

MARQUEURS GÉNÉTIQUES SANGUINS CHEZ LES CHEVAUX DE COURSE (1)

Luba PODLIACHOUK (*), Marie KAMINSKI*, A. VAN de WEGHE**,
Y. BOUQUET**, J. ZWOLINSKI*** et S. SIUDZINSKI***

avec la collaboration technique de Roselyne BEAUD,
Françoise PIGACHE et Michèle SYKIOTIS

*Centre de Biologie et Pathologie infectieuse des Équidés,
Institut Pasteur, Paris*

** Laboratoire d'Enzymologie, C. N. R. S.,
91190 Gif-sur-Yvette*

*** Faculté de Médecine vétérinaire, Université de Gand,
9220 Merelbeke (Belgique)*

**** Akademia Rolnicza, Poznan (Pologne)*

RÉSUMÉ

Le polymorphisme contrôlé par 7 systèmes de groupes sanguins et par 11 systèmes de protéines sanguines dont certains enzymes, a été analysé dans quatre races de chevaux : *Pur-sang anglais*, *Trotteur*, *Arabe*, *Anglo-arabe*, afin de rechercher si l'on peut définir un « profil génétique » caractéristique de ces races ; la comparaison a également porté, au sein d'une même race, sur des échantillons provenant de divers pays (France, Belgique, Pologne).

Tous les systèmes sont polymorphes chez le *Trotteur* qui présente une variabilité élevée, se situant entre celle des chevaux de courses et celle des chevaux de trait. Par contre la variabilité génétique de l'*Arabe*, de l'*Anglo-arabe* et surtout du *Pur-sang anglais* est moins élevée, certains systèmes paraissant monomorphes.

Ces résultats sont discutés à la lumière de ce que l'on sait de l'histoire de ces races.

I. — INTRODUCTION

Des études préliminaires portant sur l'analyse d'un nombre restreint de marqueurs sanguins dans diverses races de chevaux ont permis de mettre en évidence des différences notables entre les races de « sang » et les races de trait (PODLIACHOUK

(1) Les résultats préliminaires ont été présentés à la XIV^e Conférence de l'I.S.A.B.R. à Davis (Calif., États-Unis) en juin 1974 : « Blood genetic markers in race horses ». L. PODLIACHOUK, M. KAMINSKI, A. VAN de WEGHE, Y. BOUQUET, J. ZWOLINSKI, S. SIUDZINSKI.

(2) Adresse actuelle : Laboratoire de Génétique biochimique, Centre national de Recherches zootechniques I.N.R.A., 78350 Jouy en Josas, France.

et KAMINSKI, 1972). D'autre part, l'ensemble des résultats accumulés par différents laboratoires indique, de façon convergente, que presque chaque race possède son individualité génétique propre, alors que des sous-populations d'une même race présentent dans divers pays un degré élevé de similitude génétique, tant pour les groupes sanguins que pour les protéines polymorphes (PODLIACHOUK, 1968 ; BRAEND, 1973).

Le développement actuel de l'industrie des courses qui s'accompagne d'échanges internationaux réguliers, soit à l'occasion des compétitions, soit pour l'élevage, justifie une investigation plus approfondie des races « de sang », *Pur-sang anglais* et *Trotteur* notamment.

Une étude comparée du « profil » génétique des races de chevaux de « sang » les plus importantes a donc été entreprise, le principe étant d'estimer, à l'aide des fréquences alléliques de différents systèmes génétiques marqueurs, les ressemblances ou divergences existant d'une part entre ces races, et d'autre part au sein d'une même race, entre les sous-populations existant dans les différents pays.

Le travail a porté sur 7 systèmes de groupes sanguins et 11 systèmes d'enzymes ou protéines non-enzymatiques du sérum ou des érythrocytes. Les races étudiées sont le *Pur-sang anglais*, le *Trotteur*, l'*Arabe* et l'*Anglo-arabe*, dont des sous-populations provenaient de France, Belgique et Pologne.

II. — MATÉRIEL ET MÉTHODES

A. — Races examinées

Le cheval *Arabe* est une race fort ancienne dont la fixation a été réalisée en Asie Mineure et en Arabie il y a plusieurs siècles, mais dont plusieurs souches distinctes se sont multipliées dans différents pays et régions. Le *Pur-sang anglais*, sélectionné sur la base des performances en courses plates de galop ou d'obstacles, résulte de la fusion, effectuée il y a 3 siècles, d'une population locale d'Angleterre avec des sujets de souches arabes importés de l'Orient. Les *Trotteurs français* et *américain*, considérés comme des *Demi-sang*, sont le produit de croisements de chevaux locaux *Demi-sang* par des *Pur-sang anglais*, effectués au courant du siècle dernier. Enfin l'*Anglo-arabe* est né principalement en France d'une fusion entre sujets *Arabes* et *Pur-sang anglais* et devrait théoriquement posséder au moins 25 p. 100 de « sang » *Arabe* (QUITTET et BLANC, 1974).

B. — Échantillons

Au total nous avons analysé, entre 1972 et 1974, 2 221 échantillons répartis comme suit :

Pays	Race			
	<i>Pur-sang anglais</i>	<i>Trotteur</i>	<i>Arabe</i>	<i>Anglo-arabe</i>
France	182	471	47	360
Belgique	338	540		
Pologne	126		157	
TOTAL	646	1 011	204	360

La nature du matériel animal différait notablement selon les pays d'origine. Les chevaux de France étaient principalement des étalons reproducteurs, propriété des Haras nationaux ou de particuliers, et une minorité de juments et de poulains ayant servi pour des contrôles de filiation effectués depuis 1972. Les chevaux de Pologne étaient des étalons et des juments des Haras nationaux souvent accompagnés de leurs descendants, la totalité des échantillons étant groupée dans un seul envoi. Les *Pur-sang* de Belgique comprenaient des étalons et des poulinières tandis que les trotteurs de ce pays étaient des étalons admis à la reproduction et des chevaux qualifiés par les tests éliminatoires en 1973.

