pas valide. Toutefois elle permet de mettre en évidence la difficulté de dissocier les titrages d'une base faible relativement "forte" et d'une base forte.



**Figure 6** : Titrage d'une solution contenant de la soude et de l'hypochlorite de sodium par une solution d'acide chlorhydrique

Les figures 4, 5 et 6 présentent des exemples de titrages simulés par le logiciel Dozzaqueux [7] version 3.06. Les figures 4 et 5 permettent de mettre en évidence l'influence du facteur concentration (*cf* relation (6')) afin de savoir si les titrages des deux espèces sont successifs ou simultanés. La figure 4 illustre de plus la possibilité de titrer une base relativement "forte" isolément de la base forte à condition de travailler à des concentrations relativement élevées. La mise en parallèle des figures 5 et 6 permet de visualiser l'impact de la force de la base faible, via la constante de la réaction de protonation  $K_e/K_a$  (*cf* relation (6')), à concentration constante. Les courbes de distribution illustrent bien, pour chaque titrage la simultanété ou la successivité des dosages.

#### 4.2. Titrage d'un mélange d'une base forte et d'une base faible par un acide faible

Soit une solution contenant une base forte et une base faible B, associée à la constante d'acidité  $K_a$ . Considérons le titrage de ce mélange (peu usuel, mais envisageable) par un acide faible AH, de constante d'acidité  $K_a'$ . Envisageons la position du titrage, où une quantité de matière en acide AH égale à 99 % de la quantité de matière en base forte initialement présente, a été introduite. Notons  $C_1$  et  $C_2$  les concentrations formelles en base forte et en base faible, dans

<sup>9</sup> Modélisation réalisée sans tenir compte des paires d'ions  $NaCl_{(aq)}$  et  $NaOH_{(aq)}$  [7].

cette solution, après mélange des réactifs et avant toute réaction chimique. La solution équivalente [6] résultant du traitement du transfert de protons entre la base forte et l'acide titrant, conduit à une solution telle que  $[OH^-] = 10^{-2} C_1$ ,  $[B] = C_2$  et  $[A^-] = 0,99 C_1$ .

Rajoutons l'hypothèse usuellement satisfaite lors de titrages impliquant des solutions relativement concentrées

$$\sqrt{\frac{K_e}{K_a}} C_2 > 10 \sqrt{K_e}$$

ainsi qu'un acide titrant relativement "forte" (ie base conjuguée  $A^-$  nettement plus faible que la base dosée B)

$$\sqrt{\frac{K_e}{K_a}} C_2 > 10 \sqrt{\frac{K_e}{K_a'} \times 0,99 C_1}$$

alors la réaction prépondérante (RP) de la solution équivalente est également la protonation de la base faible B [6], et la concentration en acide conjugué  $BH^+$  peut-être évaluée en procédant à un tableau d'avancement sur cette RP

	B	+	H <sub>2</sub> O	=	OH <sup>-</sup>	+	BH <sup>+</sup>	K <sub>e</sub> /K <sub>a</sub>
<i>initial</i>	C <sub>2</sub>				$10^{-2} C_1$		0	
<i>équilibre</i>	C <sub>2</sub> -x				$10^{-2} C_1 + x$		x	

Ceci aboutit au même traitement qu'au paragraphe 4.1, et conduit à l'établissement du critère (5')/(6').

## Conclusion

Cet article a été l'occasion de démontrer des critères quantitatifs permettant de conclure à la successivité ou à la simultanéité du titrage pH-métriques de deux acides (et de deux bases), l'un(e) faible et l'autre fort(e) en mélange.

Un critère applicable à la majorité des titrages classiques (solutions relativement concentrées en espèce faible et base titrante suffisamment forte) impliquant un mélange d'une espèce forte et d'une espèce faible, a été démontré. Il met en évidence la double nécessité de tenir compte à la fois des concentrations des deux espèces dosées, ainsi que de la "force" de l'espèce faible titrée.

Les résultats établis ici sont résumés dans le tableau 2 ci-dessous. Bien évidemment, ils présupposent que les transferts de protons supports des titrages soient assimilables à des réactions totales. Notons que ces critères ont été établis sur la base de concentrations  $C_1$  et  $C_2$  après ajout formel du réactif titrant et avant toute transformation chimique. Toutefois, dans le but de conclure rapidement, et pour des cas usuels où l'espèce titrante est de concentration similaire (impact de la dilution assez faible), on peut dans un premier temps utiliser l'expression de ces critères en injectant en lieu et place de  $C_1$  et  $C_2$ , un ordre de grandeur des concentrations des espèces dans la solution à doser.

**Tableau 2** : Critères de titrage successifs pour des dosages acidobasiques d'un mélange contenant une espèce forte et une espèce faible

Titration d'une solution contenant	Par une solution	Critère rigoureux de successivité	Critère "simplifié"	Remarques
1 acide fort et 1 acide faible	d'une base forte (ou faible)	$C_1 + C_2 > 9900 K_a$	$C_1 + C_2 > 10^4 K_a$	$C_1$ : concentration en espèce forte titrée
1 base forte et 1 base faible	d'un acide fort (ou faible)	$C_1 + C_2 > 9900 \frac{K_e}{K_a}$	$C_1 + C_2 > 10^4 \frac{K_e}{K_a}$	$C_2$ : concentration en espèce faible titrée $K_a$ : constante d'acidité relative à l'espèce faible titrée

## Remerciements.

*J'exprime mes sincères remerciements à Xavier Bataille, amical réviseur de ce document.*

## Bibliographie / Netographie.

- [1] GRÉCIAS P. *Chimie 1<sup>ère</sup> année PCSI*. Paris : Lavoisier, 2003.
- [2] DURUPHTY A., CASALOT A., JAUBERT A. et MESNIL C. *Chimie II 1<sup>ère</sup> année PCSI*. Hachette, 1996.
- [3] VERGNES M., GILLES A. Dosages pH-métriques : Méthode graphique de détermination du point d'équivalence : méthode de GRAN. *Bull. Un. Phys.*, mai 1988, vol. 704, p. 577-584.
- [4] PETITJ., SOURISSEAU J. Dosages de mélanges d'acides. *Bull. Un. Phys.*, juin 1998, vol. 805(1), p. 1061-1070.
- [5] LOPES L. Réactions "totales" en solution aqueuse. *Bull. Un. Phys.*, mars 2005, vol. 99, p. 385-396.
- [6] LOPES L. Méthode de la réaction prépondérante : proposition d'une approche quantitative systématisée. *Bull. Un. Phys.*, mai 2008, vol. 102, p. 707-726. Disponible sur internet : <URL : [http://www.educnet.education.fr/rnchimie/chi\\_gen/dossiers/lopes/BUP\\_Lopes\\_904\\_2008.pdf](http://www.educnet.education.fr/rnchimie/chi_gen/dossiers/lopes/BUP_Lopes_904_2008.pdf)>
- [7] BIAN SAN J.-M. *Logiciel Dozzaqueux, version 3.06*.  
Disponible sur internet : <http://jeanmarie.biansan.free.fr/dozzaqueux.html>