C. — Techniques et nomenclature

Le détail de toutes les techniques mises en œuvre dans ce travail a été donné antérieurement (KAMINSKI *et al.*, 1974).

Rappelons que les facteurs érythrocytaires sont détectés par des antisérums iso-immuns, soit agglutinants, soit hémolyants, préalablement purifiés par absorption sélective. 26 antisérums ont été utilisés, dont 25 correspondent à des facteurs érythrocytaires classés dans 7 systèmes génétiques (tabl. 1). Le 26^e facteur, F/P12, n'est pas encore classé.

Pour 15 facteurs, découverts par au moins deux laboratoires, et contrôlés lors de tests internationaux de comparaison, une nomenclature internationale nouvelle a été récemment adoptée (ANONYME, 1974). Cette nomenclature est utilisée dans le présent travail. En plus des réactifs correspondant à ces 15 facteurs, nous avons utilisé 11 réactifs obtenus dans notre laboratoire mais n'ayant pas encore reçu de désignation définitive, reconnue au niveau international.

Les facteurs érythrocytaires ainsi déterminés sont désignés pour le moment soit par des lettres majuscules (par exemple F, G etc.), soit par des chiffres arabes, suivant l'ordre chronologique de leur découverte, précédés par le code du laboratoire (initiale du pays). Pour simplifier, nous omettons dans le présent texte le code et n'indiquons que la lettre ou le chiffre.

Au total 11 systèmes polymorphes ont été analysés par électrophorèse. Les systèmes analysés dans le sérum sont : les préalbumines *Pr* et *X_k*, l'albumine (*Al*), la transferrine (*Tf*), l'estérase (*Es*). Les systèmes enzymatiques localisés dans les globules rouges comprennent : la catalase (*Cc*), l'anhydrase carbonique (*CA*), la phosphatase acide (*AP*), la 6-phosphogluconate-déshydrogénase (*6-PGD*), la phosphoglucomutase (*PGM*), la phospho-hexose-isomérase (*PHI*). Au total 18 systèmes sanguins polymorphes ont été examinés.

Soulignons que chaque échantillon de sang n'a pas été nécessairement analysé pour tous les systèmes mentionnés, soit que les techniques d'étude de certains systèmes n'aient pas été au point en 1972-73, soit que l'état de conservation de certains échantillons les rendit impropres à certaines déterminations.

L'identification des allèles de groupes sanguins et l'interprétation des phénotypes à partir de certains électrophorogrammes complexes tels ceux des préalbumines, ont été résolues par l'étude des ségrégations dans des familles ; 131 familles complètes (étalon, jument et produit) ont été utilisées ainsi que 31 étalons accompagnés de 191 descendants (une moyenne de 3 à 25 descendants par étalon). Au total, 322 produits ont ainsi été analysés.

III. — RÉSULTATS

I. — Groupes sanguins

Le tableau 1 donne les fréquences des facteurs érythrocytaires dans les races et sous-populations examinées.

Les facteurs *I Aa* et *F*, *Ca*, *Dc* et *Dd* sont toujours, dans leurs systèmes respectifs, les plus fréquents dans les 4 races ; à l'inverse les facteurs *Df* et *Ka* sont relativement rares. Par contre, des différences notables entre races peuvent être observées pour les facteurs *Ab*, *17*, *Da*, *Db*, *J₁*, *G*, *Pb* et *12*.

Nous avons, dans nos travaux antérieurs, signalé l'absence des facteurs *Da* et *Ac* chez les *Pur-sang anglais* (PODLIACHOUK, 1957 ; PODLIACHOUK *et al.*, 1962). D'autres auteurs, cependant, ont trouvé dans cette race le facteur *Ac* avec la fréquence de 0,08 sur 26 chevaux (SIRBU, 1959) et 0,08 sur 276 chevaux (STORMONT et SUZUKI, 1964).

TABL

Fréquences (en p. 100) des facteurs

La détermination des facteurs est indiquée selon la nomenclature
Dans certains cas l'estimation de fréquence porte sur une partie de l'échan-

Systèmes		A						C	D				
Facteurs : nouvelle et ancienne nomenclature		Aa		Ac	Ab		Ca	Da	Db	Dc			
		I	A ₁	F	H	A'	17	C	D	E ₁	E ₂	8	14
Population et nombre													
<i>Pur-sang anglais</i>													
France	182	0,95 38	0,93	0,93	0	0,07	0,07 69	0,93	0	0,43	0,82	0,59 76	0,80 69
Belgique	337	0,92	0,93	0,93	0	0,12	0,12	0,95	0	0,32	0,83	0,71	0,77
Pologne	125	0,91	0,94	0,94	0	0,12	0,12	0,98	0	0,44	0,79	0,55	0,81
TOTAL	644	0,92 500	0,93	0,93	0	0,11	0,11 531	0,95	0	0,37	0,82	0,65 538	0,78 531
<i>Trotteur</i>													
France	303	nd	0,91	0,91	0,01	0,36	0,28	0,96	0,13	0,23	0,64	0,59	0,70
Belgique	304	0,81 207	0,93	0,94	0,01	0,28	0,25 225	0,90	0,17	0,13	0,64	0,63	0,71
TOTAL	607	0,81 207	0,92	0,92	0,01	0,32	0,27 529	0,93	0,15	0,18	0,64	0,61	0,71
<i>Arabe</i>													
France	34	nd	1,0	1,0	0	0,29	nd	0,97	0	0,38	0,53	0,24 17	nd
Pologne	157	0,56 43	0,87	0,91	0,06	0,49	0,42 43	0,99	0,05	0,29	0,61	0,41	0,61
TOTAL	191	0,56 43	0,90	0,93	0,05	0,46	0,42 43	0,98	0,05	0,30	0,60	0,39 174	0,61 157
<i>Anglo-arabe</i>													
France	360	nd	0,92	0,92	0	0,12	0,12 34	0,97	0	0,28	0,42	0,21 140	0,47 17

nd : non déterminé.

EAU I

érythrocytaires chez les chevaux de sang.

traditionnelle (ligne inférieure) et nouvelle (ligne supérieure).

tillon seulement : l'effectif est alors indiqué sous la fréquence

D					K	P				Q		U	
Dd		De		Df	Ka	Pa		Pb		Qa		Ua	
E'	J ₁	J ₂	G	Y	K	P ₁	P ₂	g	P'	Q	10	U	12
0,66	0,09	0,36	0,27	0,05	0,05	0,39 76	0,29	0,48	0,16 76	0,61	0,72 172	0,38	0 76
0,68 231	0,16	0,44	0,30	0,05	0,09	0,38	0,36	0,38	0,10	0,69	0,69	0,34	0
0,70	0,14	0,37	0,25	0,02	0,16	0,63	0,53	0,62	0,12	0,90	0,90	0,32	0,05
0,68 538	0,14	0,40	0,27	0,05	0,09	0,44 538	0,37	0,45	0,11 538	0,71	0,74 634	0,35	0,01 538
0,87	0,29	0,51	0,02	0,18	0,05	0,48	0,45	0,60	0,05	0,37	0,59	0,50	0,53
0,85	0,33	0,44	0,01	0,21	0,09	0,28	0,70	0,58	0,03	0,35	0,43	0,47	0,42
0,86	0,31	0,48	0,015	0,20	0,07	0,38	0,57	0,59	0,04	0,36	0,51	0,48	0,47
0,94	0,29	0,29	0	0	0,12	0,28 18	0,18	0,38	0,17 18	0,38	0,52 31	0,44	0,33 18
0,87	0,25	0,33	0,09	0,02 43	0	0,49	0,53	0,57	0	0,60	0,82	0,27	0,41
0,88	0,26	0,32	0,07	0,01 77	0,02	0,47 175	0,47	0,53	0,02 175	0,56	0,77 188	0,30	0,40 175
0,95	0,25	0,31	0,06	0,10	0,02	0,56 140	0,45	0,61 266	0,09 140	0,54	0,65 252	0,28	0,09 140

Dans les 3 sous-populations examinées au cours de cette étude, nous avons, de nouveau constaté l'absence des facteurs *Da* et *Ac*. Chez les chevaux *Arabes* de France, nous n'avons trouvé ni *Ac*, ni *Da*; tandis que ceux qui provenaient de Pologne ou de Roumanie les possédaient à très faible fréquence : *Da* : 0,06 et 0,13 ; *Ac* : 0,06 et 0,08 (PODLIACHOUK *et al.*, 1962 ; SIRBU, 1959). Chez les *Trotteurs*, le facteur *Ac* est rare, mais le facteur *Da* est présent à une fréquence appréciable.

TABLEAU 2

Répartition des phénogroupes des systèmes de groupes sanguins A, D, P et Q dans 4 races de chevaux de sang

Système et phénogroupes	P.S.A. A.Ar	Trotteur	Arabe Pologne
<i>A</i>			
<i>I Aa F</i>	+	+	+
<i>Aa F</i>	+	+	+
<i>Ac F</i>	—	rare	rare
<i>Ab 17</i>	+	+	+
<i>Ab</i>	—	+	—
<i>17</i>	—	—	—
<i>a</i>	rare	rare	+
<i>D</i>			
<i>Dd</i>	+	+	+
<i>Da Dd</i>	—	+	rare
<i>Dd De</i>	—	+	—
<i>Dd Df</i>	+	+	rare
<i>Db Dc 14</i>	+	+	+
<i>Dc 8 14</i>	+	+	+
<i>8 14 Dd</i>	+	+	—
<i>Dd J₁ De</i>	+	+	+
<i>Dc 8 14 De G</i>	+	rare	rare
<i>Dc 8 14 De Df</i>	—	rare	—
<i>P</i>			
<i>Pa P₂ 9</i>	+	+	+
<i>P₂ 9</i>	+	+	+
<i>Pb</i>	+	rare	—
<i>P</i>	+	+	+
<i>Q</i>			
<i>Qa 10</i>	+	+	+
<i>Qa</i>	+	+	+
<i>10</i>	+	+	+
<i>q</i>	+	+	+

En ce qui concerne les autres facteurs, la plupart présentent pratiquement les mêmes fréquences dans les 3 sous-populations de *Pur-sang anglais* (à l'exception de *Pa*, *P₂*, *9*, *Qa* et *10*, plus fréquents en Pologne) et d'autre part, dans les 2 sous-populations des *Trotteurs*. Pour les *Arabes*, des divergences sont notées pour *Ab*, *Ac* et

Da, et tous les facteurs des systèmes *P* et *Q*. L'*Anglo-arabe* présente des fréquences plus faibles que les *Pur-sang anglais* et les *Arabes* de France pour *Db*, *Dc*, *9* et *Ua*, et plus fortes pour *Df*, *Pa*, *P₂* et *9*; pour les autres facteurs les fréquences sont intermédiaires entre celles des races parentales.

A l'intérieur de chacun des systèmes complexes de groupes sanguins, l'analyse génétique permet de distinguer des « phénogroupes », ou groupes de facteurs érythrocytaires, que l'on peut considérer, tout au moins en première analyse, comme indissociables et commandés par les allèles du système. L'identification des phénogroupes a déjà été faite pour le système *A* par PODLIACHOUK (1957) et pour le système *D* par SANDBERG (1973).

Le tableau 2 donne la répartition des phénogroupes dans les systèmes *A*, *D*, *P*, et *Q*, pour les 4 races examinées.

TABLEAU 3

Comparaison des phénogroupes du système *D* selon SANDBERG (1973) et le présent travail

SANDBERG		L. PODLIACHOUK	
Nomenclature des facteurs		Nomenclature des facteurs	
ancienne	nouvelle	ancienne	nouvelle
		et personnelle pour des facteurs non encore homologués	
<i>E₁</i>	<i>Db</i>	<i>E₁ E₂ 14</i>	<i>Db Dc 14</i>
<i>E₂</i>	<i>Dc</i> —	<i>E₂ 8 14</i>	<i>Dc 8 14</i>
<i>E'</i>	<i>Dd</i> —	{ <i>E'</i> ou <i>8 14 E'</i>	{ <i>Dd</i> ou <i>8 14 Dd</i> }
<i>JE'</i>	<i>De Dd</i> —	{ <i>E' J₁ J₂</i> ou <i>E' J₂</i>	{ <i>Dd J₁ De</i> ou <i>Dd De</i> }
<i>E' Y</i>	<i>Dd Df</i> —	<i>E' Y</i>	<i>Dd Df</i>
<i>E₂ J Y</i>	<i>Dc De Df</i>	<i>E₂ 8 14 J₂ Y</i>	<i>Dc 8 14 De Df</i>
<i>E₂ J</i>	<i>Dc De</i> —	<i>E₂ 8 14 J₂ G</i>	<i>Dc 8 14 De G</i>
<i>D E'</i>	<i>Da Dd</i> —	<i>D E'</i>	<i>Da Dd</i>

Dans le système *A*, sur 7 phénogroupes observés dans les différentes races chevalines étudiées jusqu'à ce jour, 6 se retrouvent chez les chevaux de « sang ». Le phénogroupe AcF, absent chez le *Pur-sang* et l'*Anglo-arabe*, est présent, quoique rare, chez le *Trotteur* et l'*Arabe* de Pologne; Ab seul n'a été observé que chez le *Trotteur*. Les deux sont très fréquents chez les chevaux de *Trait* (PODLIACHOUK et KAMINSKI, 1972).

Le système *D* est sensiblement plus complexe. SANDBERG (1973) utilisant 6

réactifs correspondant aux facteurs *Da*, *Db*, *Dc*, *Dd*, *De* et *Df*, a décrit 8 phénogroupes dans ce système. L'introduction par l'un de nous (PODLIACHOUK) de 4 réactifs nouveaux : anti-*J*₁, anti-*G*, anti-*8* et anti-*15*, en plus des 6 réactifs utilisés par SANDBERG, permet de dédoubler 2 des phénogroupes indiqués par cet auteur. Le nombre de phénogroupes du système *D* est ainsi porté à 10.

Le tableau 3 compare les phénogroupes répertoriés par SANDBERG à ceux identifiés dans notre laboratoire. Nous avons tenu compte du fait que le facteur *J* de SANDBERG équivaut à notre facteur *J*₂ et (*De*), que le facteur *E*₁ (*Db*) de SANDBERG équivaut à la superposition de nos facteurs *E*₁ + *E*₂ (*Db* + *Dc*).

Les 10 phénogroupes du système *D* ont été observés dans les races étudiées dans le présent travail. Notons que les phénogroupes *Dad* et *Dae* sont absents dans nos échantillons de *Pur-sang anglais* et d'*Anglo-arabes*, alors qu'ils sont fréquents chez les chevaux de trait (PODLIACHOUK *et al.*, 1974 ; KAMINSKI *et al.*, 1976). Ces deux phénogroupes sont présents chez les *Trotteurs* ; *Dad* a été rencontré, quoique rarement, chez les *Arabes* de Pologne.

Dans le présent travail, l'estimation des fréquences alléliques des systèmes de groupes sanguins complexes n'a pas été effectuée, la proportion de génotypes définitivement élucidés ayant été jugée encore insuffisante. En conséquence, par manque de données suffisantes sur les fréquences géniques, nous n'avons pas tenté de mesurer le degré de parenté existant entre les races étudiées.

2. — Protéines non-enzymatiques et enzymes du sérum et de l'hémolysat

Les tableaux 4, 5 et 6 donnent la répartition de phénotypes ainsi que l'estimation des fréquences géniques pour l'ensemble des 4 races examinées.

Pour l'albumine, la fréquence de l'allèle *Al^S* dépasse nettement celle de *Al^F* excepté pour l'*Arabe*, où la fréquence des deux allèles s'équilibre.

TABLEAU 4

Phénotypes et fréquences alléliques des constituants polymorphes sanguins dans 4 races de chevaux de sang
Systèmes sériques bi-alléliques

Populations	Nombre	Phénotypes			Fréquence	
		F	FS	S	F	S
<i>Pur-sang anglais</i> ...	621	621	0	0	1	0
<i>Trotteur</i>	663	431	194	38	0,796 ± 0,011	0,204 ± 0,011
<i>Arabe</i>	184	156	27	1	0,921 ± 0,014	0,079 ± 0,014
<i>Anglo-Arabe</i>	197	185	12	0	0,970 ± 0,009	0,030 ± 0,009

1. — Préalbumine - Xk

TABLEAU 4 (suite)

Populations	Nombre	Phénotypes			Fréquence	
		F	FS	S	F	S
<i>Pur-sang anglais</i> ...	604	41	248	315	0,273 ± 0,013	0,727 ± 0,013
<i>Trotteur</i>	950	97	435	418	0,331 ± 0,011	0,669 ± 0,011
<i>Arabe</i>	202	52	101	49	0,507 ± 0,025	0,493 ± 0,025
<i>Anglo-Arabe</i>	301	25	108	168	0,262 ± 0,018	0,738 ± 0,018

Pour la transferrine, on peut noter la faible fréquence des allèles à migration lente Tf^o et Tf^R (ce dernier complètement absent chez les *Arabes*), alors que les allèles Tf^D et Tf^F à migration rapide prédominent dans toutes les races. Les deux phénotypes les plus fréquents sont DF et F , le premier prédominant chez les *Pur-sang anglais*, le second chez les *Trotteurs*.

En ce qui concerne l'estérase, tous les chevaux de « sang » sont caractérisés par une prédominance très marquée de l'allèle Es^I . Le *Pur-sang anglais* et l'*Anglo-arabe* possèdent en outre l'allèle Es^F , tandis que l'*Arabe* de Pologne et les *Trotteurs* se distinguent par la présence de l'allèle Es^G , fréquent chez les chevaux de trait.

Au système des préalbumines Pr , les races de chevaux de « sang » présentent certaines différences. Les *Arabes* et surtout les *Trotteurs* se distinguent par une fréquence élevée de l'allèle Pr^S ; d'autre part, ce même *Arabe*, le *Pur-sang anglais* et l'*Anglo-arabe* présentent une fréquence élevée de l'allèle Pr^L .

Parmi les allèles rares connus chez le cheval, les allèles $6-PGD^D$, PGM^V , PHI^S , CA^S , Al^I , Es^H , Tf^M , Pr^T et Pr^U n'ont pas été rencontrés dans cette étude.

En général il apparaît clairement que le *Pur-sang anglais*, l'*Arabe*, et l'*Anglo-arabe* sont, au point de vue génétique, beaucoup plus homogènes que le *Trotteur*. En effet, les premiers apparaissent monomorphes dans ce travail, pour les systèmes PGM , PHI , AP , X_K et présentent un nombre d'allèles réduit dans les systèmes CA et Es . Les *Trotteurs* et *Anglo-arabes* montrent une fréquence nettement plus élevée que les deux autres races des variants rapides Cc^F et $6-PGD^F$.

La répartition des génotypes dans les différents systèmes étudiés a été comparée à celle attendue dans l'hypothèse d'équilibre génétique (loi de Hardy-Weinberg). On note des écarts significatifs pour les systèmes suivants : *Pur-sang anglais* : CA , PR ; *Trotteur* : $6-PGD$, PGM , AP , X_K , Es , Tf , Pr ; *Arabe* : AP , Es , Pr ; *Anglo-arabe* : Pr . On notera en particulier le nombre d'écarts significatifs observés chez les *Trotteurs*. D'autre part, au système Pr aucune population n'apparaît à l'équilibre génétique, mais il n'est pas exclu que cette situation soit due à une insuffisance des techniques, la distinction entre certains homozygotes et certains hétérozygotes étant difficile.

TABLEAU 5

Phénotypes et fréquences alléliques des constituants polymorphes sanguins dans 4 races de chevaux de sang
Systèmes sériques multi-alléliques

	Nbre	Phénotypes																				
		F	FG	FI	G	GI	I	IS														
P.S.A.	628	1	0	55	0	0																
T.	994	2	2	43	10	71																
A.	192	1	2	5	2	18																
A.A.	322	0	0	7	0	1																

	Nbre	Phénotypes															
		D	DF	DH	DO	DR	F	FH	FO	FR	H	HO	HR	O	OR	R	
P.S.A.	612	58	186	36	33	14	135	40	53	31	0	11	2	5	5	3	
T.	1 005	26	216	31	31	11	439	65	104	36	14	45	2	7	6	2	
A.	193	16	99	4	6	0	50	10	6	0	0	2	0	0	0	0	
A.A.	313	49	112	6	14	4	71	18	29	1	0	3	1	2	2	1	

	Nbre	Phénotypes																			
		F	FI	FN	FIV	ES	FL	IN	IIV	IS	IL	N	NIV	NS	NL	IV	IIVS	IWL	S	SL	L
P.S.A.	621	0	11	5	3	6	28	2	4	12	47	23	22	29	80	0	7	37	15	50	240
T.	602	0	6	1	1	8	5	6	3	44	43	21	4	77	31	4	6	27	193	67	58
A.	185	0	3	0	0	3	4	1	0	3	7	1	3	29	20	0	1	2	35	10	63
A.A.	197	3	5	2	1	5	15	2	0	0	8	4	3	12	26	0	0	5	4	11	91

Préalbumine - Pr

TABLEAU 5 (suite)

Esterase - Es (pH 4,5 + pH 8,5)

	Nbre	Fréquence allélique				
		F	G	I	S	
P.S.A.	628	0,045 ± 0,006	0	0,939 ± 0,007	0,015 ± 0,003	
T.	994	0,025 ± 0,003	0,047 ± 0,005	0,908 ± 0,006	0,020 ± 0,003	
A.	192	0,023 ± 0,008	0,063 ± 0,012	0,878 ± 0,017	0,036 ± 0,009	
A.A.	322	0,010 ± 0,004	0,001 ± 0,001	0,972 ± 0,006	0,015 ± 0,005	

Transferrine - Tf

	Nbre	Fréquence allélique				
		D	F	H	O	R
P.S.A.	612	0,315 ± 0,013	0,474 ± 0,014	0,073 ± 0,007	0,092 ± 0,008	0,047 ± 0,006
T.	1 005	0,170 ± 0,008	0,646 ± 0,011	0,070 ± 0,006	0,085 ± 0,006	0,029 ± 0,004
A.	193	0,365 ± 0,024	0,557 ± 0,025	0,041 ± 0,010	0,036 ± 0,009	0
A.A.	313	0,374 ± 0,019	0,482 ± 0,020	0,045 ± 0,008	0,083 ± 0,011	0,016 ± 0,005

Préalbumine - Pr

	Nbre	Fréquence allélique				
		F	I	N	IV	S
P.S.A.	621	0,043 ± 0,007	0,061 ± 0,011	0,148 ± 0,010	0,059 ± 0,007	0,108 ± 0,009
T.	602	0,017 ± 0,004	0,082 ± 0,008	0,134 ± 0,010	0,041 ± 0,006	0,486 ± 0,014
A.	185	0,027 ± 0,008	0,038 ± 0,010	0,149 ± 0,018	0,046 ± 0,006	0,314 ± 0,024
A.A.	197	0,086 ± 0,014	0,038 ± 0,009	0,135 ± 0,017	0,023 ± 0,007	0,091 ± 0,014

0,581 ± 0,014
0,240 ± 0,012
0,458 ± 0,026
0,627 ± 0,024

TABLEAU 6

*Phénotypes et fréquences alléliques des constituants polymorphes sanguins
dans 4 races de chevaux de sang
Systèmes intra-érythrocytaires*

1. — Catalase - Cc						
Populations	Nombre	Phénotypes			Fréquence allélique	
		F	M	S	F	S
<i>Pur-sang anglais</i> ...	512	1	23	488	0,024 ± 0,005	0,976 ± 0,005
<i>Trotteur</i>	670	33	211	426	0,207 ± 0,011	0,793 ± 0,011
<i>Arabe</i>	176	1	16	159	0,051 ± 0,012	0,949 ± 0,012
<i>Anglo-arabe</i>	139	6	43	90	0,198 ± 0,012	0,802 ± 0,024

2. — 6-Phosphogluconate-déhydrogénase - 6-PGD						
Populations	Nombre	Phénotypes			Fréquence allélique	
		F	FS	S	F	S
<i>Pur-sang anglais</i> ...	612	213	293	106	0,587 ± 0,014	0,413 ± 0,014
<i>Trotteur</i>	780	497	236	47	0,788 ± 0,010	0,212 ± 0,010
<i>Arabe</i>	188	24	99	65	0,391 ± 0,025	0,609 ± 0,025
<i>Anglo-arabe</i>	257	128	106	23	0,704 ± 0,020	0,296 ± 0,020

3. — Phosphoglucomutase - PGM						
Populations	Nombre	Phénotypes			Fréquence allélique	
		F	FS	S	F	S
<i>Pur-sang anglais</i> ...	508	0	0	508	0	1
<i>Trotteur</i>	499	7	40	452	0,054 ± 0,007	0,946 ± 0,007
<i>Arabe</i>	161	27	67	67	0,376 ± 0,027	0,624 ± 0,027
<i>Anglo-arabe</i>	14	0	0	14	0	1

4. — Phosphohexose-isomérase - PHI						
Populations	Nombre	Phénotypes			Fréquence allélique	
		F	FI	I	F	I
<i>Pur-sang anglais</i> ...	508	0	0	508	0	1
<i>Trotteur</i>	469	0	59	410	0,063 ± 0,008	0,937 ± 0,008
<i>Arabe</i>	161	0	2	159	0,006 ± 0,004	0,994 ± 0,004
<i>Anglo-arabe</i>	14	0	0	14	0	1

TABLEAU 6 (suite)

5. — *Phosphatase Acide* — AP

Populations	Nombre	Phénotypes			Fréquence allélique	
		F	FS	S	F	S
<i>Pur-sang anglais</i> ...	508	0	3	505	0,003 ± 0,001	0,997 ± 0,001
<i>Trotteur</i>	469	20	42	407	0,087 ± 0,009	0,913 ± 0,009
<i>Arabe</i>	161	3	15	143	0,065 ± 0,014	0,935 ± 0,014
<i>Anglo-arabe</i>	14	0	0	14	0	1

6. — *Anhydrase Carbonique* — CA

Population	Nombre	Phénotypes						Fréquence allélique		
		F	FI	FO	I	IO	O	F	I	O
<i>P.S.A.</i>	614	7	54	0	553	0	0	0,055 ± 0,006	0,945 ± 0,006	0
<i>Tr.</i>	747	2	43	1	670	30	1	0,032 ± 0,006	0,946 ± 0,006	0,022 ± 0,004
<i>Ar.</i>	189	0	12	0	177	0	0	0,032 ± 0,009	0,968 ± 0,009	0
<i>A.Ar.</i>	243	0	5	0	238	0	0	0,010 ± 0,004	0,990 ± 0,004	0

3. — *Différences génétiques entre les races de chevaux de sang et entre certaines sous-populations géographiques de ces races*

Les quatre races étudiées ont été comparées deux par deux, pour chaque système génétique par le test de χ^2 . A cet effet, il a été fait appel aux systèmes analysés par électrophorèse, dont les fréquences géniques avaient pu être estimées. Afin de faire ressortir des déviations imputables uniquement à des variations de fréquence et non à des écarts aux proportions de Hardy-Weinberg, les calculs de χ^2 ont été entrepris uniquement à partir des systèmes où les génotypes sont distribués conformément à cette loi (tabl. 7).

Les *Pur-sang anglais* diffèrent manifestement des *Trotteurs* pour tous les systèmes. Cette observation se répète dans une moindre mesure lorsque ces mêmes *Trotteurs* sont comparés avec les *Arabes* et *Anglo-arabes*. Les *Pur-sang anglais* diffèrent également d'une manière sensible lorsqu'on les compare avec les *Arabes*. Les caractéristiques de l'*Anglo-arabe* deviennent évidentes lorsqu'on considère sa provenance à partir de *Pur-sang anglais* et d'*Arabe* ; des différences significatives n'ont été observées que pour quelques systèmes.

Afin de vérifier l'appartenance des sous-populations à un même ensemble génétique, caractéristique d'une race, les différentes sous-populations ont également été comparées entre elles par le test de χ^2 pour chaque système analysé par électrophorèse (tabl. 8).

TABLEAU 7

Différences génétiques significatives (χ^2) entre 4 races de chevaux de sang pour 11 systèmes sanguins polymorphes d.d.l. K (K-1)

(* P < 0,05 ; ** P < 0,01 ; *** P < 0,001)

Paires de races comparées :

- 1) *Pur-sang anglais-Trotteur* ; 4) *Trotteur-Arabe* ;
 2) *Pur-sang anglais-Arabe* ; 5) *Trotteur-Anglo-arabe* ;
 3) *Pur-sang anglais-Anglo-arabe* ; 6) *Arabe-Anglo-arabe*.

Systèmes	<i>Pur-sang anglais Trotteur</i>	<i>Pur-sang anglais Arabe</i>	<i>Pur-sang anglais Anglo-arabe</i>	<i>Trotteur Arabe</i>	<i>Trotteur Anglo-arabe</i>	<i>Arabe Anglo-arabe</i>
<i>Cc</i>	180,0***	7,7	129,3***	48,9***	0,1	33,5***
<i>6-PGD</i>	135,4***	46,3***	21,3***	280,7***	15,5***	91,7***
<i>PGM</i>	67,6***	581,7***	0	263,1***	1,6	20,0***
<i>PHI</i>	61,2***	6,7	0	15,5***	1,9	0,2
<i>AP</i>	85,2***	56,7***	0,1	1,6	2,8	1,8
<i>CA</i>	36,0***	3,4	17,5***	8,6	18,2***	5,0
<i>Xk</i>	267,6***	107,8***	39,7***	31,7***	69,8***	8,7
<i>Al</i>	11,6*	78,9***	0,2	46,6***	10,0	65,1***
<i>Es</i>	71,9***	109,4***	20,2	5,7	35,3***	47,5***
<i>Tf</i>	119,9***	41,8***	21,0	98,5***	127,2***	17,0
<i>Pr</i>	540,0***	108,4***	23,7	83,9***	370,7***	72,8***

TABLEAU 8

Différences génétiques significatives (χ^2) observées parmi les sous-populations des 4 races de chevaux de sang pour certains systèmes polymorphes

Système	Comparaison	χ^2	Système	Comparaison	χ^2
<i>Cc</i>	<i>P.S.A.F-P.S.A.B</i>	6,0*	<i>Xk</i> <i>Es</i>	<i>T.F-T.B</i>	8,5*
	<i>P.S.A.B-P.S.A.P</i>	41,0***		<i>P.S.A.F-P.S.A.B</i>	14,5*
	<i>Ar.F-Ar.P</i>	23,9***		<i>T.F-T.B</i>	21,5*
<i>6-PGD</i>	<i>P.S.A.F-P.S.A.P</i>	6,2*	<i>Pr</i>	<i>P.S.A.B-P.S.A.P</i>	33,7*
	<i>T.F-T.B</i>	21,7***		<i>T.F-T.B</i>	57,1***
	<i>Ar.F-Ar.P</i>	220,0***		<i>Ar.F-Ar.P</i>	56,5***
<i>AP</i>	<i>T.F-T.B</i>	157,3***			

Aucune différence ne peut être mise en évidence pour les systèmes *PGM*, *PHI*, *CA*, *Al*, *Tf*. Le *Trotteur français* s'écarte du *Trotteur belge* pour cinq systèmes et l'*Arabe français* de l'*Arabe polonais* pour trois systèmes. Le *Pur-sang anglais* de France ne se distingue de celui de Belgique que par deux systèmes et de celui de Pologne que par un seul système, tandis que le *Pur-sang anglais* de provenance belge se différencie de celui de Pologne par deux systèmes.

IV. — DISCUSSION ET CONCLUSION

Les races de chevaux de courses ont été depuis toujours soumises à une sélection fort rigoureuse. Le nombre de lignées est souvent limité et comme le stud-book est fermé depuis longtemps, le pool génique de ces races peut être considéré comme bien isolé.

En examinant les sept systèmes de groupes érythrocytaires et les onze systèmes de protéines sanguines retenus pour cette étude, on constate que même dans les races où la variabilité est la plus restreinte, on possède dès maintenant un arsenal de systèmes génétiques marqueurs suffisamment diversifié pour que l'identification des animaux et le contrôle des généalogies puisse se faire avec une bonne précision. Les systèmes plus complexes, tels que les systèmes de groupes sanguins *A*, *D* et les systèmes polymorphes *Tf*, *Es*, *Pr*, *6-PGD* et *CA* sont les plus intéressants à cet égard.

Les systèmes génétiques marqueurs sont également des témoins de l'évolution des populations. On constate ainsi que la race de *Pur-sang anglais*, qui ne descend, en lignée mâle, que de trois étalons et en lignée femelle que d'une cinquantaine de juments, présente une variabilité très limitée. En effet, dans cette race, les systèmes *PGM*, *PHI* et *Xk* ne présentent pas de polymorphisme décelable par électrophorèse et les systèmes *Es*, *Cc* et *AP* sont presque monomorphes. On notera aussi que les races *Arabe* et *Anglo-arabe* ne présentent qu'une faible variabilité. *L'Arabe* se distingue principalement par la fréquence élevée de l'allèle *PGM^F*. Il est par ailleurs remarquable de constater que, dans les trois races précitées, les systèmes *6-PGD* et *Al* sont restés polymorphes.

En définitive, il serait donc utile, dans ces trois races, de mettre en évidence de nouveaux systèmes polymorphes afin de pouvoir rendre plus précise l'identification des animaux et le contrôle des filiations.

A la différence des *Pur-sang*, *Arabes* et *Anglo-arabes*, les *Trotteurs* présentent une variabilité génétique assez prononcée. On peut voir dans ce résultat l'influence de l'apport de chevaux de *Demi-sang* qui ont contribué à la création de cette race. Ceci situe, en tous cas, la variabilité génétique des trotteurs entre celle des chevaux de « sang » et celle des chevaux de trait.

En général, nos résultats indiquent très clairement — ce qui était assez prévisible — qu'il existe une plus grande similitude entre les sous-populations d'une même race prises dans des pays différents qu'entre les différentes races elles-mêmes. Les divergences mineures constatées entre les trois sous-populations de *Pur-sang anglais* pourraient d'ailleurs être imputables au fait que l'échantillonnage n'a pas été fait de manière tout à fait comparable dans les trois pays. On notera cependant que la différenciation génétique est beaucoup plus prononcée entre les sous-populations de *Trotteurs*. L'influence plus importante qu'a eu le trotteur américain dans la sélection du *Trotteur* belge est probablement une des causes principales de sa non-identité génétique avec le *Trotteur* français.

En ce qui concerne les *Arabes*, les divergences observées entre les populations de France et de Pologne s'expliquent par l'origine différente de ces populations. Les *Arabes* élevés en Pologne depuis le xvi^e siècle proviennent surtout du butin acquis

dans les guerres contre les Turcs ; plusieurs sujets *Arabes* furent également achetés au courant du XIX^e siècle dans la péninsule d'Arabie ; par ailleurs, les souches de chevaux *Arabes* les plus appréciées en Pologne étaient du type *Kehailan* et *Saklaoui*. Par contre, en France, les *Arabes* proviennent de l'Afrique du Nord et appartiennent principalement à la souche *Muniki*.

Reçu pour publication en octobre 1975.

REMERCIEMENTS

Nous remercions pour l'excellente collaboration technique, M^{mes} Roselyne BEAUD et Françoise FIGACHE et M^{lle} Michèle SYKIOTIS.

Ce travail a bénéficié du support financier de la *Société d'Encouragement pour l'Amélioration des races de chevaux* en France (Directeur J. ROMANET), et de l'*Institut pour l'Encouragement de la Recherche Scientifique dans l'Industrie et l'Agriculture* (Bruxelles).

SUMMARY

BLOOD GENETIC MARKERS IN RACE HORSES

The purpose of the present study was to determine the repartition of genetic variants in 7 blood group systems (*A, C, D, K, P, Q, U*) and in 11 polymorphic systems of serum (*Pr, X_k, Al, Tf, Es*) and red cell (*Cc, CA, AP, 6-PGD, PGM, PHI*) enzymes and proteins in 4 breeds of race horses.

In total, 646 *Thoroughbreds* from France, Belgium, Poland ; 1011 *Trotters* from France, Belgium ; 204 *Arabs* from France, Poland and 360 *Anglo-arabs* from France were examined. The samples consisted both in unrelated animals and in family groups.

All the 4 breeds examined showed genetic variants in most of the systems. Many alleles could be detected in the complex blood group systems *A, D, P, Q* and in the polymorphic systems *CA, Es, Tf, Pr*.

The *Thoroughbreds, Arabs* and *Anglo-arabs* presented only a slight genetic variation : they appeared fixed in homozygous condition for a number of alleles belonging to bi or multi-allelic systems.

The variability in those 3 breeds showed more restricted than in *Trotters*. The nature, the number and the frequencies of the alleles found in *Trotters* lie between those of the « warmblood » and draught horses, owing to numerous crosses performed in the past among half-breds and *thoroughbreds*, leading to the production of trotters. The « genetic profile » of *Trotters* appeared indeed markedly different when compared with *Thoroughbreds, Arabs* or *Anglo-arabs*, whereas the divergencies between those 3 breeds were much less significant. Because of a restricted genetic heterogeneity of *Thoroughbreds, Arabs* and *Anglo-arabs*, the introduction of any new system of genetic markers would be helpful toward a more precise identification of animals and the control of their parentage.

The genetic differences observed between the various geographical subpopulations of the breeds were of much smaller magnitude than these between the total breeds themselves. The 3 subpopulations of *Thoroughbreds* were quite alike. Genetic differences were more pronounced between the two subpopulations of the *Trotters* and *Arabs*. Probably the admixture of american blood in the *Belgian Trotter* population is more pronounced than in the *French-Trotter*.

Concerning the *Arabs*, those from Poland were mainly of Turkish origin and belong mainly to the *Saklaoui* and *Kuheilan* strains while the arabs of France have originated from North-Africa and are of the *Muniki* strain.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANONYME, 1974. *Anim. Blood Grps. Biochem., Genet.*, **5**, 196-197.
- BRAEND M., 1973. *Genetic Variation in Equine Blood Proteins*. Proc. 3rd int. Conf. Equine infectious Diseases, Paris, 1972, Karger ed. 394-406.
- KAMINSKI M., BOUQUET Y., VAN DE WEGHE A., PODLIACHOUK L., 1974. Ontogenèse des marqueurs génétiques sanguins chez le Cheval. *Ann. Génét. Sél. anim.*, **6**, 195-210.
- KAMINSKI M., PODLIACHOUK L., BOUQUET Y., VAN DE WEGHE A., 1976. Étude des marqueurs génétiques sanguins chez les chevaux de trait (en préparation).
- PODLIACHOUK L., 1957. *Les antigènes de groupes sanguins des Équidés et leur transmission héréditaire*. Thèse Doct. ès-Sci. Paris.
- PODLIACHOUK L., 1968. Immunogénétique des équidés. *Acta Zool. Path. Antverpiensia.*, **48**, 53-68.
- PODLIACHOUK L., KACZMAREK A., ZWOLINSKI J., 1962. Les groupes sanguins des chevaux de six races de Pologne. *Ann. Inst. Pasteur*, **103**, 943-949.
- PODLIACHOUK L., KAMINSKI M., 1972. *Studies on blood groups, esterases and transferrins in light and draught horses*. XIII Europ. Conf. Anim. Blood Groups Biochem. Polymorph. (Vienna).
- PODLIACHOUK L., KAMINSKI M., BOUQUET Y., ZWOLINSKI J., VAN DE WEGHE A., SIUDZINSKI S., 1974. *Blood genetic Markers in race Horses*. XIV Europ. Conf. Anim. Blood Groups Biochem. Polymorph. (Davis, E. U.).
- QUITTET E. BLANC H., 1974. Races chevalines en France, *La Maison Rustique*, Paris.
- SANDBERG K., 1973. The D blood group system of the horse. *Anim. Blood Grps. Biochem. Genet.*, **4**, 193-205.
- SIRBU Z., 1959. Étude sérologique et génétique des groupes sanguins du cheval dans six unités d'élevage. *Inst. Path. Hyg. Anim.*, **7**, 189-211.
- STORMONT C., SUZUKI Y., 1964. Genetic systems of blood groups in horses. *Genetics*, **54**, 915-929.
-